

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique  
**Université Hassiba Benbouali de Chlef**  
**Faculté de Technologie**  
**Département d'électronique**



**Polycopié de cours destiné aux étudiants**  
**Master 2 en télécommunication**  
**Matière : Communications optiques**

*Présenté par :*

**Dr. Hadj Ali BAKIR**

**Année universitaire : 2018 -2019**

# Sommaire

## Chapitre 01 : Introduction aux systèmes de communications optiques

1.1 Introduction et bref historique .....	01
1.1.1 Introduction .....	01
1.1.2 Bref historique .....	01
1.2 Evolution des systèmes de communications optiques .....	03
1.3 Avantages des fibres optiques .....	03

## Chapitre 02 : Etude de la propagation dans les fibres optiques

2.1 Approche géométrique .....	05
2.1.1 Principe de Fermat et loi de Snell-Descartes .....	05
2.1.2 Applications aux fibres optiques (Notion de l'ouverture numérique – Fibres multi mode et monomode) .....	06
2.1.3 Angle d'acceptance .....	09
2.1.4 Différents types de fibres optiques .....	12
2.1.4.1 Fibre optique multi mode à saut d'indice .....	13
2.1.4.2 Fibre optique multi mode à gradient d'indice .....	14
2.1.4.3 Fibre optique monomode .....	15
2.2 Approche ondulatoire .....	16
2.2.1 Les modes dans des FO cylindriques .....	16
A) pour une FO à saut d'indice .....	19
B) Pour une FO à gradient d'indice .....	20
2.3 Les principales causes de l'atténuation dans les FO .....	23
2.4 Autres limitations des fibres optiques .....	23
2.4.1 La dispersion .....	23
2.4.2 La dispersion modale .....	24
2.4.3 La dispersion chromatique .....	26

## Chapitre 03 : Emetteurs / Récepteurs Electro-optique

3.1 Diodes LED .....	28
3.1.1 Les caractéristiques demandées de cette source (LED) .....	28
3.1.2 Structure de base et fonctionnement .....	29
3.1.3 Le spectre d'émission de la LED .....	32
3.1.4 L'efficacité quantique et la puissance du LED .....	34
3.2 Diode laser .....	38
3.2.1 Concept de la diode laser .....	38
3.2.2 Condition d'oscillation de la diode laser .....	39
3.2.3 Des diodes laser pour les longues distances .....	46
3.3 Les récepteurs optiques .....	49

3.3.1 Paramètres de performance d'un photo détecteur .....	50
3.3.2 Principe générale des photodiodes .....	53
3.3.3 Schéma équivalent de la photodiode .....	50
3.3.4 Les types des récepteurs optiques .....	56
3.3.4.1 La photodiode PIN .....	56
3.3.4.2 Photodiode à avalanche APD .....	58
3.3.5 Les sources de bruit dans les photos détecteurs .....	61
3.3.5.1 Le bruit d'obscurité .....	61
3.3.5.2 Le bruit de grenaille .....	63
3.3.5.3 Le bruit de johnson .....	63
3.3.5.4 le bruit d'excès .....	63

## **Chapitre 04 : Système de transmission par fibres optiques**

4.1 Schéma synoptique d'une chaine de transmission optique .....	66
4.2 Raccordement des fibres optiques .....	67
4.3 Types de connecteurs .....	67
4.4 Les différents types de liaison optique .....	70
4.4.1 Liaison point à point .....	70
4.4.2 Liaison avec amplificateurs optique EDFA .....	70
4.4.3 Liaison multiplexée à WDM .....	73
4.4.3.1 Des exemples de configurations d'une liaison WDM .....	75
4.4.3.2 Une liaison typique d'un système WDM .....	76
4.4.3.3 Comparaison entre les CWDM et DWDM .....	77
4.4.3.4 Cas particulier : Multiplexeur optique a insertion et extraction (Optical Add /Drop MuX) .....	78
4.4.4 Liaison de multiplexage à OTDM .....	78

## **Chapitre 05 : Réseaux sur fibres optiques**

5.1 Les réseaux optiques .....	84
5.2 Les topologies de base des réseaux PON .....	84
5.3 Etude des éléments d'un réseau optique passif .....	86
5.3.1 OLT (Optical Link Terminal) .....	87
5.3.2 ONT (Optical Network Terminal) .....	87
5.3.3 Coupleur optique (splitter) .....	87
5.4 Les architectures du réseauPON .....	88
5.5 Les architectures du réseau d'accès optique .....	90
5.5.1 L'architecture Point-a-Point .....	90
5.5.2 Point-à-Multipoint passif : PON .....	92
5.5.3 PON avec multiplexage en longueur d'onde (WDM) .....	92
5.6 Types de réseaux d'accès PON et Normalisations .....	93
5.6.1 La norme APON .....	93

5.6.2 La norme BPON .....	93
5.6.3 La norme EPON .....	94
5.6.4 La norme GPON .....	95
<b>5.7</b> Comparaison des standards d'un réseau PON .....	<b>95</b>
<b>Références</b> .....	<b>97</b>

## **Avant propos :**

Ce manuscrit résulte de notes de cours communication optique dont elles sont composées essentiellement de 4 parties comprennent (les émetteurs optique, la fibre optique et la propagation de la lumière par elle-même, les récepteurs optiques, ainsi que les différents types de liaisons optiques et les réseaux optiques).

Sachant que la communication optique devient une branche importante dans le domaine de télécommunication, dont on trouve la grande partie des réseaux soit de la téléphonie fixe ou de la téléphonie mobile qui se compose par des systèmes de transmission optique ou l'interconnexion de l'architecture de ces deux réseaux (fixe et mobile) est faite par la FO (Fibre Optique).

Ce présent manuscrit est présenté comme suit :

**Le chapitre 1** présente une introduction sur les systèmes optiques dans laquelle j'ai cité les différentes phases de développement de la technologie optique et j'ai donné ainsi les différents avantages du support de la FO.

**Le chapitre 2** présente l'étude de la propagation de la lumière dans la FO, ce chapitre est divisé en 2 parties : la 1 ère partie étudier l'approche ondulatoire dont elle la lumière est modélisée par onde électromagnétique, puis dans la 2 ème partie on va étudier l'approche géométrique dont elle la lumière est modélisée par des rayons qui se propagent dans le cœur de la FO.

**Le chapitre 3** se divise en 2 parties, la 1 ère partie décrit les émetteurs optiques (LED et laser). Dans ce chapitre on explique comment la lumière est généré par la diode LED et la diode laser et certaines caractéristiques de ces sources optoélectronique seront données puis la 2ème partie de ce chapitre explique comment la photodiode PIN ou la photodiode APD sert à reconstituer l'information transmis par la FO.

**Le chapitre 4** donne un schéma synoptique sur une liaison optique avec un paragraphe sur les types des connecteurs utilisés pour le raccord des FO ; puis les différentes liaisons qu'on peut concevoir par la FO (comme la liaison WDM et une liaison OTDM) seront décrites dans ce chapitre.

**Le chapitre 5** présente les réseaux optiques et les éléments qui constituent d'un tel réseau optique, les différentes topologies utilisées pour construire un réseau optique. Et un paragraphe décrit tous les normes des réseaux optique (APON, BPON, EPON, GPON).

Alors après ces notions présentées dans les chapitres de ce document ; on comprend comment se transmettre l'information dans une liaison optique (de l'émetteur ; à la FO, puis au récepteur).

# **Chapitre 01 : Introduction aux systèmes de communications optiques**

## **1.1 Introduction et bref historique**

### **1.1.1 Introduction**

- Les systèmes de communication optique utilisent la lumière (Onde lumineuse) pour transmettre l'information d'un lieu à un autre en des distances de quelques kilomètres à des milliers de kilomètres pour délivrer l'information aux maisons et même l'échange entre les centraux téléphoniques des grandes villes.
- La fréquence d'une onde de lumière est proche à 200 THz pour 1550 nm de longueur d'onde. Et comme plusieurs canaux des longueurs d'ondes différentes peuvent être multiplexés pour prendre la capacité totale sur cette bande spectrale et cela permettre d'atteindre des transmissions à des Tbits/sec. Ou cette partie de la bande spectrale est la fenêtre principale qui présente une atténuation faible de la fibre de silice.
- Dans la première décennie du 21<sup>ème</sup> siècle, Le taux binaire d'information atteint est de quelques dizaines des Gbits/sec. Ethernet de dizaines Gbits / sec a été standardisé et l'introduction d'Ethernet de 100 Gbits/sec dans les réseaux de fibre est inévitable. Similairement, pour les taux de transmission dans SDH (synchronous digital hierarchy), OC-192 et OC-768 pour 10 et 40 Gb/sec ont été implanté ces dix dernières années. Récemment, la possibilité de 1 Tb/sec par canal de longueur d'onde a été proposée aussi mais pas encore implanté pratiquement.
- Des ondes lumineuses modulées sont guidés à travers des FO mono mode sur plusieurs kilomètres et la compensation de la lumière est assurée par l'utilisation des amplificateurs dont l'amplification des photons est atteinte.

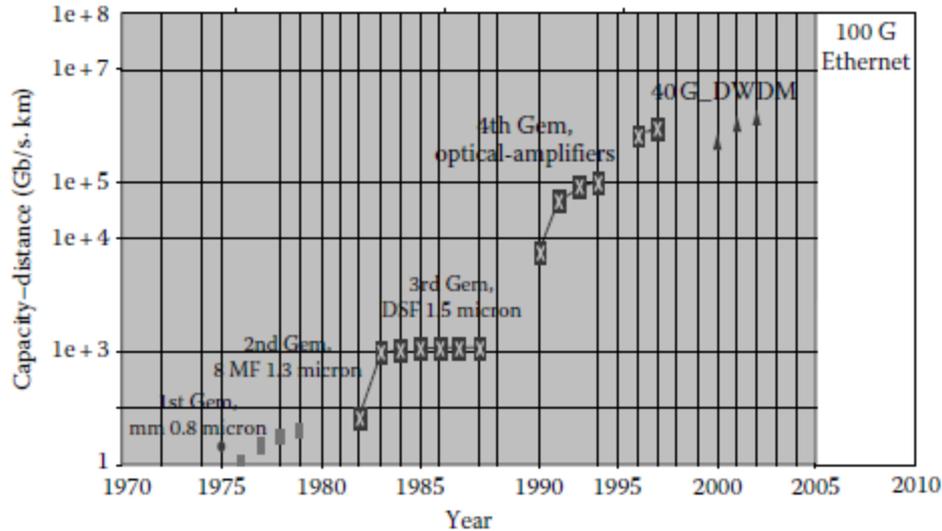
### **1.1.2 Bref historique :**

Les systèmes des communications par fibre optique se sont avancés très vite depuis sa création en 1966. Son développement technologique a progressé dans 03 phases principales.

- Ere de la fibre multi mode dans la première phase quand la fibre de silice a été fabriqué au début des années 1970. Puis à la fin des années 1970, les fibres mono mode ont été fabriquées, et les lasers de longueur d'onde de 1300 nm étaient disponibles aussi dans les

laboratoires de recherche. A cette longueur d'onde, la dispersion de la fibre est proche de zéro, et les systèmes de transmission sont limités par l'atténuation des ondes lumineuses.

- La figure suivante montre l'évolution de la FO de 1970 à 2010.



**Figure 1.1** : La progression des communications optique dans 1975-2010 en terme augmentation capacité-distance avec l'année [1].

Une augmentation significative dans la capacité-distance produit après 1990 et cela est dû à l'invention des amplificateurs optique utilisant des fibres de silice dopée par l'erbium. Avant cela, une certaine amélioration dans la capacité de transmission due au changement de l'utilisation des FO multi modes par des FO mono modes permettront une distance entre les répéteurs à d'accroître autour de 40 km.

Depuis lors les FO mono modes avec faible affaiblissement à  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  étaient utilisées avec sources optique dans cette région. L'affaiblissement est presque  $\frac{1}{2}$  qu'une FO utilise  $\lambda = 1330 \text{ nm}$ . Donc, la distance entre répéteurs, pratiquement était limité à 40 km.

Ce scenario n'a pas amélioré jusqu'aux dernières années de 1980 quand les amplificateurs étaient inventés, particulièrement, l'amplificateur de fibre dopé erbium qui donne un gain optique signifiant dans la plage de (15,530-1.565) nm. Cependant, amplification Raman est aussi disponible, et le gain est distribué sur le long de propagation des signaux optique. Ces amplificateurs optiques ont cependant révolutionné la conception et l'implémentation des systèmes et les réseaux de transmission optique dont le facteur d'atténuation n'était plus d'un grand obstacle.

## 1.2 Evolution des systèmes de communications optiques

- La vitesse rapide et la qualité des systèmes de communications optiques à elle-même reposent sur le développement des nouveaux types des systèmes de communication électronique conçues afin d'être installés en liaisons optiques.
- Les technologies ATM et SDH sont des bons exemples pour les nouveaux systèmes optiques. En effet, certains réseaux LAN et MAN ont été construit aussi.
- En 1998 des réseaux large bande en routage optique sont imminemment faisable et les composants nécessaires dans les raccords sont disponible.
- en 1998 aussi, l'arrivé des systèmes de communication optique WDM. Avec cette technologie de WDM qui est capable d'envoyer plusieurs canaux optiques indépendants (près de 1000) en une seule FO. Le premier produit WDM commercial apparait au marché en 1996. Donc, WDM c'est l'étape majeur vers des réseaux tous optique.
- La fibre optique s'est dans une première phase (**1984 à 2000**) limitée à l'interconnexion des centraux téléphoniques, seuls justifiables de son énorme débit. Avec la baisse des coûts entraînée par sa fabrication en masse et les besoins croissants des particuliers en très haut débit, on envisage depuis **2005** son arrivée même chez les particuliers : **FTTH** (Fiber To The Home), **FTTB** (Fiber To The Building), **FTTC** (Fiber To The Curb), etc...

## 1.3 Avantages des fibres optiques

La communication optique présente beaucoup d'avantages qui sont cités ci-dessous :

### a- Capacité d'information

Le taux de données des systèmes optique dans 1998 est généralement 150 ou 620 Mbps sur une seule fibre (unidirectionnel). Ce débit pour des systèmes qui étaient déjà installés dans les années précédentes. Mais le taux de données habituel pour les nouveaux systèmes est 2.4 Gbps ou même 10 Gbps. Ceci est le très haut débit atteint en termes de transmission numérique. Et ça à cause de la grande BP de la FO que possède (autours de THz) par rapport aux câbles électriques. La technologie de la FO est restée encore en développement, utilisant un seul canal par FO, les systèmes optiques arrivent à transmettre un débit de 100 Gbps via le multiplexage WDM.

## **b- Transmission à longue distance**

Car la FO a une atténuation plus faible que les câbles électriques (0.2 dB/ km). Et cela permet de réduire les répéteurs, les amplificateurs dans les grandes distances.

## **c- Immunité à l'interférence électrique**

Une caractéristique importante des FO qui dépendra au matériau diélectrique (silice) car il ne conduit pas l'électricité. Ceci fait des FO immunes aux interférences électromagnétiques, ce phénomène est très connu dans les câbles électriques.

## **d- Sécurité du signal accrue**

La FO offre une grande sécurité de l'information dont le signal optique est bien confiné dans la FO. Et n'importe quelles émissions de signal seront absorbées par une couche de revêtement autour du brin optique. Cela rend la FO plus attractive dans les applications qui nécessitent une sécurité d'information importante. Comme par exemple, les administrations de gouvernement, les systèmes militaires, et les systèmes financiers.

## **e- faible poids et petite dimension**

Ces propriétés physiques permettent une installation facile d'une FO sur les gaines et sur les façades par rapport aux conducteurs électriques qui possèdent des grandes dimensions.

## **g- Distance entre les répéteurs**

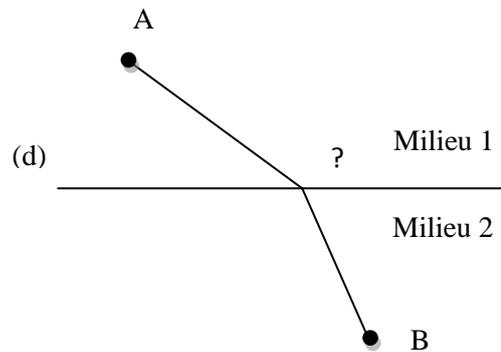
Les répéteurs sont utilisés pour compenser l'atténuation que subit le signal dans sa propagation dans les câbles de transmission. Dans les longues distances de transmission les opérateurs téléphoniques utilisent la FO. La distance entre les répéteurs est généralement 40 km. Ça par rapport à 12 km pour le câble coaxial. Le nombre des répéteurs nécessaire et leur espacement est un facteur majeur dans le coût du système. Des systèmes optiques qui sont installés en 1998 ont eu une distance entre répéteur jusqu'à 120 km.

## Chapitre 02 : Etude de la propagation dans les fibres optiques

### 2.1. Approche géométrique

#### 2.1.1 Principe de Fermat et loi de Snell-Descartes :

La droite (d) sépare deux milieux homogènes différents. Dans le premier milieu, la lumière se déplace à la vitesse  $v_1$ , et dans le deuxième à la vitesse  $v_2$ .



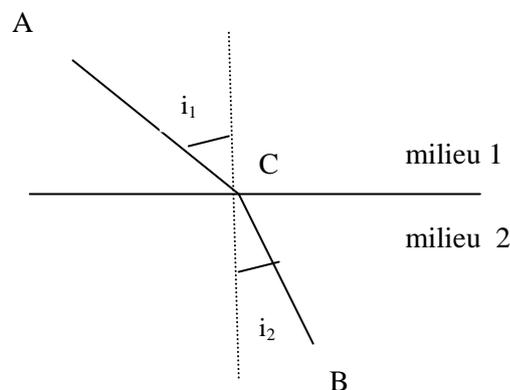
**Figure 2.1 :** Illustration d'une propagation de lumière de milieu 1 vers milieu 2 passant par la droite (D) [13]

La question est de savoir quelle trajectoire va emprunter la lumière pour aller du point A (situé dans le premier milieu) au point B (situé dans le deuxième milieu).

D'après la loi de Snell-Descartes concernant la réfraction, la lumière va passer par le point C tel que :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \quad (2.1)$$

$n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction des milieux et sont définis par  $n_i = \frac{c}{v_i}$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide et  $v_i$  la vitesse de la lumière dans le milieu.

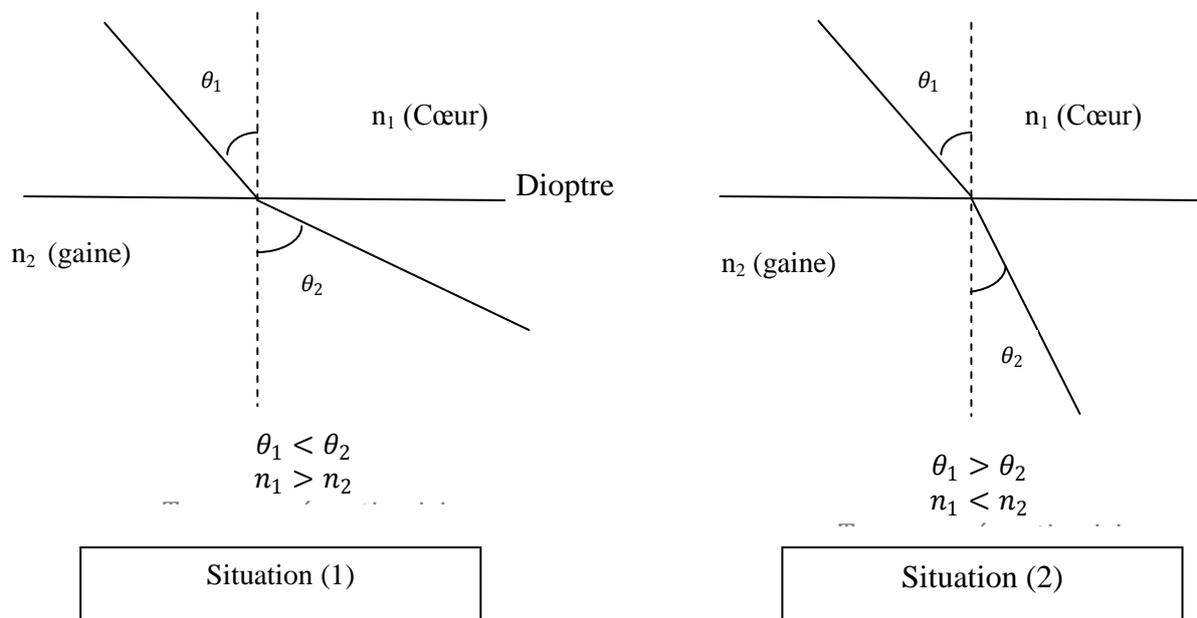


**Figure 2.2 :** Illustration montre des angles faits après la propagation d'un rayon lumineux (de milieu 1 vers milieu 2) par rapport à la normale [13]

Le principe de Fermat, appelé aussi au principe du moindre temps, énonce que la lumière se propage entre deux points en suivant la trajectoire qui minimise le temps de parcours.

### 2.1.2 Applications aux fibres optiques (Notion de l'ouverture numérique – Fibres multi mode et monomode) :

En appliquant la loi de Snell-Descartes dans la FO. On va étudier premièrement la condition de réflexion que doivent subir la lumière dans sa propagation dans la FO pour qu'elle reste confinée dans le cœur de la FO jusqu'à sa réception. Pour cela on prend deux situations suivantes dont  $n_1$  indice de réfraction du cœur de la FO,  $n_2$  indice de réfraction de la gaine de la FO.



**Figure 2.3 :** la propagation entre deux milieux différents en indice de réfraction [10]

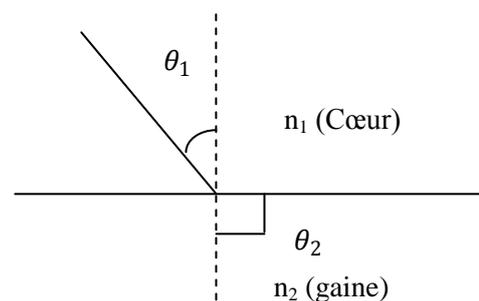
#### L'angle critique :

Dans la situation (1), il est possible d'avoir un angle d'incidence qui donnera un angle de réfraction de  $\frac{\pi}{2}$ .

Dans ce cas-là, Cet angle d'incidence portera le nom d'**angle critique**.

Donc, si l'angle  $\theta_1$  permet d'engendrer un  $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$  alors

$$\theta_1 \longrightarrow \theta_c$$

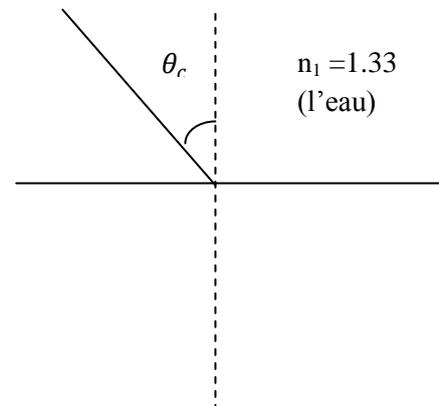


**Exemple :** On va prendre un dioptre (eau-air) pour déterminer l'angle critique (c'est juste un exemple pour comprendre la réflexion totale et on le généralise dans le cas de la FO).

En appliquant la loi de Snell-Descarte :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.3)$$



L'angle d'incidence  $\theta_1$  va prendre l'angle critique

qui donne un angle  $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$ .

Dans cet exemple, on va déterminer l'angle critique dans un dioptre (eau-air) et qui va ensuite nous permettre de comprendre la réflexion totale. Dont l'indice de réfraction de l'eau et de l'air sont respectivement :  $n_1 = 1.33$  et  $n_2 = 1$ .

Remplaçant ces deux indices dans la relation (2.3), on trouve :

$$1.33 \times \sin \theta_c = 1 \times \sin \frac{\pi}{2} \quad (2.4)$$

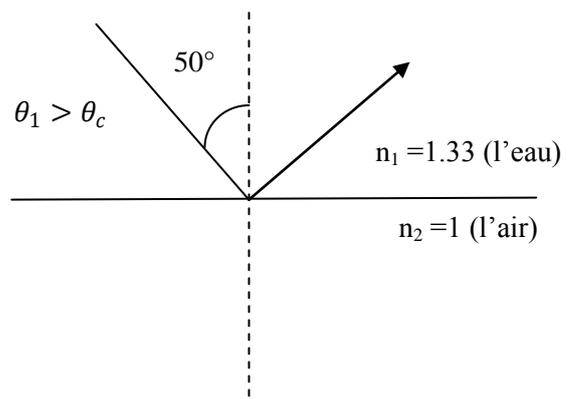
Donc,  $\theta_c = 48.75^\circ$  c'est l'angle qui introduit l'angle de réfraction  $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$ .

Si on veut généraliser la loi de Snell-Descarte pour l'angle critique dont ( $\theta_1 = \theta_c$  et  $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$ )

et on les remplace dans la formule ( $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ).

$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \frac{\pi}{2}$ , on trouve :  $\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$  [c'est l'angle qui donne la réflexion totale dont  $\theta_1 \geq \theta_c$ ].

Pour confirmation, on va analyser le cas où qu'arrive-t-il si l'angle d'incidence est  $>$  à l'angle critique ? C'est-à-dire si  $\theta_1 > \theta_c$  comme montrer dans le schéma suivant :



**Figure 2.4 :** propagation dans le cas d'angle d'incidence  $>$  à l'angle critique

Maintenant, on prend par exemple  $\theta_1 = 50^\circ > \theta_c = 48.75^\circ$  et on cherche l'angle  $\theta_2$  :

D'après la loi de Snell-Descarte :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.5)$$

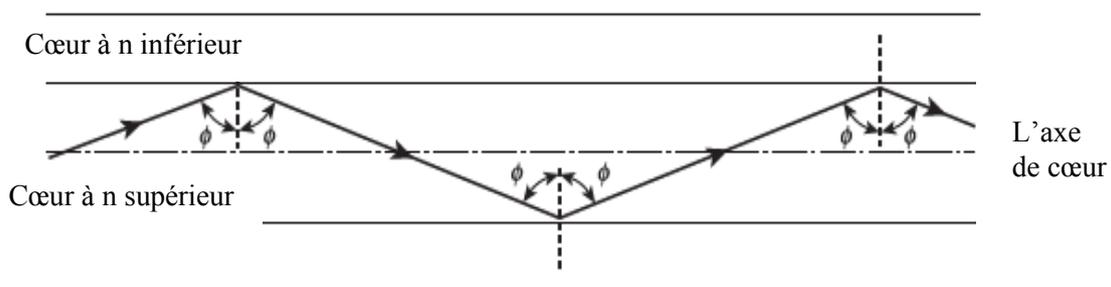
$$1.33 \times \sin 50^\circ = 1 \times \sin \theta_2 \quad (2.6)$$

$\theta_2 =$  Indéterminé, dans cette condition de l'angle d'incidence  $\theta_1$ , on a pas trouvé l'angle réfracté ce qui signifie (absence de réfraction), et il y-a que la réflexion.

*Et cette condition que doivent appliquer dans la propagation de la lumière dans la FO pour avoir une réflexion totale et interne dans le cœur de la FO.*

Et la figure suivante montre la transmission d'un rayon lumineux dans une FO par une série des réflexions interne à l'interface silice du cœur ( $n_c$ ) et silice de la gaine ( $n_g$ ) du FO dont ( $n_c < n_g$ ).

- Le rayon a un angle d'incidence  $\varphi$  à l'interface qui est  $>$  à  $\varphi_c$  et il est réfléchi par le même angle au normal.



**Figure 2.5 :** Transmission d'un signal lumineux dans une FO [3]

### Exemple d'application :

Soit un câble du FO à silice avec un cœur de diamètre suffisamment large à l'analyse théorique du rayon et possède ainsi un indice de réfraction du cœur  $n_c = 1.50$  et l'indice de réfraction de la gaine  $n_g = 1.47$ .

Déterminer :

L'angle critique du l'interface Cœur / Gaine ?

### Réponse :

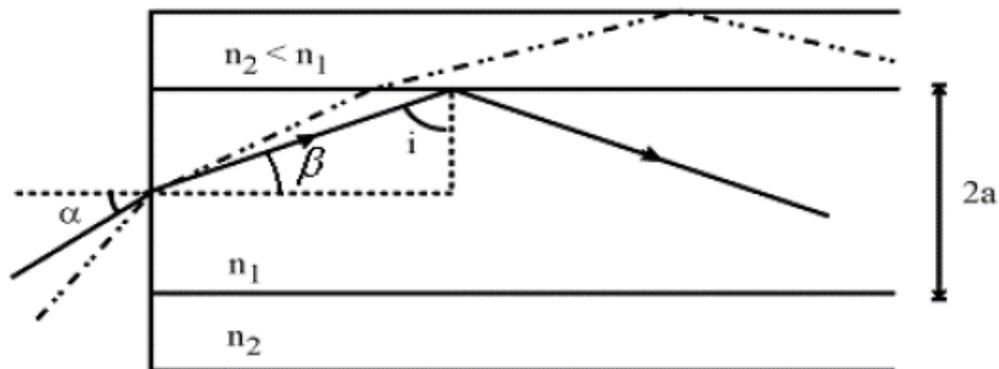
L'angle critique qui donne une réflexion totale c'est est :

$$\theta_c \geq \arcsin\left(\frac{n_g}{n_c}\right)$$

$$\theta_c \geq \arcsin\left(\frac{1.47}{1.50}\right), \text{ Alors } \theta_c \geq 78.52.$$

### 2.1.3 Angle d'acceptance

Les propriétés des fibres cylindriques à saut d'indice peuvent être analysées en bonne approximation en se limitant aux directions de propagation qui se trouvent dans un plan de symétrie de la fibre. Un tel rayon est dessiné à la figure 2.2.



**Figure 2.6 :** Propagation à travers une fibre à saut d'indice. L'angle  $\alpha$  doit être inférieur à une valeur maximale, telle que  $i$  reste supérieur à l'angle critique pour la réflexion totale (rayon en trait plein). Le trait interrompu représente un rayon de gaine, qui peut se propager sur une distance plus courte [10].

Pour que la réflexion totale se produise à l'interface entre les deux milieux, on sait qu'il faut que l'angle  $i$  soit supérieur à l'angle critique  $i_c$ . Comme on l'a vu au paragraphe précédent, cela veut donc dire :

$$\sin i > \sin i_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.7)$$

Par ailleurs, l'angle  $i$  est déterminé par l'angle d'entrée du rayon dans la fibre,  $\alpha$ . Supposons que la surface d'entrée de la fibre est perpendiculaire à son axe de symétrie. En passant du milieu extérieur d'indice de réfraction  $n_{ext}$  (généralement de l'air) dans le coeur de la fibre, l'onde est réfractée en accord avec la loi de Snell. On a

$$n_{ext} \sin \alpha = n_1 \sin \beta \quad (2.8)$$

L'exemple de la figure 2-2 montre que  $\beta$  n'est autre que  $(90^\circ - i)$ . La limite inférieure que nous avons imposée à  $i$  revient donc à fixer une limite supérieure à  $\beta$ , et donc aussi à  $\alpha$ . Cette limite se calcule facilement, en combinant les relations (2.7) et (2.8) :

$$\begin{aligned} \frac{n_{ext}}{n_1} \sin \alpha_{max} &= \sin \beta \\ &= \sin(90^\circ - i_c) \\ &= \cos i_c \\ &= \sqrt{1 - \sin^2 i_c} \\ &= \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \end{aligned}$$

L'angle d'entrée dans la fibre,  $\alpha$ , doit donc être inférieur à  $\alpha_{max}$  :

$$\alpha_{max} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_{ext}} \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}}\right), \text{ ou encore}$$

$$\alpha_{max} = \arcsin\left(\frac{1}{n_{ext}} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) \quad (2.9)$$

Cet angle maximal s'appelle l'angle d'acceptance ou l'angle d'admission de la fibre. Cet angle d'acceptance, que l'on retrouve dans de nombreux domaines en optique, est habituellement décrite par une quantité appelée l'*ouverture numérique* du système (O.N.) (en anglais, *numerical aperture, NA*), Par définition, l'ouverture numérique est donnée par :

$$O.N = n_{ext} \sin \alpha_{max} \quad (2.10)$$

(Il est particulièrement intéressant d'inclure l'indice  $n_{ext}$  dans l'ouverture numérique, car ainsi, elle constitue une caractéristique du système optique, indépendante du milieu extérieur dans lequel celui-ci est placé).

En introduisant cette définition dans la formule (2.9), on déduit immédiatement l'ouverture numérique d'une fibre optique à saut d'indice :

$$O.N = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.11)$$

L'angle d'acceptance peut alors s'exprimer en fonction de l'ouverture numérique :

$$\alpha_{max} = \arcsin \frac{O.N}{n_{ext}} \quad (2.12)$$

Dans le cas où le milieu extérieur est de l'air, on a

$$\alpha_{max} = \arcsin O.N \quad (2.13)$$

Un autre paramètre fréquemment utilisé en relation avec les fibres à saut d'indice est défini par:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (2.14)$$

L'ouverture numérique peut alors s'écrire en fonction de  $\Delta$ :

$$O.N = \sqrt{2n_1^2 \Delta} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.15)$$

Lorsque  $n_1 \cong n_2$ ,  $\Delta$  représente la différence relative d'indice:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \frac{n_1 + n_2}{2n_1} \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.16)$$

### **Remarque :**

Les fibres optiques ont une ouverture numérique qui peut varier de 0.16 à 0.66 et peut se situer même en dehors de ces limites.

- Du point de vue couplage, plus ON est grande, plus l'énergie introduite dans la fibre est importante (moins de pertes).
- Cependant, ceci peut mener à une grande dispersion de l'onde.
- Une petite ON ne permet l'injection que d'un faisceau issu d'une source de lumière très directive telle une diode laser.

### Exemple d'application :

Considérons un indice de réfraction relative pour la FO désignée à une transmission de longue distance est de 1%.

Calculer l'ON et l'angle d'acceptance dans l'air pour la fibre si  $n_c = 1.46$  ?

Calculer aussi l'angle critique à l'interface cœur / gaine ?

### Réponse :

a) Suite la formule (2.15) on peut déterminer le paramètre de l'ON dont :

$$ON = n_c \sqrt{2 \Delta}$$

$$\text{Et } ON = 1.46 \times \sqrt{2 \times 0.01} = 0.20$$

b) d'après la formule (2.12), on détermine l'angle d'acceptance :

$$\alpha_{max} = \arcsin \frac{ON}{n_{ext}} ; \text{ à notre cas : } n_{ext} = 1$$

$$\text{Dont : } \alpha_{max} = \arcsin(0.20) = 11.53$$

Pour l'angle critique, on a :

$$\frac{n_{ext}}{n_c} \sin \alpha_{max} = \cos i_c ; \text{ Si } n_{ext} = 1 :$$

$$i_c = \arccos \left( \frac{1}{n_c} \sin \alpha_{max} \right) = 82.12$$

### 2.1.4 Différents types de fibres optiques

Suivant les dimensions du cœur et les valeurs des indices  $n_1$  et  $n_2$ , on peut classer les fibres en deux catégories :

$$\text{Soit : } \alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Où  $\lambda$  : représente la longueur d'onde de la lumière utilisée.

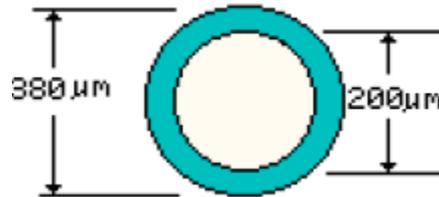
**A) Pour  $\alpha < 2.4$  :** La fibre ne comporte qu'un mode de propagation, elle est appelée **fibre monomode**.



**Figure 2.7 :** les dimensions cœur/gaine d'une FO monomode [10]

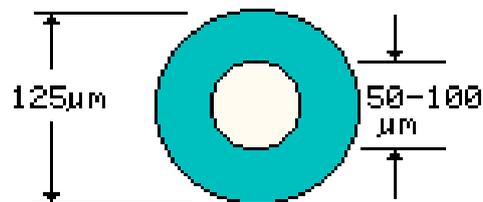
B) Pour  $\alpha \gg 2.4$  : La fibre est appelée multimode et se divise en deux sous-catégories

- **Fibre multi mode à saut d'indice**



**Figure 2.8** : les dimensions cœur/gaine d'une FO multi mode à saut d'indice [10]

- **Fibre multi mode à gradient d'indice**



**Figure 2.9** : les dimensions cœur/gaine d'une FO multi mode à gradient d'indice [10]

#### 2.1.4.1 Fibre optique multi mode à saut d'indice :

C'est un guide d'onde dont le diamètre du cœur (quelques centaines de  $\mu\text{m}$ ) est grand devant la longueur d'onde.

L'indice de réfraction constant varie brusquement (saut) quand on passe du cœur à la gaine.

Le guidage de la lumière se fait suivant des lignes brisées.

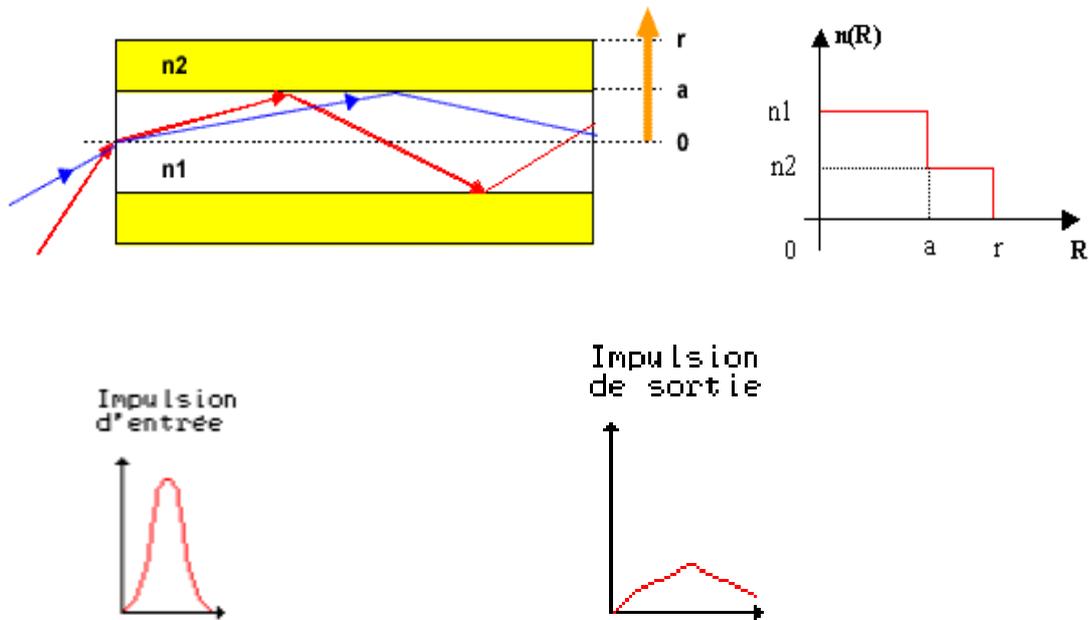


Figure 2.10 : illustration de la propagation multi mode [10]

#### 2.1.4.2 Fibre optique multi mode à gradient d'indice

Le cœur possède un indice de réfraction qui décroît progressivement du centre à la périphérie suivant un profil parabolique. Le faisceau lumineux suit une trajectoire d'allure curviligne.

Le faisceau lumineux change de direction moins brusquement lors du rebond ce qui diminue les pertes.

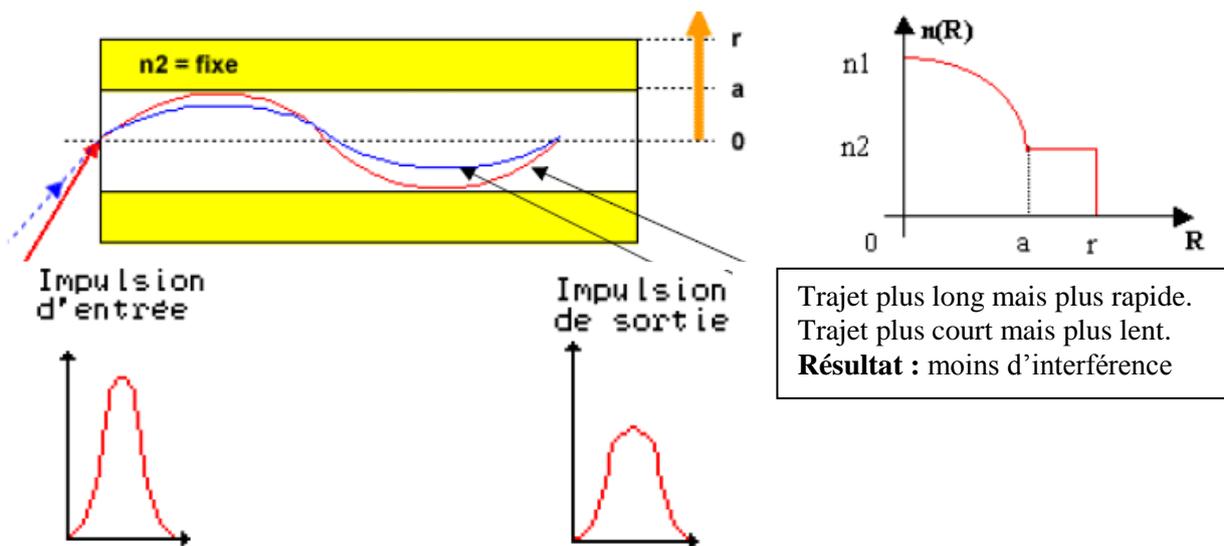


Figure 2.11 : illustration de la propagation dans une FO à gradient d'indice [10]

De plus, les différents modes ont des temps de propagation très proches. Le phénomène de dispersion modale est de ce fait considérablement réduit.

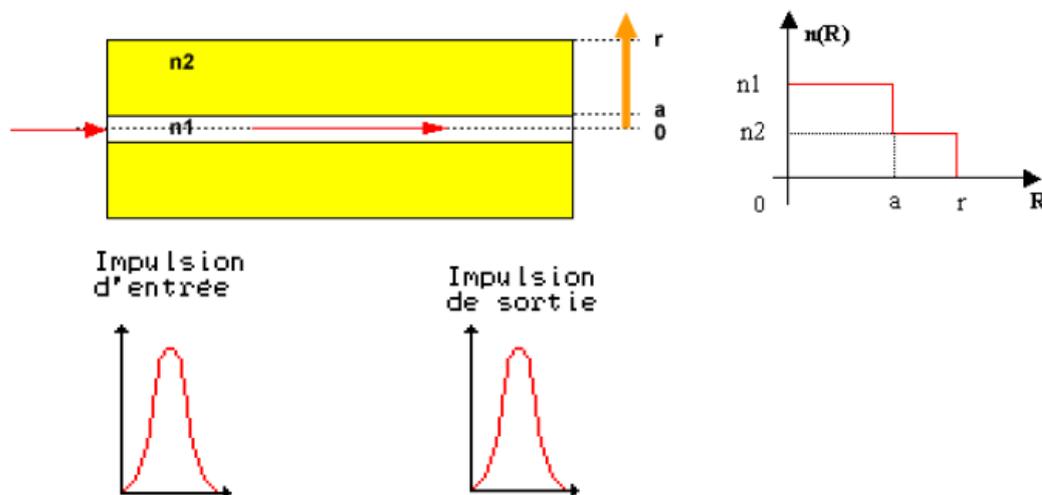
**Remarque :**

- La fibre optique à gradient d'indice permet de réduire les pertes qui peuvent survenir par pénétration des rayons dans la région de gaine.

- Le gradient d'indice modifie aussi la vitesse de propagation ; Les faisceaux les plus éloignés de l'axe de la fibre sont les plus rapides. Il en résulte une égalisation des chemins optiques.

**2.1.4.3 Fibre optique monomode**

Le diamètre du cœur est inférieur à  $10 \mu\text{m}$  de telle sorte que le parcours de la lumière devient presque longitudinal. Le diamètre de la gaine est compris entre  $50 \mu\text{m}$  et  $125 \mu\text{m}$ . Ce type de fibre nécessite une source de lumière quasiment monochromatique. (diode Laser)



**Figure 2.12** : illustration de la propagation dans une FO monomode [10]

**Remarque :**

- Ne laissant passer que le mode longitudinal, la dispersion modale est nulle.
- Une fibre optique peut être monomode pour une  $\lambda$  et multimodale pour une autre.
- La fibre monomode est utilisée pour les liaisons à débits importants, pour les longues distances ou pour les réseaux nécessitant peu de points de raccordement.
- Voici quelques comparaisons des deux types de fibres optiques :

<b>Fibre monomode</b>	<b>Fibre multi mode</b>
ON faible (connxion délicate)	ON forte (connxion facile)
Très faible atténuation	Faible atténuation
Faible dispersion	Forte dispersion
Haut débit et longue distance	Réseau locaux

**Tableau 2.1** : Comparaison entre la FO monomode et la FO multi mode [22]

**2.2 Approche ondulatoire** : Equations de Maxwell (Modes d'une fibre à saut d'indice, Comparaison entre fibres monomodes et multi modes).

### 2.2.1 Les modes dans des FO cylindriques

Les solutions des équations de Maxwell pour un guide d'onde cylindrique homogène ayant un cœur en diélectrique introduit des résultats complexes. Et cette présentation mathématique est en dehors de notre objectif de ce cours.

Considérons dans la suite, les résultats du champ modal résultant dans un guide d'onde planaire. Dont Les modes TE ( $E_z = 0$ ) et les modes TM ( $H_z = 0$ ). Cependant le guide d'onde cylindrique est délimité en 02 dimensions au lieu qu'un 1. Donc 2 entiers  $l$  et  $m$  sont nécessaires en ordre de spécifier les modes définis par les modes  $TE_{lm}$  et  $TM_{lm}$ .

Pour les structures faiblement guidés  $\Delta \ll 0.03$  (3%) avec une propagation dominante sur la longueur de la FO.

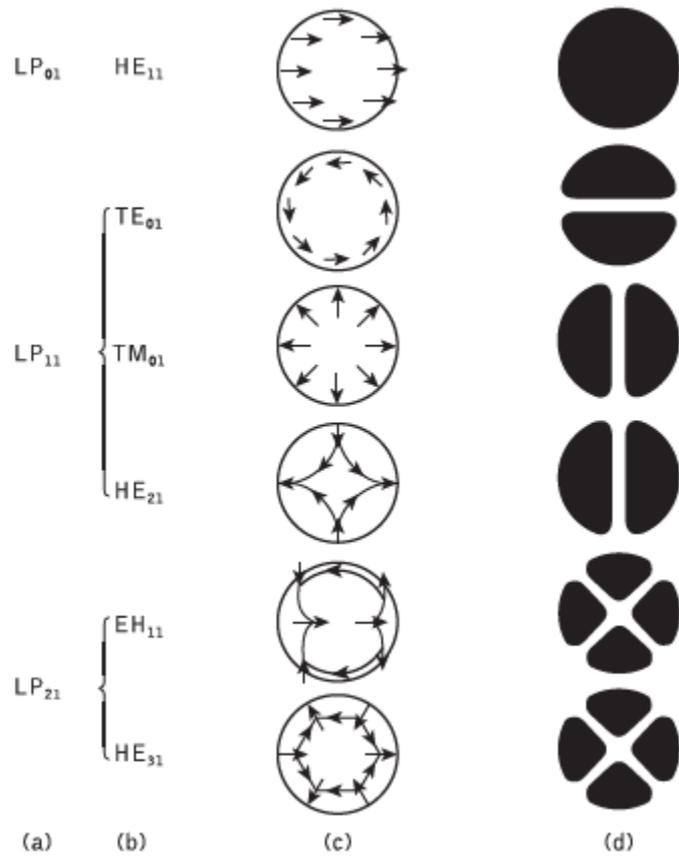
La théorie des modes donne les composantes du champ transverse dominant. Par conséquent, les solutions approximatives pour le groupe HE, EH, TE et TM peuvent être données par deux composantes polarisés linéairement (LP). Ces modes LP ne sont pas des modes exactes de la FO sauf que pour le mode fondamental.

La relation entre les modes de désignation HE, EH, TE et TM et le mode  $LP_{lm}$  est montrée dans le tableau ci-dessous. Les indices du mode LP ( $l$  et  $m$ ) sont liés au profil de l'intensité du champ électrique pour un mode particulier (**Voir figure 2.13**). En générale, il y a un champ maximum autour de la périphérie du cœur de la FO et  $m$  un champ maximum sur le long du rayon de vecteur.

Les modes polarisés linéairement

Les modes exactes correspondant

$LP_{01}$	$HE_{11}$
$LP_{11}$	$HE_{21}, TE_{01}, TM_{01}$
$LP_{21}$	$HE_{31}, EH_{11}$
$LP_{02}$	$HE_{12}$
$LP_{31}$	$HE_{41}, EH_{21}$
$LP_{12}$	$HE_{22}, TE_{02}, TM_{02}$
$LP_{lm}$	$HE_{2m}, TE_{0m}, TM_{0m}$



**Figure 2.13:** les configurations d'un champ électrique pour les trois modes LP inférieur en termes de leurs modes exactes constitutifs [3].

- (a) les désignations du mode LP ;
- (b) les désignations du mode exacte ;
- (c) la distribution du champ électrique des modes exactes ;
- (d) la distribution de l'intensité du champ  $E_x$  pour les modes exactes indiquant le profil de l'intensité du champ électrique pour les modes LP correspondant.

La fréquence normalisée pour une propagation dans une FO est donnée par :

$$v = ka\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (2.17)$$

$K$  : C'est la constante de propagation.

$a$  : C'est le rayon du cœur de la FO.

En utilisant l'équation ( $ON = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  et  $= n_1\sqrt{2\Delta}$ ), la fréquence normalisée peuvent être exprimée en terme de l'ON et l'indice de réfraction relative, comme suivant:

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} a(ON) \quad (2.18)$$

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} an_1\sqrt{2\Delta} \quad (2.19)$$

La fréquence normalisée est un paramètre sans unité et parfois appelée le nombre  $v$  ou la valeur de la FO.

Cette fréquence combine 03 paramètres sur la FO qui sont :

Le rayon du cœur de la FO, l'indice de réfraction relative et la longueur d'onde d'émission.

### Exemple d'application :

Considérons une fibre optique multi mode à saut d'indice avec un diamètre du cœur  $80\mu m$  et un indice de différence relative est 1.5%.

À une longueur d'onde d'émission  $0.85\mu m$  ; et si l'indice de réfraction du cœur est 1.48.

Estimer la fréquence de la normalisation pour cette fibre ?

### Réponse :

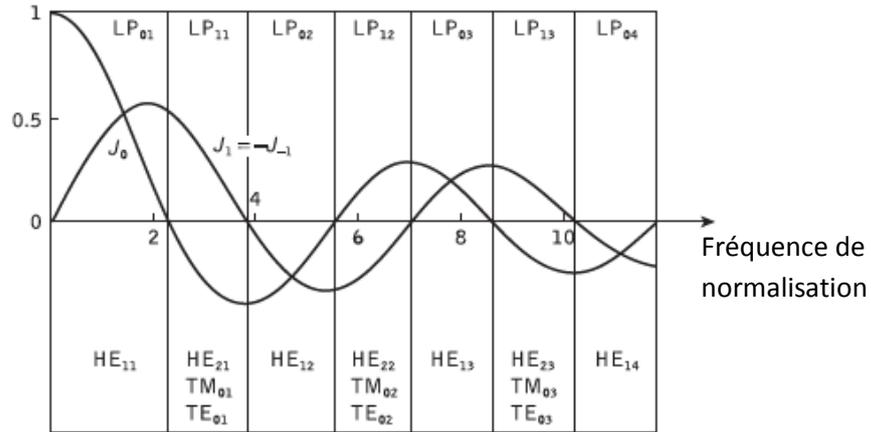
Par la formule (2.19), on peut déterminer la fréquence de normalisation :

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} an_1\sqrt{2\Delta}$$

Donc :

$$v = \frac{2 \times 3.14}{0.85} \times 0.40 \times 1.48\sqrt{2 \times 0.15} = 2.39$$

La figure suivante montre les modes transmis en FO à saut d'indice en fonction de sa fréquence de normalisation.



**Figure 2.14:** Les régions permises pour les modes LP de l'ordre  $l = 0, 1$  en fonction de la fréquence normalisée ( $v$ ) pour un guide d'onde optique circulaire à saut d'indice [3].

On va voir dans les paragraphes suivants le nombre des modes propagés dans les différents types de la FO :

#### A) pour une FO à saut d'indice

Soit une FO monomode (diamètre du cœur varie entre 2 à 10  $\mu m$ ).

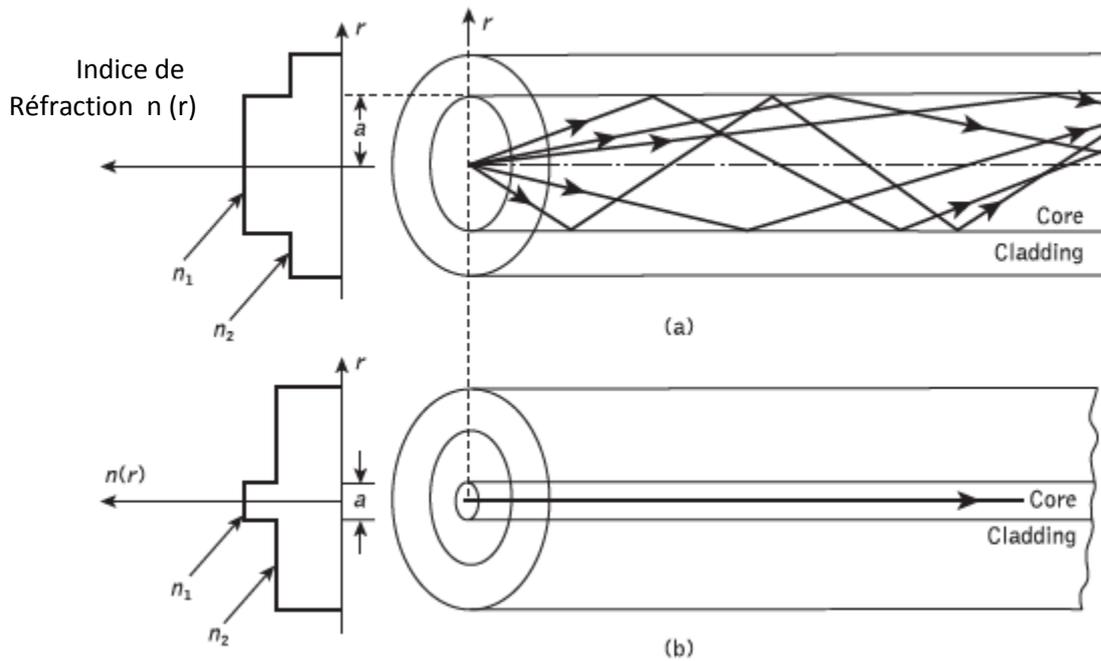
Ou une FO multi mode (diamètre du cœur varie entre 50  $\mu m$  et plus).

Dans cette FO, le nombre totale des modes guidés ou le volume du mode  $M_s$  est dépend du  $V$  de la FO montrer dans la relation suivante :

$$M_s \approx \frac{V^2}{2} \quad (2.20)$$

L'expression de l'indice pour ce type de FO prend l'équation suivante :

$$\begin{aligned} n_r &= n_1 & r < a & \text{Cœur} \\ &= n_2 & r \geq a & \text{la gaine} \end{aligned}$$



**Figure 2.15:** le profil d'un indice de réfraction et la transmission du rayon dans des FO à saut d'indice : (a) : une FO multi mode à saut d'indice ; (b) : une FO mono mode à saut d'indice [3]

### B) Pour une FO à gradient d'indice

Cette FO ne possède pas un indice de réfraction constant dans le cœur. Mais il se diminue avec une distance radiale  $n(r)$ . De la valeur maximale de  $n_1$  à l'axe de la FO à une valeur constante  $n_2$  autour du rayon  $a$  du cœur vers la gaine.

Cet indice est exprimé par l'équation suivante :

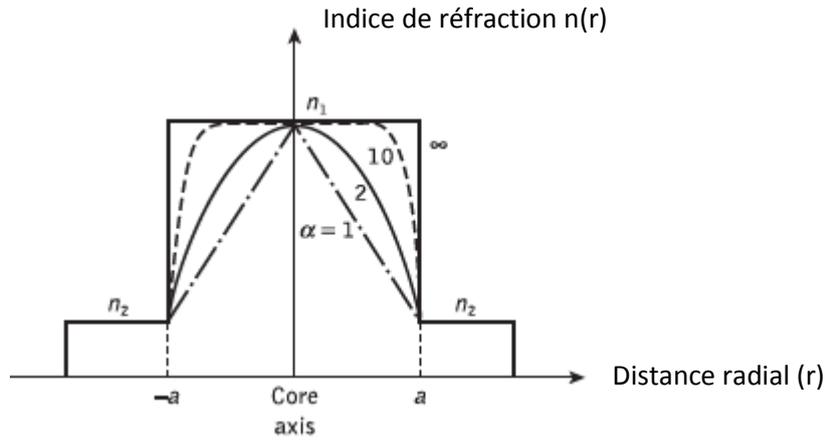
$$n_r = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} \end{cases} \quad (2.21)$$

$\alpha$ : Est un paramètre donne le profil de l'indice de réfraction du cœur de la FO.

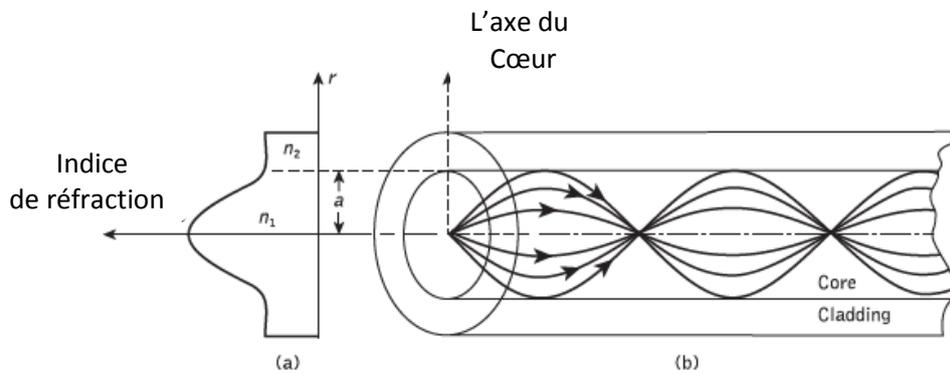
Dont  $\alpha = \infty$  donne le profil d'une FO à saut d'indice.

$\alpha = 1$  donne un profil triangulaire.

Et  $\alpha = 2$  donne un profil parabolique de la FO celui qui produit des bons résultats en terme de transmission.



**Figure 2.16** : les différents profils possible d'une FO dans les différents valeurs du  $\alpha$  (Donnés dans l'équation ci-dessus) [3]



**Figure 2.17**: le profil d'un indice de réfraction et la transmission des rayons dans une FO à gradient d'indice [3]

**Le nombre total des modes dans une FO à gradient d'indice**

$$M_g = \left( \frac{\alpha}{\alpha + 2} \right) (n_1 k a)^2 \Delta \quad (2.22)$$

En utilisant l'équation  $\left( v = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta} \right)$ , et la fréquence normalisée  $v$  de la FO quand  $\Delta \ll 1$  est approximativement donnée par :

$$v = n_1 k a \sqrt{2\Delta} \quad (2.23)$$

et  $\Delta = \frac{v^2}{2(n_1 k a)^2}$

En remplaçant (2.23) dans l'équation (2.22) on trouve

$$M_g = \left( \frac{\alpha}{\alpha + 2} \right) \left( \frac{v^2}{2} \right) \quad (2.24)$$

Par conséquent, pour un profil d'indice de réfraction parabolique ( $\alpha = 2$ ),

$$M_g = \frac{v^2}{4} \quad (2.25)$$

### Exemple d'application :

A) Soit une fibre optique à gradient d'indice a un cœur de diamètre  $50\mu m$  possède un profil d'indice de réfraction parabolique, cette FO a une ouverture numérique égale 0.2.

Estimer le nombre totale des modes guidés qui propageant dans ce FO à  $\lambda = 1\mu m$  ?

### Réponse :

A) afin d'estimer le nombre totale des modes (V), on doit déterminer premièrement la fréquence de la normalisation :

Suite la formule (2.18), on a :

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} a(\text{ON}) = \frac{2 \times 3.14}{1} \times 0.25 \times (0.2) = 31.4$$

Pour le nombre de mode, on applique la relation (2.25) car ( $\alpha = 2$ ) suite notre exemple :

$$M_g = \frac{v^2}{4} = \frac{(31.4)^2}{4} = 246 \text{ modes}$$

### Le nombre des modes pour une FO monomode

Dans une FO monomode, uniquement le mode fondamentale  $LP_{01}$  qui se propage dans le cœur de la FO.

Par conséquent, la limitation à un seul mode dépend la limite inférieure de la propagation guidée pour le mode  $LP_{11}$ . La fréquence de coupure normalisée pour le mode  $LP_{11}$  dans les FO à saut d'indice s'apparaitre à  $v_c = 2.405$  (fréquence de coupure).

Donc, la propagation d'un seul mode  $LP_{01}$  dans les FO à saut d'indice est possible dans la bande de fréquence suivante :

$$0 < v < 2.045 \quad (2.26)$$

Comme il n'y a pas une fréquence de coupure pour le mode fondamental.

Il apparait que la fréquence de normalisation pour la FO pourra être ajustée dans la bande de l'équation (2.26). Et cela est possible par la réduction du rayon du cœur. Et à ce cas-là, la différence relative des indices de réfraction est inférieure à 1%.

## 2.3 Les principales causes de l'atténuation dans les FO :

**L'absorption** : interaction lumière matière, le photon cède son énergie au matériau, et l'énergie du photon incident (absorbée) est utilisée pour amener la structure moléculaire dans un certain état vibratoire. Pour la silice, il y a deux absorptions, dans l'infrarouge moyen à cause des vibrations moléculaires, et dans l'ultraviolet à cause des transitions électroniques et moléculaires.

**La diffusion rayleigh** : causée par la nature désordonnée des molécules dans le verre. Elle est proportionnelle à  $\frac{1}{\lambda^4}$ , ce phénomène provoque une augmentation de l'atténuation aux basses longueurs d'onde.

**L'absorption intrinsèque** : sous forme de pics, principalement due aux ions, elle est difficile à éliminer, il faut éviter le contact de la fibre avec l'eau.

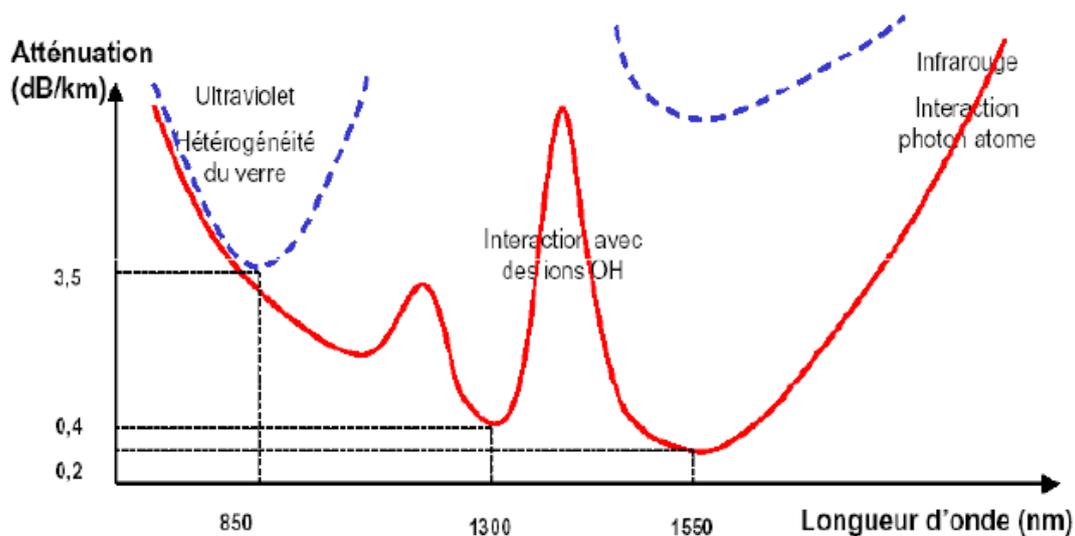
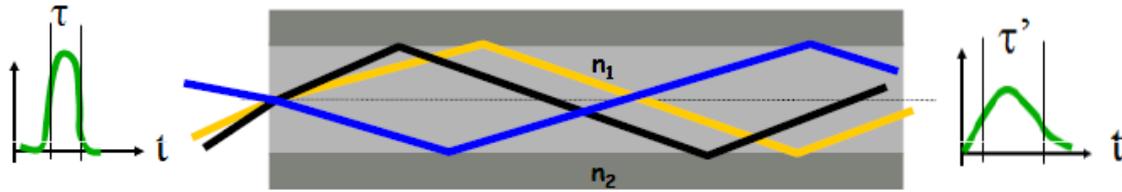


Figure 2.18 : Atténuation dans les fibres optiques [9]

## 2.4 Autres limitations des fibres optiques :

### 2.4.1 La dispersion :

La dispersion se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation.



**Figure 2.19** : Illustration du phénomène de la dispersion [9]

Dans une fibre optique multimodes, les différents modes ne se propagent pas à la même vitesse.

### 2.4.2 La dispersion modale :

Dans une fibre multimode, la lumière peut se propager suivant différentes directions, correspondant à des modes différents. La distance parcourue entre les extrémités de la fibre dépend évidemment de la direction de propagation. Ainsi, pour une fibre de longueur  $L$ , un mode qui se propagerait parallèlement à l'axe de la fibre doit parcourir une distance  $L$ , tandis qu'un mode correspondant à un angle  $i$  doit parcourir une distance  $L / \sin i$ .

Dans une fibre multimode, les angles de propagation permettent sa définition par le cône d'acceptance; ils sont compris entre  $i_c$  et  $90^\circ$ . La différence de temps de propagation entre les directions extrêmes vaut donc

$$\Delta\tau_{\text{mod}} = \frac{L/\sin i_c}{c/n_1} - \frac{L}{c/n_1} \quad (2.27)$$

En remplaçant  $i_c$  par sa valeur tirée par la loi de la réflexion totale, on obtient :

$$\Delta\tau_{\text{mod}} = \frac{Ln_1}{cn_2} - \frac{Ln_1}{c} = \frac{Ln_1}{cn_2} (n_1 - n_2) \quad (2.28)$$

Dans le cas habituel où  $n_1 \cong n_2$ , cette relation peut être écrite sous la forme :

$$\Delta\tau_{\text{mod}} \cong \frac{n_1 \Delta}{c} L = \frac{(O.N)^2}{2cn_1} L \quad (2.29)$$

Une impulsion monochromatique extrêmement courte à l'entrée d'une fibre multimode aura donc une longueur de l'ordre de  $\Delta\tau_{\text{mod}}$  à la sortie.

Désignons par  $B$  la fréquence maximale des impulsions. Pour que les impulsions puissent être distinguées à la sortie de la fibre, on exige généralement que l'élargissement soit inférieur à la séparation entre les impulsions :

$$\Delta\tau_{\text{mod}} < \frac{1}{B} \quad (2.30)$$

$$\text{Soit } BL < \frac{n_2}{n_1} \frac{c}{(n_1 - n_2)}$$

Le produit de la fréquence maximale par la longueur est donc une caractéristique de la fibre. Il est appelé bande passante de la fibre et est exprimé en MHz.km ou GHz.km.

### Exemple.

Prenons le cas  $n_1 = 1.48$  et  $n_2 = 1.46$  La formule (2.28) donne immédiatement

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\tau_{\text{mod}}}{L} &= \frac{0.02}{3 \times 10^8} \frac{1.48}{1.46} \left(\frac{\text{s}}{\text{m}}\right) \\ &= 6.76 \times 10^{-11} \text{ s/m} \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\text{Soit } \Delta\tau_{\text{mod}} = 68 \text{ ns/km}$$

$$\begin{aligned} BL &< \frac{1.46}{1.48} \frac{3 \times 10^8}{0.02} \cong 1.5 \times 10^{10} \text{ Hz. m} \\ &= 15 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (2.32)$$

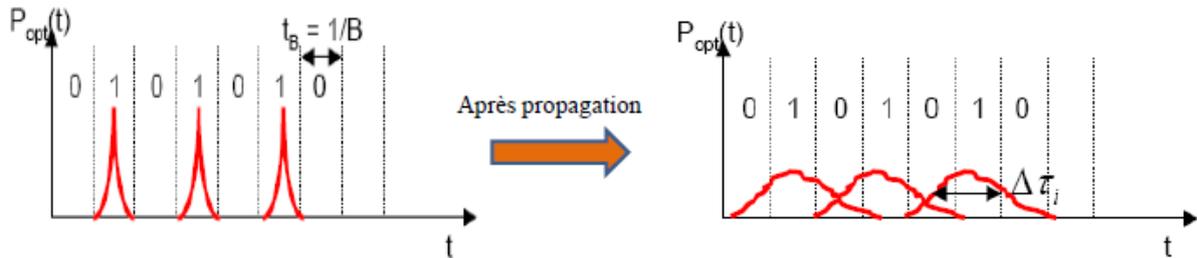
Ce calcul simple a montré que l'élargissement par dispersion modale augmente proportionnellement à la longueur de la fibre. Expérimentalement, on observe cette variation linéaire pour des distances courtes, de l'ordre du km, tandis qu'on constate une augmentation proportionnelle à  $L$  pour des fibres plus longues. Cela provient du fait que l'élargissement réel est dû au délai moyen sur tous les modes, alors que nous venons de calculer le délai maximal entre les modes extrêmes. De plus, sur des distances plus grandes, la lumière peut se propager dans un mode sur une certaine distance et passer ensuite dans un autre mode suite à la réflexion sur un défaut par exemple. Ce phénomène, appelé couplage de modes, réduit la dispersion par rapport à la valeur maximale calculée ci-dessus.

**Remarque :**

**Limitation du débit dans une liaison numérique :** à cause de la modale

Interférences inter symboles  $\Delta\tau_i < t_B$

Débit numérique maximum  $B < \frac{1}{\Delta\tau_i}$



**Figure 2.20 :** l'élargissement des impulsions résulté par la dispersion modale [9]

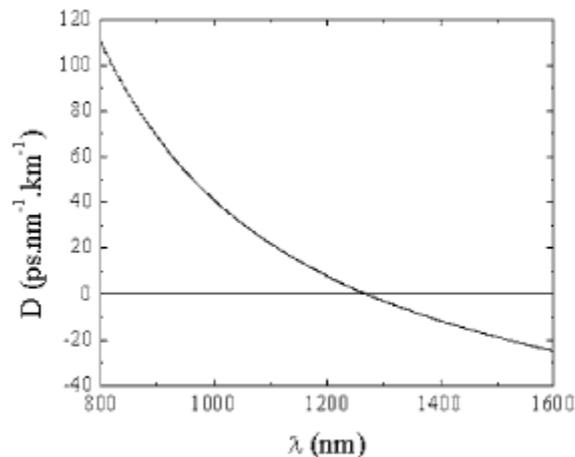
### 2.4.3 La dispersion chromatique :

La vitesse de propagation moyenne d'une impulsion est égale à la vitesse de groupe du mode fondamental. Le problème vient de ce que le temps de propagation de groupe varie avec la longueur d'onde. Or les sources de rayonnement lumineux ne sont pas rigoureusement monochromatiques.

Il y a deux causes à prendre en compte :

- \* l'indice qui varie en fonction de la longueur d'onde (**dispersion matériau**);
- \* La vitesse de groupe qui varie avec la longueur d'onde (**dispersion guide d'onde**)

L'élargissement par dispersion chromatique du matériau dépend donc de la largeur spectrale de la source et du paramètre  $D = -\frac{\lambda_0}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2}$  du cœur, appelé paramètre de dispersion du cœur. D dépend des caractéristiques physiques du cœur et de la longueur d'onde.



**Figure 2.21:** Paramètre de dispersion de la silice en fonction de la longueur d'onde [9].

La figure 2-21 montre le paramètre de dispersion de la silice en fonction de la longueur d'onde. Les valeurs sont généralement données en ps.nm<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>, ce qui correspond à des longueurs de fibre données en km et des largeurs spectrales en nm. On note l'existence d'une région de dispersion chromatique négligeable, autour de 1,27 μm.

**Exemple.** Calculer l'élargissement dû à la dispersion chromatique dans une fibre en silice, pour les sources suivantes :

Diode électroluminescente (LED),  $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_0 = 50 \text{ nm}$

Diode électroluminescente,  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_0 = 50 \text{ nm}$

Diode laser,  $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_0 = 2 \text{ nm}$

Diode laser,  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_0 = 2 \text{ nm}$

D'après la figure 2-21, D vaut 87 ps.nm<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup> à 850 nm et – 22 ps.nm<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup> à 1550 nm. On obtient donc les élargissements suivants :

	850 nm	1550 nm
LED	4.4 ns / km	1.1 ns / km
Laser	174 ps/km	44 ps / km

A titre d'exemple, la valeur de 44 ps/km correspond à une bande passante  $BL = 23 \text{ GHz.km}$ .

**Remarque :**

Le débit dans une liaison haut débit d'après ce que nous prenons en considération fait l'effet de la dispersion chromatique est :

$$B < \frac{1}{L |D| \Delta\lambda} \quad (2.33)$$

Alors le débit maximum est inversement proportionnel à :

- \* La longueur de fibre : L
- \* La dispersion de la fibre : D
- \* La largeur spectrale du signal :  $\Delta\lambda$

## **Chapitre.3 : Emetteurs / Récepteurs Electro-optique**

### **3.1 Diodes LED**

Un système à communication optique qui nécessite un taux binaire  $< \text{à } 100\text{-}200 \text{ Mbits/sec}$  est transmis par une FO multi mode. Dont la puissance nécessaire est de l'ordre de quelques microwatts. Il nécessite comme source lumineuse une diode LED.

#### **3.1.1 Les caractéristiques demandées de cette source (LED) : sont**

- *Une grande radiation (mesurer en micro watts) : C'est la radiation qui fait dans un certain angle/ unité de surface appelée (la surface d'émission).*
- *Temps de réponse rapide : C'est le retard en temps entre l'application du courant et l'émission optique du LED.*
- *Une grande efficacité quantique : c'est le rapport entre les photons générés et le nombre des recombinaisons (électron-trous) c'est-à-dire la fraction des électrons injectés recombinaison avec trous de façon radiative.*

*Atteindre une grande radiation et une grande efficacité quantique :*

La structure du LED doit fournir le moyen de confinement des porteurs de charge et l'émission stimulée dans la région active d'une jonction PN dont la recombinaison par radiation avoir lieu.

*Le confinement des porteurs est utilisé pour atteindre un grand niveau de recombinaison radiative dans la région active du composant, dont il résulte une grande efficacité quantique. Le confinement optique est important pour empêcher l'absorption de l'émission radiative par le matériau entourant de la jonction PN.*

**Mais d'autres paramètres affectent la performance du composant LED sont :**

- L'absorption dans la région active (auto-absorption).
- La recombinaison des porteurs dans les interfaces de l'hétéro structure.
- La concentration de dopage dans la couche active, la densité des porteurs injectés.
- L'épaisseur de la couche active.

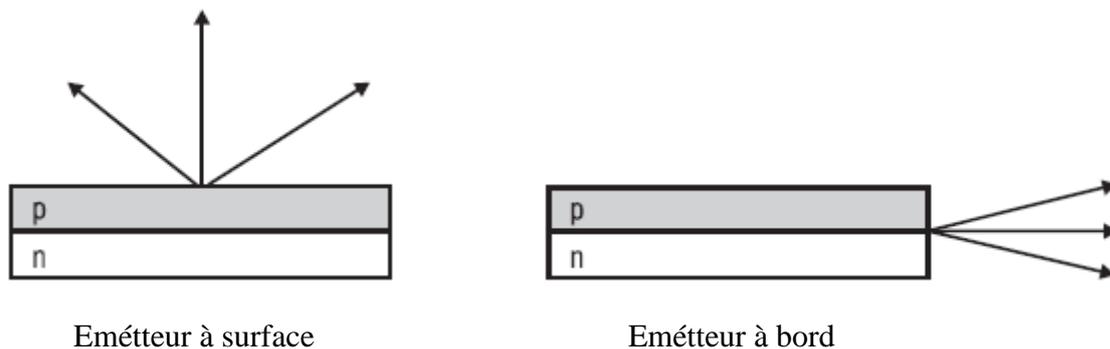
**02 configurations de base du composant de la LED sont utilisés dans la transmission optique sont :**

- Emetteurs à surface.
- Emetteurs à bord.

- Dans l'émetteur à surface : la région active de l'émission optique est perpendiculaire à la FO.

La région active circulaire dans l'émetteur à surface a un diamètre de  $50\mu m$  et jusqu'à  $2.5\mu m$  d'épaisseur. Et le champ d'émission est isotrope avec  $120^\circ$  en  $\frac{1}{2} p_{out}$ .

Dans ce champ d'émission, la source a une émission équiprobable quand être vu par n'importe quelle direction. Et la puissance se diminue par  $\cos \theta$  ou  $\theta$  : c'est l'angle entre la direction de vue et la normale du surface. Alors, la puissance se baisse à 50% de son pic quand  $\theta = 60^\circ$ .



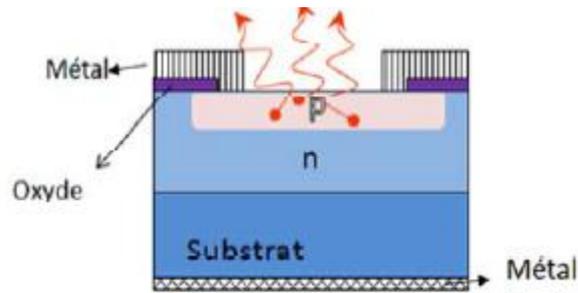
**Figure 3.1 : diodes à émetteur de surface par rapport à émetteur de bord [6]**

### 3.1.2 Structure de base et fonctionnement :

La diode électroluminescente « **LED** : Light emitting diode » (ou « DEL » en français) est une diode à jonction PN réalisée sur un matériau semi-conducteur, fortement dopé, à recombinaisons radiatives. Une structure type de la diode électroluminescente est illustrée sur la figure 3.2. La LED émet un rayonnement incohérent issu d'émissions spontanées de photons.

Son diagramme de rayonnement est généralement contrôlé par une optique ajoutée à la diode. La figure 3.3 suivante représente une diode Electroluminescente usuelle encapsulée dans un

matériau plastique transparent qui joue le rôle de lentille et détermine l'angle d'émission lumineuse.



**Figure 3.2 :** Structure de base d'une diode électroluminescente " DEL " [11]



**Figure 3.3:** Diode Electroluminescente usuelle encapsulée [11]

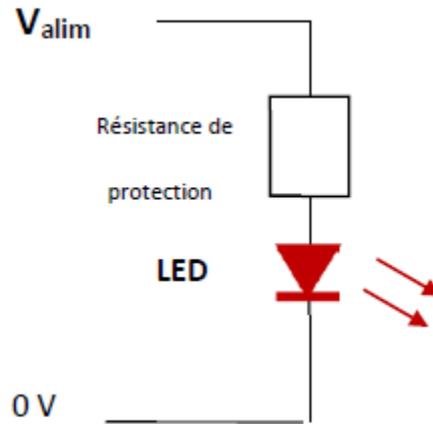
La diode électroluminescente fonctionne sous polarisation directe. Lorsque la tension d'alimentation est assez importante, la LED doit être protégée par une résistance pour limiter le courant qui la traverse à des valeurs inférieures à l'intensité maximale de courant tolérée.

Ainsi, l'alimentation de la LED se fait plutôt en courant qu'en tension, et ceci à travers la résistance, présente dans le circuit (figure 3.4), qui permet de fixer ou limiter la valeur du courant ainsi que celle de la puissance lumineuse émise.

Le courant qui travers la jonction est donné par l'expression :

$$I = I_s \left( e^{eV_d/kT} - 1 \right) \quad (3.1)$$

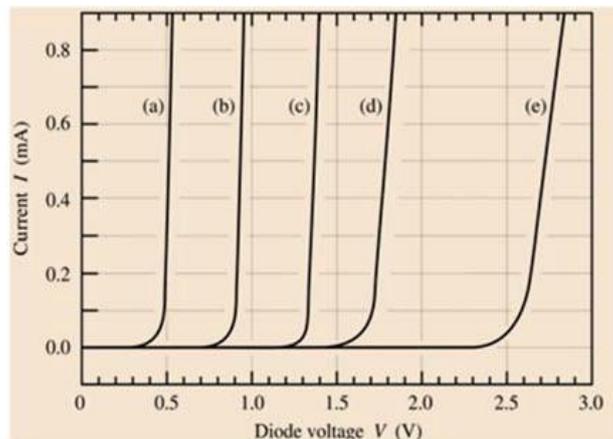
Avec  $I_s$ , le courant de saturation de la diode,  $K$  ; la constante de Boltzmann,  $T$  ; la température et  $V_d$ ; la tension aux bornes de la diode.



**Figure 3.4 :** Circuit de polarisation de la LED [11]

La caractéristique I-V de la LED, illustrée sur la figure 3.5, est semblable à celle d'une diode au silicium avec une tension de seuil  $V_{th}$  assez élevée, puisqu'en relation directe avec

l'énergie du photon émis  $V_{th} \approx hv/e \approx \frac{E_g}{e}$



**Figure 3.5:** Caractéristique I(V) de la diode à base de : (a) Ge, (b) Si, (c) GaAs, (d) GaAsP, (e) GaInN [11]

\* La tension directe appliquée à la LED doit être supérieure à  $V_{th}$ , elle :

- Est de l'ordre de 1,1 V pour les diodes à émission dans l'infrarouge
- Varie de 1,8 V à 2,5 V pour les LED à émission dans le rouge, le jaune et le vert
- Supérieur à 3,5 V pour l'émission dans le bleu et le violet.

\* Le courant nominal d'une diode électroluminescente est de l'ordre de 10 à 50 mA, pour les LED usuelles, suivant la couleur de la radiation.

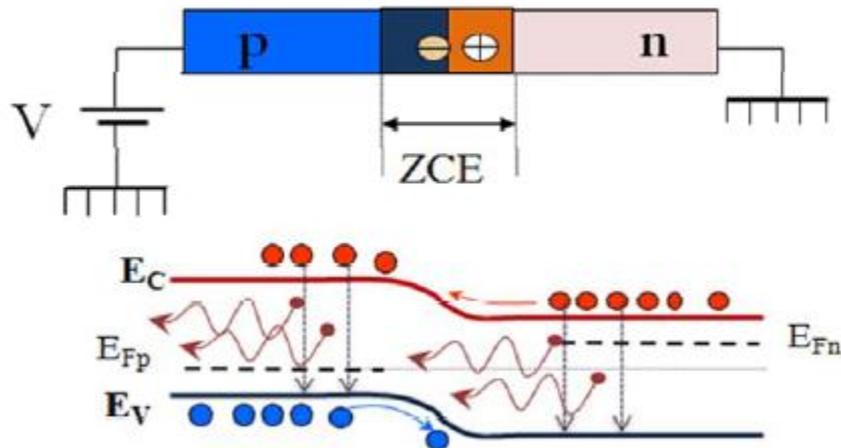
- En polarisation inverse, la LED est plus fragile qu'une diode classique. Elle tolère des tensions inverses de l'ordre de 4 à 5 V.

### Exemple :

Pour un courant nominal de 20 mA et une tension de seuil de 1.7 V, si la LED, à émission dans le rouge, est alimentée par une tension de 9 V, il lui faut une résistance de protection de :

$$R = \frac{V_{alim} - V_d}{I_d} = \frac{9 - 1.7}{0.02} = 365 \Omega$$

Lorsque la DEL est polarisée dans le sens direct (figure 3.6), sous l'effet de la tension appliquée, les électrons (de plus grande mobilité) de la région n sont injectés vers la région p où ils sont minoritaires et se recombinent avec les trous dans une région au voisinage de la jonction, limitée par leur longueur de diffusion, appelée zone active. Ils donnent ainsi lieu à un faisceau lumineux incohérent, de couleur, donc de longueur d'onde, conditionnée par la composition et l'état du matériau de type p dans lequel se produit l'essentiel des recombinaisons. La lumière émise peut ainsi être du domaine de radiations proche infrarouges, visibles ou ultraviolettes.



**Figure 3.6 :** La LED sous polarisation directe ; structure et diagramme d'énergie [11].

### 3.1.3 Le spectre d'émission de la LED :

La lumière émise d'une LED étant principalement due à des recombinaisons spontanées, sa caractéristique spectrale (intensité émise – longueur d'onde), illustrée sur la figure 3.7 est continue. Elle est de type sensiblement gaussien et relativement large (l'émission de la LED n'est pas rigoureusement monochromatique).

- Le maximum d'intensité correspond à des photons d'énergie :

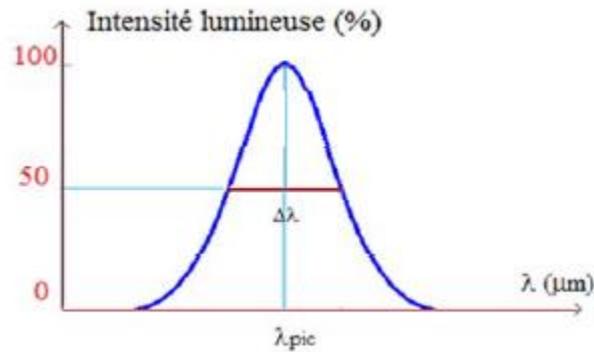
$$v_{pic} \approx E_g + KT/2 \quad (3.2)$$

Ce qui correspond à une longueur d'onde au sommet  $\lambda_{pic}$  :

$$\lambda_{pic} (\mu m) = \frac{c}{v_{pic}} = 1.24/hv_{pic} (eV) \quad (3.3)$$

□ La largeur à mi-hauteur en énergie  $\Delta h$  est de l'ordre de  $1.8 KT$ , ce qui correspond à une largeur à mi-hauteur, sur la caractéristique (Intensité-longueur d'onde), de:

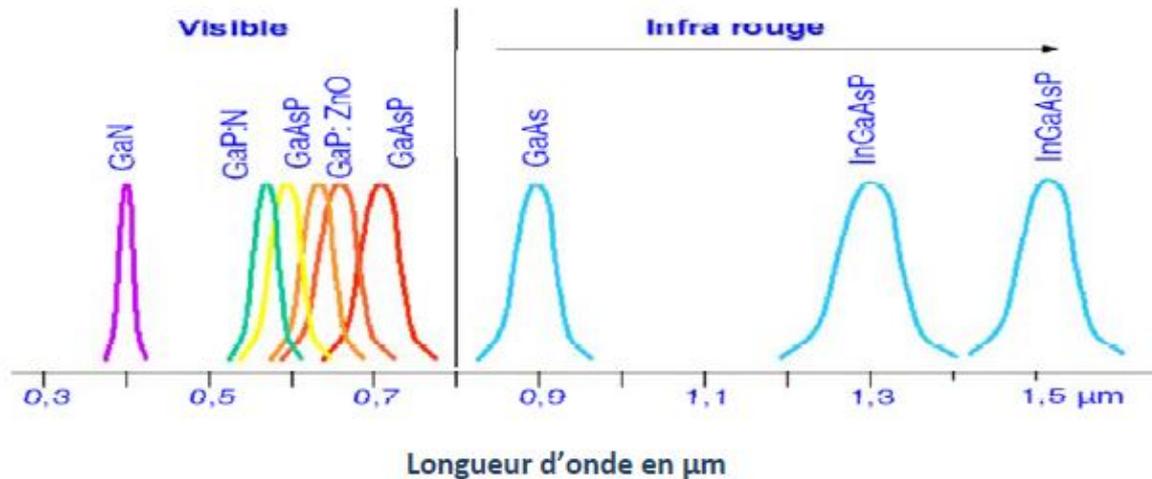
$$\Delta\lambda = 1.45\lambda_{pic}^2 KT \quad (3.4)$$



**Figure 3.7 :** Spectre d'émission d'une diode électroluminescente [11].

La largeur à mi-hauteur du spectre est donc proportionnelle au carré de la longueur d'onde centrale. Elle est étroite pour les radiations du domaine de l'ultraviolet et s'élargit en allant vers le proche infrarouge (figure 3.8).

Dans la mesure où certaines transitions mettent en jeu des niveaux d'impureté, le spectre d'émission est aussi conditionné par le type de dopant utilisé et sa largeur spectrale à mi-hauteur  $\Delta\lambda$  est de l'ordre de 20 à 100 nm.



**Figure 3.8 :** Spectres d'émission de LED pour différentes énergies de gap [11]

### 3.1.4 L'efficacité quantique et la puissance de la LED

- Un excès d' $e^-$  et de trous dans un matériau P et N, respectivement (noté par des porteurs minoritaires) est créé dans une source lumineuse de S.C (Semi-Conducteur) par l'injection des porteurs afin de mettre le composant au contact ohmique.
- L'excès de la densité d' $e^-$  et de trous est égales.
- Cependant, les porteurs injectés sont formés et recombinaison en paires  $e^- / \text{trous}$  (quand l'injection est stoppé puis la densité des porteurs revient à l'état d'équilibre).
- En générale, la densité des porteurs se décroît exponentiellement en temps suivant la relation ci-dessous :

$$n = n_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.5)$$

$n_0$ : La densité d'excès initiale des  $e^-$  injectés.

$\tau$ : La durée de vie des porteurs (varie entre  $\mu\text{s}$  à ns et dépend ainsi du matériau).

- Les porteurs en excès peuvent recombinaison soit par radiation ou de non radiation.
- En radiation, un photon est généré à énergie  $h\nu \cong E_g$ .
- Recombinaison en radiative c'est un effet inclut l'absorption optique dans la région active (auto-absorption) ou une recombinaison aux interfaces de la structure hétérojonction.

L'équation du taux (ou de vitesse) pour la recombinaison des porteurs dans une diode LED s'exprime par :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{n}{\tau} \quad (3.6)$$

$\frac{J}{qd}$  : C'est le taux des porteurs de l'alimentation externe.

$J$ : La densité de courant exprimé en  $A/cm^2$ .  $q$ : La charge d'électron.

$d$  : L'épaisseur de la région active de recombinaison.

$\frac{n}{\tau}$  : Le taux de génération thermique.

- **L'efficacité quantique interne** : dans la région active est la fraction des paires électron-trous recombinaison en radiation.

Elle s'exprime par la relation suivante :

$$\eta_{int} = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} \quad (3.7)$$

Et

$R_r$ : Exprime le taux de recombinaison en radiation

$R_{nr}$ : Exprime le taux de recombinaison de non radiation

Pour la diminution exponentielle du l'excès des porteurs.

- La durée de vie de recombinaison de radiation est  $\tau_r = \frac{n}{R_r}$
- La durée de vie de recombinaison de non radiation est  $\tau_{nr} = \frac{n}{R_{nr}}$

Par conséquent, l'efficacité quantique peut-être exprimé comme :

$$\eta_{int} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nr}}} = \frac{\tau}{\tau_r} \quad (3.8)$$

Et la durée de recombinaison  $\tau$  est :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} \quad (3.9)$$

### Remarque :

$\eta_{int}$  À un taux près de 50% pour une simple homo jonction d'une diode LED

Et  $\eta_{int}$  à un taux entre 60% à 80% pour une double structure à hétérojonction de la diode LED.

Cette grande efficacité d'une double structure à hétérojonction est atteinte à cause des petites dimensions de la région active des composants du LED, cette structure permet de combattre les effets d'auto absorption et réduit en même temps le taux de recombinaison de non radiation.

→ Si  $I$  le courant injecté à la diode LED, donc le nombre total de recombinaison par second est :

$$R_r + R_{nr} = \frac{I}{q} \quad (3.10)$$

Remplaçons l'équation (3.9) à l'équation (3.7) ça résulte  $R_r = \frac{\eta_{int} I}{q}$ , notons que  $R_r$  : est le nombre totale des photons générés / seconde. Et chaque photon ayant une énergie  $h\nu$ .

Alors, la puissance optique générée à l'intérieur de la diode LED est :

$$P_{int} = \eta_{int} \frac{I}{q} h\nu = \eta_{int} \frac{hcI}{q\lambda} \quad (3.11)$$

Il faut noter que ce n'est pas tous les photons vont sortir du composant du LED.

Afin de trouver **la puissance émise**. Premièrement considérer **l'effet quantique externe  $\eta_{ext}$**  celle-ci définit le rapport entre les photons émises par la diode LED et le nombre des photons générés à l'intérieur du composant.

Donc, pour déterminer  $\eta_{ext}$ , nous allons prendre en compte l'effet de la réflexion à la surface de la diode LED.

A l'interface limite du matériau uniquement qu'une fraction de lumière sortante au cône définit par l'angle critique  $\phi_c = \frac{\pi}{2} - \theta_c$  et se traverse l'interface.

On a déjà  $\phi_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ . ( $n_1$ :C'est l'indice de réfraction du matériau de S.C du LED.

$n_2$  : C'est l'indice de réfraction externe du LED qui est normalement l'air ou  $n_2 = 1$ ).

$\eta_{ext}$  Peut donc calculer par l'expression :

$$\eta_{ext} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\phi_c} T(\phi) (2\pi \sin \phi) d\phi \quad (3.12)$$

Dont  $T(\phi)$  : c'est le coefficient de transmission de Fresnel.

Ce facteur dépend de l'angle d'incidence  $\phi$ . Mais pour simplicité, nous pouvons utiliser l'expression pour l'incidence normal ou :

$$T(0) = \frac{4 n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (3.13)$$

Supposons le milieu externe c'est l'air et mettons  $n_1 = n$ , nous allons obtenir.

$$T(0) \cong \frac{1}{4 n (n + 1)^2} \quad (3.14)$$

Et  $\eta_{ext}$  est donc approximativement donné par :

$$\eta_{ext} \cong \frac{1}{n (n + 1)^2} \quad (3.15)$$

Et par cette relation, on trouve que la puissance optique émise par la diode LED est :

$$P = \eta_{ext} P_{int} = \frac{P_{int}}{n (n + 1)^2} \quad (3.16)$$

### Exemple d'application :

Une diode LED ayant une structure à double hétérojonction émise à  $\lambda = 1310$  nm, elle a aussi un temps de recombinaison avec une radiation et de non radiation de 30 ns et 100 ns respectivement. Et le courant de polarisation est 40 mA.

- Calculer la durée de vie de recombinaison  $\tau$  ?
- Calculer la puissance optique générée interne ?

### Réponse :

a) on applique la formule (3.9), on détermine  $\tau$  :

$$\tau = \frac{\tau_r \tau_{nr}}{\tau_r + \tau_{nr}} = \frac{30 \times 100}{30 + 100} = 23.1 \text{ ns}$$

b) maintenant, on calcule la  $p_{int}$  en utilisant la relation (3.11) :

$$p_{int} = \eta_{int} \frac{h C I}{q \lambda} = 0.77 \times \frac{(6.6256 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)(0.040)}{(1.602 \times 10^{-19})(1.31 \times 10^{-6})}$$

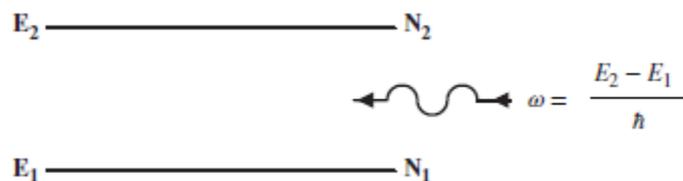
Alors,  $p_{int} = 29.2 \text{ mw}$

## 3.2 Diode Laser

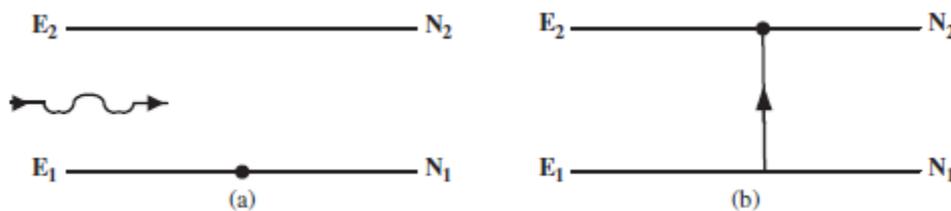
### 3.2.1 Concept de la diode laser

Les diodes laser se basent sur le phénomène de l'émission stimulée et c'est possible si le rapport entre le taux de l'émission stimulée et le taux d'absorption est grand, comme le montre l'équation suivante :

$$\frac{R_{stim}}{R_{abs}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.17)$$



**Figure 3.9** : Un système atomique à 02 niveaux d'énergie interagit avec une radiation EM

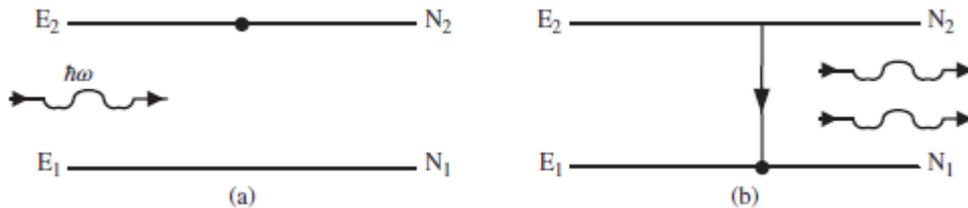


**Figure 3.10** : Système atomique à 02 niveaux d'énergie absorbe un photon.  
(a) : Avant l'absorption, (b) : Après l'absorption [5].

Alors, on dit que l'émission stimulée se domine si  $N_2 > N_1$  c'est-à-dire si le nombre de population de niveau 2 est supérieur au nombre de population de niveau 1 (ce qui traduit par **l'inversion de population**).

**N.B** : Tous les systèmes atomiques à l'équilibre thermique  $N_2$  est toujours inférieur à  $N_1$  et l'inversion de population n'est jamais atteint. Par conséquent, toutes les diodes lasers devront s'opérer hors d'équilibre thermique.

- Atteindre l'IP : les atomes devront être excités par une source externe. (Ou par une pompe : soit pompage électrique ou pompage optique).
- Les photons générés par l'émission stimulée ont la même fréquence, même phase, même direction, et même polarisation donc génèrent une lumière cohérente.

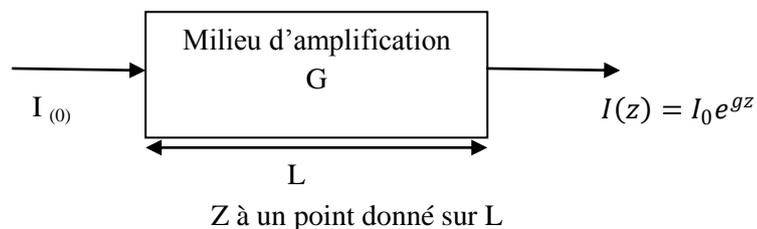


**Figure 3.11** : Un système atomique a 02 niveaux d'énergies émis un photon par l'émission stimulée. (a) : Avant l'émission stimulée, (b) : Après l'émission stimulée [5]

### 3.2.2 Condition d'oscillation de la diode laser

Considérons une onde lumineuse incidente au milieu d'amplification ( $G$ ) dont  $G$  représente le coefficient du gain introduit par l'émission stimulée.

Dans un système atomique ayant 2 niveaux d'énergie, le  $g$  est en fonction de  $N_2$ ,  $N_1$  et le coefficient d'einstein  $B$ .



**Figure 3.12** : une amplification de lumière dans un milieu de gain ( $G$ ) [5]

Ou  $I(z)$  peut réécrit en différentiel par :

$$\frac{dI}{dz} = gI_{(0)}e^{gz} \quad (3.18)$$

$$= gI \quad (3.19)$$

Comme le signal peut s'atténuer au milieu d'amplification par radiation aléatoire et par d'autre mécanisme d'absorption similaire à l'absorption dans la FO.

L'effet de la perte est modélisé comme

$$I(z) = I_{(0)} e^{-\alpha_{int} z}, \quad \alpha_{int} : \text{C'est le coefficient de la perte interne.}$$

⇒ Le gain et la perte se produit simultanément au milieu d'amplification, ceci est montré dans l'équation suivante :

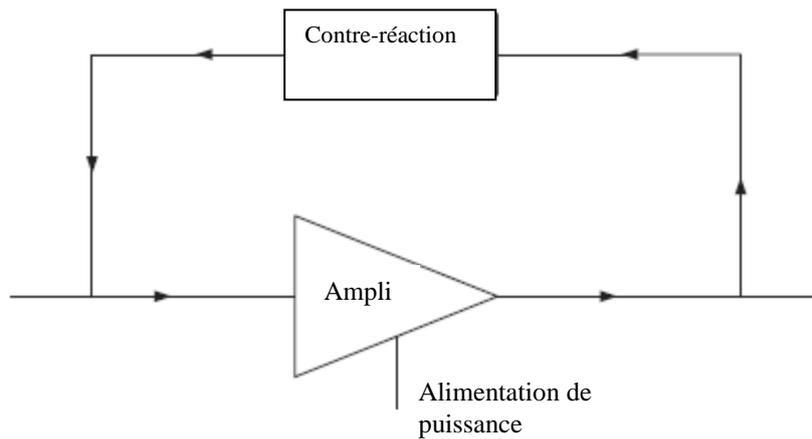
$$I(z) = I_{(0)} e^{g_{net} z} \quad (3.20)$$

Et  $g_{net} = g - \alpha_{int}$

Une diode laser est un oscillateur qui génère des fréquences optiques.

Comme le montre la figure 3.13, il a trois composants :

- (i) Amplificateur
- (ii) Boucle contre-réaction
- (iii) Alimentation en puissance



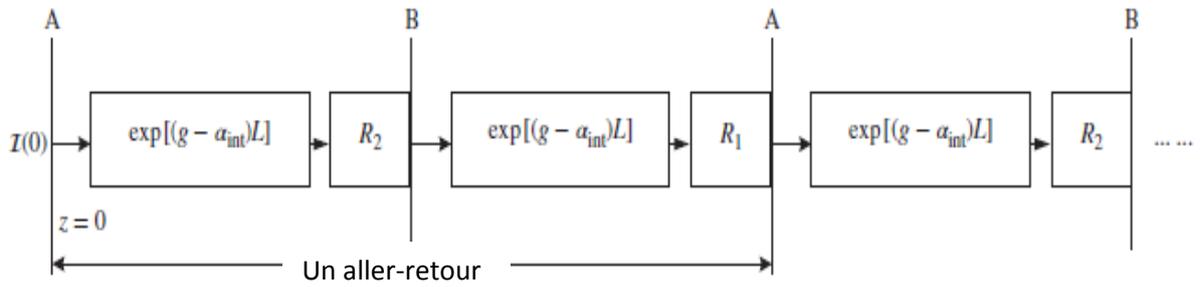
**Figure 3.13** : Une structure d'un oscillateur optique (laser) ou oscillateur électronique [5]

- (i) le système atomique agit comme un milieu d'amplification (émission stimulée).
- (ii) La boucle contre-réaction sert à placer le milieu d'amplification entre 02 miroirs.
- (iii) L'alimentation en puissance (pompe) ayant la fonction du pompage dans le but à atteindre l'inversion de la population.

- Considérons une onde optique se propage dans une cavité Fabry-Pérot (FP).



**Figure 3.14** : une cavité de Fabry-Pérot formé par 02 miroirs [5]



**Figure 3.15** : Illustration de multiple réflexion dans une cavité Fabry-Pérot [5]

- Admettons que  $I_{(0)}$  est l'intensité optique au point A, après qu'elle traverse le milieu d'amplification. L'intensité lumineuse sera  $I_{(0)}e^{g_{net}L}$  ( $L$  : c'est la longueur de la cavité).
- Puis, la lumière se réfléchit par un miroir B (a une réflectivité  $R_2$ ), ça veut dire que l'intensité réfléchi au point B sera  $R_2I_{(0)}e^{g_{net}L}$ .
- Et cette intensité se traverse le milieu autre fois et elle sera réfléchi au point A (réflectivité  $R_1$ ). L'intensité optique après un aller-retour est la suivante :

$$I_{(0)}R_1R_2e^{2(g-\alpha_{int})L} \quad (3.21)$$

La condition d'oscillation de la diode laser c'est que l'intensité lumineuse après un aller-retour devra la même que l'intensité lumineuse incidente  $I_{(0)}$ .

D'autre part, après plusieurs allers-retours l'intensité lumineuse dans la cavité sera soit plus grande ou plus petite.

- Pour une opération stable de la diode laser, ça nécessite que :

$$I_{(0)}R_1R_2e^{2(g-\alpha_{int})L} = I_{(0)} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow e^{2(g-\alpha_{int})L} &= \frac{1}{R_1R_2} \Rightarrow \\ 2gL - 2\alpha_{int}L &= \ln\left(\frac{1}{R_1R_2}\right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

En simplifiant l'équation ci-dessus, on trouve :

$$g = \alpha_{int} + \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (3.24)$$

Le second terme de cette équation représente la perte due aux miroirs :

$$\alpha_{mir} = \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (3.25)$$

Par ces équations on peut conclure la relation suivante :

$$g = \alpha_{int} + \alpha_{mir} = \alpha_{cavit\acute{e}} \quad (3.26)$$

Dont  $\alpha_{cav}$  : c'est le coefficient de la perte totale dans la cavité.

Par conséquent, **la première condition** pour avoir une opération stable du laser c'est que la perte totale devra égale le gain.

Ou autrement dit, la perte des miroirs devra être récompensée par le gain introduit par le pompage.

### Exemple d'application :

Considérons une diode laser constituée par une cavité active présente une perte de  $30 \text{ cm}^{-1}$  et la réflectivité de chaque miroir est de 30 %.

Déterminer le coefficient de gain du laser pou une cavité quand sa longueur égale  $600 \mu\text{m}$  ?  
Prenez :  $R_1 = R_2$

### Réponse :

De la formule (3.26), on a :

$$g = \alpha_{int} + \alpha_{mir}$$

Et suite la relation (3.25), on calcule la perte générée par les miroirs :

$$\alpha_{mir} = \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right), \quad (R_1 = R_2)$$

$$\text{Donc, } \alpha_{mir} = \frac{1}{2 \times 0.06} \ln \left( \frac{1}{(0.3)^2} \right)$$

$$\text{Et } \alpha_{mirroir} = 20.05 \text{ cm}^{-1}$$

$$\text{Alors, } g = 30 + 20.05 = 50.05 \text{ cm}^{-1}$$

Maintenant, si on suppose une onde monochromatique propageant dans la cavité est écrit par une onde plane :

$$\psi = \psi_0 e^{-i(\omega t - kz)} \quad (3.27)$$

Le changement de phase due au propagation du point A à point B est  $kL$ . La phase due par un aller-retour est  $2kL$ .

**La deuxième condition** pour une oscillation laser c'est que le changement de la phase devra être un multiple entier de  $2\pi$ .

$2kL = \frac{4\pi n}{\lambda_0} L = m2\pi$  ;  $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ . Et  $\lambda_0$  : c'est la longueur d'onde en espace libre.

Si la condition ci-dessus n'est pas satisfaite, la superposition des composantes des champs après un aller-retour s'approche du zéro si  $N$  tend vers l'infini.

$$\Psi_N = \psi_0 e^{-i\omega t} \sum_{n=0}^N e^{i2knL} \quad (3.28)$$

C'est la raison que parfois le champ après un aller – retour peut être positive et parfois peut être négative. Et la somme net va être zéro si  $m$  n'est pas entier. Et quand  $m$  est entier le champ optique après un aller – retour s'additionne cohérentement.

On voit que uniquement un nombre discret de fréquence (ou  $\lambda$ ) sont supportés par la cavité.

Et ils sont donnés par :

$$\frac{4\pi nL}{\lambda} = m2\pi \quad \lambda_m = \frac{2nL}{m}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (3.29)$$

Ou  $f_m = \frac{mc}{2nL} \implies$

Ces fréquences correspondent aux **modes longitudinaux** de la cavité et peuvent changer en variant la longueur de la cavité.

Et l'intervalle  $\Delta f$  entre **les modes longitudinaux** est constant et présenté par :

$$\Delta f = f_m - f_{m-1} = \frac{c}{2nL} \quad (3.30)$$

### Exemple d'application :

Soit une diode laser constituée par un Crystal de longueur 4 cm et un indice de réfraction 1.78, et une longueur d'onde d'émission maximale du composant est  $0.55 \mu\text{m}$ .

Déterminer le nombre des modes longitudinales et l'écart entre les fréquences correspondants à ces modes ?

### Réponse :

Le nombre des modes longitudinaux supporté par la structure de l'exemple sera déterminé par la formule (3.29) :

$$L = \frac{\lambda m}{2n} \text{ et } m = \frac{2nL}{\lambda}$$

$$m = \frac{2 \times 1.78 \times 0.04}{0.55 \times 10^{-6}}$$

$$\text{Et } m = 2.6 \times 10^5$$

Utilisant l'équation (3.30), on détermine l'écart fréquentiel entre les modes :

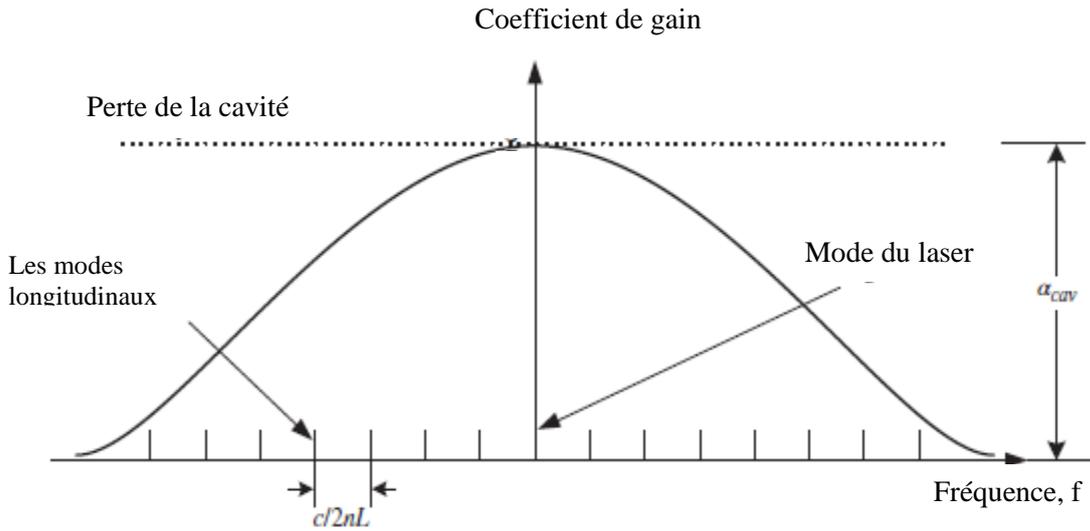
$$\Delta f = \frac{c}{2nL}, \text{ alors } \Delta f = \frac{2.998 \times 10^8}{2 \times 1.78 \times 0.04}$$

$$\Delta f = 2.1 \text{ GHz}$$

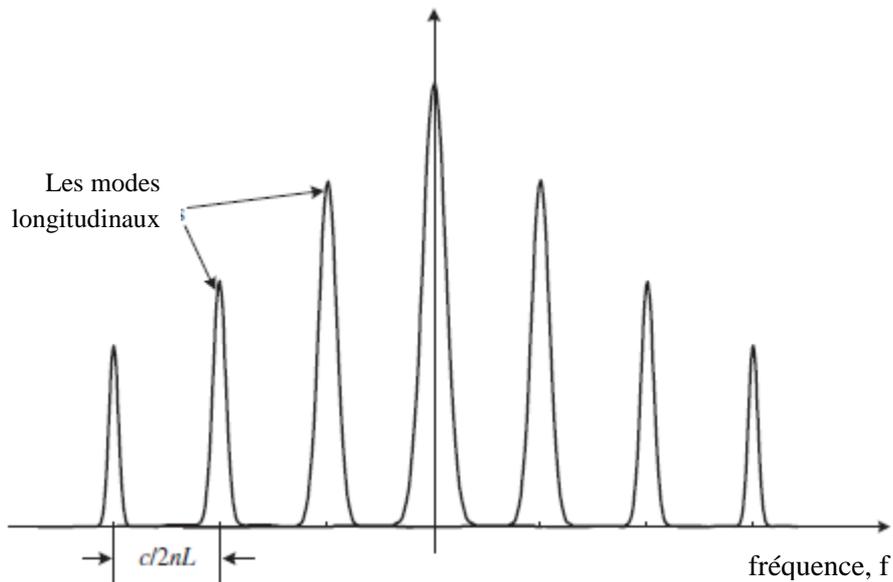
La figure suivante montre les profils du gain et de perte d'une diode laser à Fabry-Perot. Plusieurs modes d'une cavité FP ont un gain simultanément.

Dans la théorie, les autres modes n'arriveront pas au seuil du laser dont leur gain est < à la perte de la cavité.

En pratique, la différence en gain entre plusieurs modes de la cavité est beaucoup petite. Et un ou deux modes adjacentes à chaque extrémité du (mode principale) ou appelé **mode laser** portent une fraction de puissance significative.



**Figure 3.16** : Les profiles de la perte et du gain d'une diode laser à Fabry-Perot [5].



**Figure 3.17** : Le spectre de sortie d'une diode laser à Fabry-Perot [5]

Donc, il est utile de déterminer l'évolution de l'intensité en fonction de temps. Afin de trouver le **taux de changement de l'intensité optique**. En premier temps, on va voir une expression liée l'intensité optique et la densité d'énergie  $u$ . L'intensité optique est la puissance  $p$  dans une surface  $s$ , dont elle est perpendiculaire à la direction de propagation.

$$I = \frac{p}{s} \quad (3.31)$$

Et la puissance  $c$ 'est l'énergie  $\Delta E$  par unité de temps.

$$p = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (3.32)$$

$\Delta t$  : est l'intervalle de temps choisie.

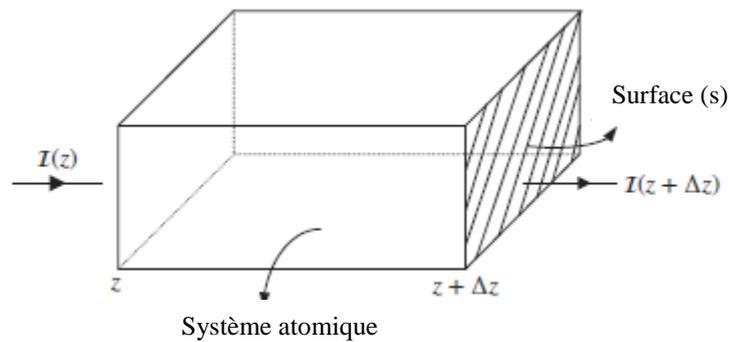
Combiner ces deux équations ci-dessus, on trouve :

$$I = \frac{\Delta E}{s \cdot \Delta t} \quad (3.33)$$

La figure suivante montre l'intensité optique au point  $z$  et  $z + \Delta z$ , le nombre des photons traversent une surface  $s$  au  $z + \Delta z$  et dans un intervalle de temps  $\Delta t$  c'est le même que le nombre des photons présentent dans un volume  $s\Delta z$  si :

$$\Delta z = v \cdot \Delta t \quad (3.34)$$

Dont  $v$  c'est la vitesse de la lumière dans le milieu.



**Figure 3.18** : L'intensité optique incidente dans un système atomique de volume  $S\Delta z$  [5]

Et la formule finale de l'intensité optique est donnée comme suivant

$$I = \frac{\Delta E \cdot v}{S \cdot \Delta z} \quad (3.35)$$

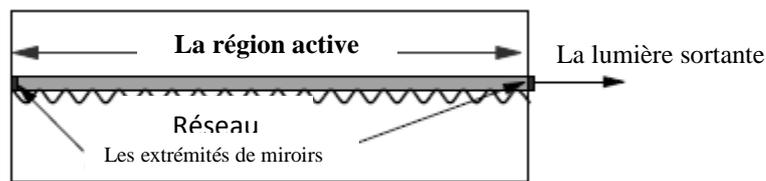
### 3.2.3 Des diodes laser pour les longues distances

Le plus courant dans les communications optique « **Laser à Fabry-Pérot** » mais n'est pas adéquat dans les grandes distances ou dans les systèmes à multiplexage WDM.

- La cavité Fabry-Pérot est modifiée afin de disperser les fréquences non souhaitées avant qu'elles arrivent au seuil du laser. Ça sera fait après qu'un réseau de diffraction est placé à l'intérieur de la cavité.

- Dans cette condition, la diode laser peut produire une largeur spectrale très étroite (typiquement entre 2 à 3 nm).
- Les diodes lasers qui utilisent ce principe sont —→ Laser à rétroaction distribué. En anglais **DFB laser** (Distributed Feedback laser)
- Laser à réflecteur de Bragg distribuée  
En anglais **DBR laser** (Distributed Bragg Reflector Laser)

Par exemple : **DFB laser**



**Figure 3.19** : Schéma d'un laser à Fabry-Pérot [5]

Lorsqu'on veut utiliser les lasers dans les longues distances. On trouve que les lasers à Fabry-Pérot présentent des problèmes significatifs :

- 1) Les lasers **FP** génèrent plusieurs longueurs d'ondes sur une largeur spectrale de sortie dont chacune de ces  $\lambda$  générées ayant une largeur dans le spectre ( $\approx 5$  à  $8$  nm) même si la longueur d'onde centrale est 1330 nm ou 1550 nm. Donc, Ça génère la dispersion chromatique (plusieurs vitesses correspondent aux plusieurs  $\lambda$ ).
- 2) Dans un système WDM qui transmet plusieurs signaux d'information multiplexés en différentes longueurs d'onde. Dans ce système, il est important que chacun de ces signaux à une largeur spectrale très étroite. Et les lasers **FP** ont une largeur spectrale très grande.

Donc, les lasers **DFB** sont l'une des solutions proposées afin de résoudre ces problèmes :

L'idée est de mettre un réseau de Bragg à l'intérieur d'une cavité de la diode laser. Ceci est juste une variation périodique de l'indice de réfraction dans la région du gain. La présence de cette variation cause des petites réflexions qui se produisent à chaque changement de  $n$  (ondulation).

Quand la période de ces ondulations est multiple de la longueur d'onde de la lumière incidente, une sommation constructive est introduit entre les réflexions apparait et les autres longueurs d'onde sont destructives.

Cet effet est grand quand la période du réseau de Bragg =  $\lambda$  de la lumière utiliser (dans le premier ordre de réseau)

Cependant, le composant ça marche quand la période du réseau est  $< m$  multiple de  $\lambda$ .

Par conséquent, **un seul mode est généré (cette caractéristique de la diode laser DFB le rend très adéquat pour les applications WDM de haut débit, et dans les transmissions optiques de longue distance).**

- D'autres diodes laser utilisent une cavité externe du composant lui-même. Celles-ci sont appelées « lasers à cavité externe ». Cela permet de faire une longue cavité et mettre un réseau de diffraction.

**Remarque :**

- $L_{\text{entre 02 miroirs}} = m \frac{\lambda}{2} \longrightarrow$  Résultat : la lumière est constructive
- $L_{\text{entre 02 miroirs}} = \text{pas de } m \frac{\lambda}{2} \longrightarrow$  Résultat : la lumière est destructive
- Laser à Fabry-Perot : les longueurs d'ondes générées sont reliées à la distance entre les 02 miroirs par :  

$$L = \frac{\lambda m}{2n} \quad m = 1, 2, 3 \dots ; \text{ et } n: \text{ est l'indice de réfraction.}$$

Typiquement la longueur d'une cavité est entre 100 mm et 200  $\mu\text{m}$ .

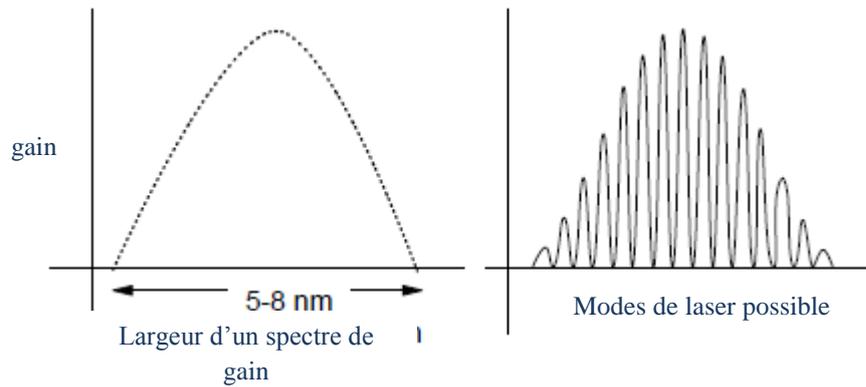
Exemple :

Si  $L = 100 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 1500 \text{ nm}$ ,  $n = 3.45$  (InP)

$$m = \frac{2 n L}{\lambda} = \frac{2 \times 3.5 \times 100 \times 10^{-3}}{1500 \times 10^{-9}}$$

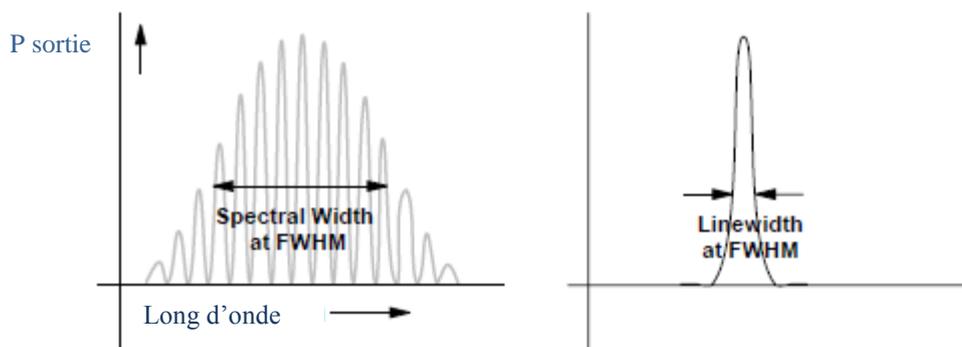
$$\lambda_{\text{résonants}} = m \cdot \lambda$$

- Laser à Fabry-Perot peut produire un rang de longueur d'onde ( $\lambda$ ). Chaque longueur d'onde peut être un mode de laser (mode de résonance) et ayant une fenêtre de gain dans le milieu de la cavité.



**Figure 3.20** : Les modes produits par une diode laser typique à Fabry-Pérot [5]

- La sortie du laser de chacune de ces modes est appelée ligne (line).
- La diode laser à Fabry-Pérot produit un nombre de lignes (lines) sur un rang de longueur d'onde appelées « largeur spectrale 'Spectral Width' ».



**Figure 3.21** : Largeur spectrale et largeur de ligne. Celles-ci sont généralement mesurer comme largeur à une demie de l'amplitude maximale d'un signal. Ceci à FWHM (Full Width Half Maximum) [5]

- Plus de complexité en conception de laser produit moins de lignes (souvent une seule ligne). Ainsi, plus de complexité en lasers sont conçus de produire des lignes très étroites. Pour la plupart des applications sur la fibre mono mode, moins de lignes et une largeur de ligne étroite sont meilleur.

### 3.3 Les récepteurs optiques

- Le but d'un récepteur optique c'est de convertir un signal optique au signal électrique et donc de reconstituer les données transmis par un système optique.

- Ça demande des récepteurs ayant une grande sensibilité, une réponse rapide. Et leurs tailles doivent être compatibles avec les dimensions de la FO.
- Cela est possible juste avec une conception des photons détecteurs à base des matériaux de semi-conducteur.

### 3.3.1 Paramètres de performance d'un photo-détecteur

Il y-a des paramètres communs dans tous les récepteurs optiques et celles-ci détermine leurs performances.

**a) La sensibilité-** Le rapport de la puissance électrique à la puissance optique de sortie du détecteur.

**b) L'efficacité quantique-** le rapport du nombre d'électron générer par le détecteur au nombre des photons incidents au détecteur.

$$\eta = \frac{\text{le nombre d'électron}}{\text{le nombre des photons}}, \text{ soit } \eta = \frac{I_p/q}{\phi/hf} \quad (3.36)$$

#### Exemple

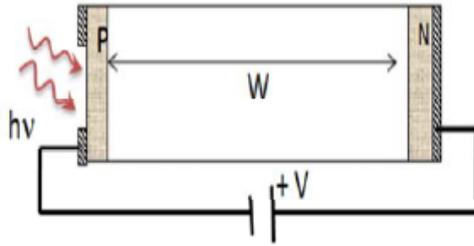
Le courant généré dans une photodiode, qui présente une efficacité quantique  $\eta_e$  de 0.8 pour un flux photonique de  $7.5 \times 10^{15}$  photons/s est de :

$$I_p = \eta_e \cdot q \cdot \phi \text{ soit } I_p = 8 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 7.5 \times 10^{15}.$$

$$\text{Donc } I_p = 0.96 \text{ mA}$$

Pour calculer  $\eta_e$  considérons le cas idéal (figure 3.22) :

- d'une structure où les épaisseurs,  $d_1$  et  $d_2$ , des régions P + et N sont très faibles devant la zone de charge d'espace  $W$ .
- où toutes les paires photo-générées sont collectées (pas de recombinaisons).



**Figure 3.22 : Photodiode idéale [11]**

Pour un flux de lumière incidente  $\phi_i(W)$ , le flux qui pénètre dans la diode, suite à la discontinuité d'indices, est :

$$\phi_0 = \phi_i(1 - R) \quad (3.37)$$

Le flux qui reste après une profondeur de pénétration  $x$  est :

$$\phi_0(x) = \phi_i(1 - R)e^{-\alpha x} \quad (3.38)$$

En négligeant  $d_1$  devant  $W$ , la perte de puissance par absorption dans  $W$  est :

$$\phi_a(w) = \phi_i(1 - R)(1 - e^{-\alpha W}) \quad (3.39)$$

Cette quantité correspond aux photons qui sont à l'origine de la génération de paires électron trou.

En négligeant le courant de diffusion devant le photocourant de génération dans la zone de charge d'espace, le courant peut avoir pour expression:

$$I_p = q\phi_i(1 - R)(1 - e^{-\alpha W})/h\nu \quad (3.40)$$

Ainsi le rendement quantique de la photodiode est :

$$\eta_e = \frac{I_p/q}{\phi/h\nu}, \text{ soit ; } \eta_e = (1 - R)(1 - e^{-\alpha W}) \quad (3.41)$$

### Exemple d'application :

Le coefficient d'absorption du GaInAs est de  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  pour longueur d'onde  $\lambda$  de 1300 nm et son indice de réfraction est de 3.56.

Déterminer son efficacité quantique  $\eta_e$ .

**Réponse :**

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}, \quad \text{Soit } R = \frac{(3.56-1)^2}{(3.56+1)^2} = 0.31$$

$$\text{Et } \eta_e = (1 - R)(1 - e^{-\alpha W}) \quad \text{soit } \eta_e = (1 - 0.31)(1 - e^{-10.10^{-4}10^4})$$

$$\text{Donc : } \eta_e = 0.69$$

Par ailleurs, pour une longueur d'onde donnée, cette efficacité quantique est reliée à la réponse spectrale de la photodiode par :

$$\eta_e = S(\lambda) \cdot \frac{hc}{\lambda} \quad (3.42)$$

### Exemple d'application

L'efficacité quantique  $\eta_e$ , d'un détecteur ayant une réponse spectrale de 8.5 mA/W à une longueur d'onde  $\lambda$  de 845 nm, est de :

$$\eta_e = S(\lambda) \cdot \frac{hc}{\lambda} = S(\lambda) \cdot \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})}. \quad \text{Soit } \eta_e = 8.5 \times 10^{-3} \times \frac{1.24}{0.845}$$

$$\text{Donc } \eta_e = 1.24 \text{ \%}.$$

**c) Le temps de réponse-** C'est le temps nécessaire pour un détecteur afin de répondre à une puissance optique incidente. Le temps de réponse est lié à la bande passante du détecteur par :

$$BW = 0.35/t_r \quad (3.43)$$

Dont  $t_r$  est le temps de montée du composant. Le temps de montée est le temps nécessaire pour qu'un détecteur s'augmente à une valeur de 63.2% de son lecteur maximale.

### Exemple d'application :

Soit une photodiode est utilisée dans un système de communication, se caractérise par un temps de montée  $t_{ph} = 3$  ns. Calculer la bande passante de cette photodiode

**Réponse :**

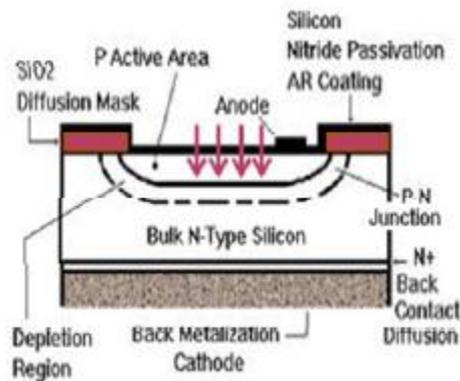
En appliquant la relation (3.43), on détermine la BW :

$$BW = \frac{0.35}{t_{ph}} = \frac{0.35}{3} = 0.116 \text{ GHz}$$

**d) Puissance équivalente au bruit (Noise Equivalent Power, NEP) :** à une fréquence de modulation donnée, la longueur d'onde( $\lambda$ ), et la bande passante de bruit, la puissance de radiation incidente qui produit un rapport signal sur bruit à la sortie du détecteur.

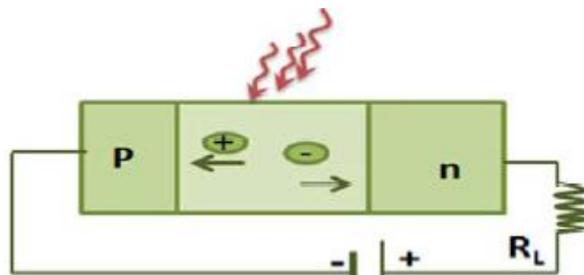
### 3.3.2 Principe générale des photodiodes

A l'origine, la photodiode est une diode qui n'a pas été encapsulée et qui est donc sensible aux radiations extérieures (figure 3.23). Son principe de fonctionnement est basé sur les mécanismes de conduction dans une jonction PN polarisée en inverse et soumise à un rayonnement (figure 3.24).



**Figure 3.23 :** Structure d'une photodiode  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Structure\\_photodiode.jpg?uselang=fr](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Structure_photodiode.jpg?uselang=fr) ????

Les porteurs photo générés sont séparés et accélérés par un champ électrique puis collectés pour contribuer au courant mesuré.



**Figure 3.24 :** jonction PN sous polarisation inverse et soumise à un rayonnement [11]

Le courant qui circule dans une diode est donné par l'expression :

$$I = I_s(e^{V/U_T} - 1) \quad (3.44)$$

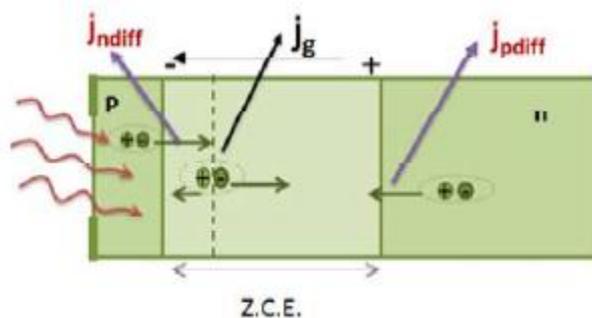
Où  $I_s$  est le courant de saturation,  $U_T \approx 26 \text{ mV}$  à  $300\text{K}$  et  $V$  la tension appliquée

Lorsque la diode est polarisée en inverse et pour  $|V| \gg U_T \rightarrow I \approx -I_s$

Le courant mesuré est dû aux porteurs minoritaires des régions P et N et de la génération de paires électron-trou dans la Z.C.E.

Dans le cas de la photodiode, le rayonnement absorbé augmente ce courant par la création de porteurs dans la zone de charge d'espace.

Considérons le schéma de la figure 3.25 suivante :



**Figure 3.25** : Génération de porteurs par absorption de lumière dans les différentes zones de la diode [11].

Les photons incidents créent des paires électron-trou dans chacune des régions : p, ZCE et n :

- Dans les régions neutres p et n, les porteurs minoritaires diffusent. Ceux qui atteignent la charge d'espace sont attirés par le champ et contribuent au courant par leur diffusion créant un photo-courant de diffusion ( $I_{diff}$ ).

- Dans la ZCE, les paires électron-trou créées sont dissociées par le champ électrique ; l'électron est propulsé vers la région n et le trou vers la région p. ces deux photo-porteurs donnent naissance à une photo courant de génération ( $I_g$ ).

Cette photo courant contribue alors à l'augmentation du courant inverse de la diode :

Les deux mécanismes s'ajoutent pour donner naissance à la photo courant  $I_{ph}$  :

$$I_{ph} = I_{ndiff} + I_{pdiff} + I_g \quad (3.45)$$

Cette photo courant contribue alors à l'augmentation du courant inverse de la diode :

$$I = I_s \left( e^{V/U_T} - 1 \right) - I_{ph} \quad (3.46)$$

Le photo-courant est pratiquement indépendant de la tension de polarisation. La caractéristique de la diode en obscurité et sous éclairage est donnée sur la figure 3.25 suivante :

Dans la pratique, une photodiode peut être utilisée suivant deux modes de fonctionnement :

**Mode 1 : Mode photovoltaïque ;  $I = 0$**  (nous nous intéressons pas à ce mode)

**Mode 2 : polarisation en inverse ( $V_o < 0$ )**

La diode est polarisée en inverse, (cas des photodiodes). Dans ce cas, on mesure le photo courant débiteur par la diode (figure 3.26) :

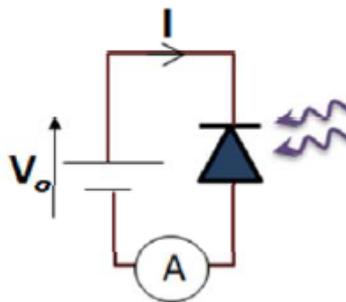
$$I = I_s \left( e^{V_o/U_T} - 1 \right) - I_{ph} \quad (3.47)$$

En général, Les photodiodes sont polarisées par des tensions de l'ordre de 5V et inférieures à la tension d'avalanche.

Dans ce cas on peut supposer que la tension  $V_o$  est très grande devant  $U_T$ , ce qui nous permet d'écrire :

$$I = -(I_s + I_{ph}) \approx -I_{ph} \quad (3.48)$$

Le courant mesuré est alors proportionnel à l'intensité de lumière incidente.



**Figure 3.26** : Fonctionnement photodiode, polarisation inverse [11]

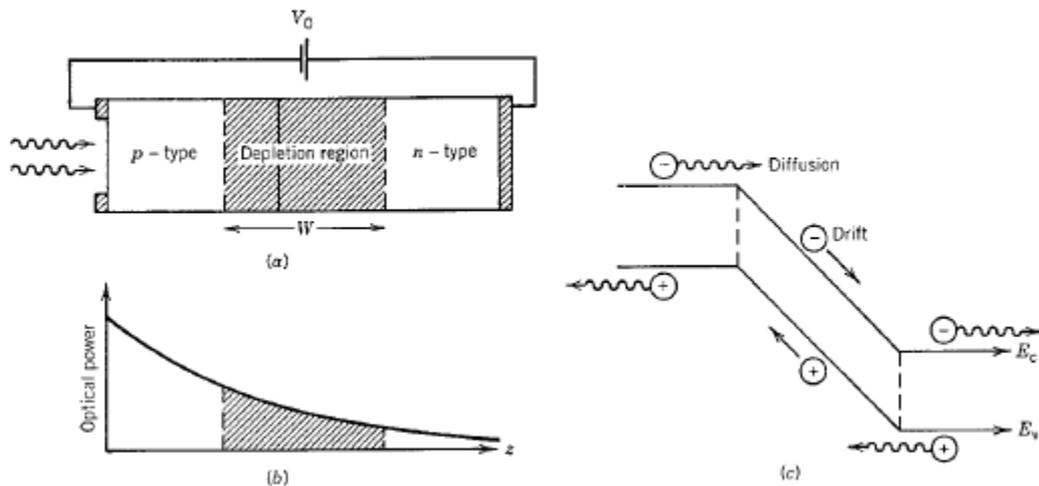
**Remarque :**

- Lorsque la photodiode est en court-circuit, soit à  $V_0$  nulle, le courant mesuré pour un flux de lumière donnée est le courant de court-circuit  $I_{cc}$  (point d'intersection de la caractéristique avec l'axe des courants- figure 3.25), il correspond au photocourant.

- Le courant issu d'une photodiode est très faible, il varie de quelques pico-ampères à quelques micro-ampères selon l'intensité de la lumière et la surface de la photodiode. Une amplification du photocourant est alors souvent effectuée à l'aide de montages à base d'amplificateurs opérationnels qui assure en même temps la conversion du photocourant issu de la diode en une tension.

### 3.3.4 Les types des récepteurs optiques

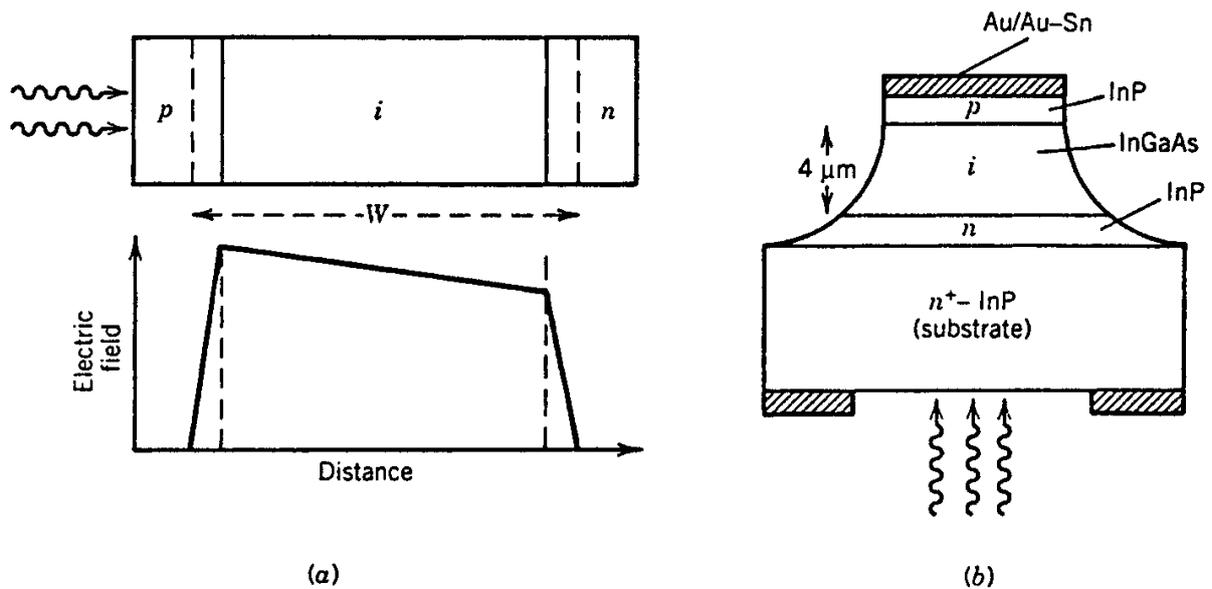
- La jonction PN est généralement utilisée dans les détecteurs optiques. L'illustration suivante montre la jonction PN.



**Figure 3.27 :** (a) une photodiode sous la polarisation d'une tension  
 (b) variation de la puissance optique à l'intérieur de la photodiode  
 (c) diagramme de bande d'énergie montre le mouvement des porteurs par le courant dérivé ou par le courant de diffusion [6]

#### 3.3.4.1 La Photodiode PIN

Une façon simple pour augmenter la largeur de la région de déplétion est d'insérer une couche de S.C non dopé entre la jonction PN.



**Figure 3.28 :** (a) une photodiode avec la distribution d'un champ électrique sous une polarisation inverse  
 (b) Conception d'une photodiode PIN a InGaAs [6]

- La nature intrinsèque de la couche intermédiaire (i) offre une grande résistance, et la plupart de chute de tension se produit à travers elle. Comme résultat, le grand champ électrique s'existe dans la couche (i).
- La différence principale par rapport à la photodiode PN c'est que le courant de dérivé d'un photo courant se domine que le courant de diffusion parce que la grande partie de la puissance incidente est absorbée à l'intérieur de la région *i* de la photodiode PIN.
- La valeur optimale de la région de déplétion *w* de la photodiode PIN dépendra à un compromis entre la vitesse et la sensibilité. La sensibilité peut être augmentée par l'augmentation de *w* pour que l'efficacité quantique  $\eta$  s'approche de 100%. Cependant, la réponse en temps ainsi peut s'augmente, comme il prend plus de temps pour les porteurs à dériver à travers la région de déplétion. Pour les S.C ayant une bande d'énergie de gap indirecte (comme : Si, et Ge), Typiquement *w* devra entre 20-50  $\mu m$  afin d'assurer une efficacité quantique raisonnable.

**Remarque :**

La BP d'une photodiode est ainsi limité par le temps de transit ( $\tau_{tr} > 200 ps$ ). Par contre, *w* peut-être aussi petite que 3-5  $\mu m$ , pour les photodiodes qui utilisent les S.C à bande de gap

directe, Comme InGaAs. Le temps de transit pour une telle photodiode est  $\tau_{tr} \sim 10ps$ . Ces valeurs de  $\tau_{tr}$  correspond à un détecteur de BP ( $\Delta f \sim 10GHz$  si on utilise l'équation qui exprime la bande passante de la photodiode celle qui correspond au circuit RC et celle qui est défini par  $\Delta f = [2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})]^{-1}$ ) avec  $\tau_{tr} > \tau_{RC}$ .

Paramètre	symbole	L'unité	Si	Ge	InGaAs
La longueur d'onde	$\lambda$	$\mu m$	0.4 – 1.1	0.8 – 1.8	1.0 – 1.7
La sensibilité	$R$	$A/W$	0.4 – 0.6	0.5 – 0.7	0.6 – 0.9
L'efficacité quantique	$\eta$	%	75 – 90	50 – 55	60 – 70
Le courant d'obscurité	$I_d$	$nA$	1 – 10	50 – 500	1 – 20
Le temps de monté	$T_r$	$ns$	0.5 – 1	0.1 – 0.5	0.02 – 0.5
La bande passante	$\Delta f$	$GHz$	0.3 – 0.6	0.5 – 3	1 – 10
La tension de polarisation	$v_b$	$V$	50 – 100	6 – 10	5 – 6

**Tableau 3.1** : Caractéristiques commun des photodiodes PIN pour différents matériaux de S.C [6]

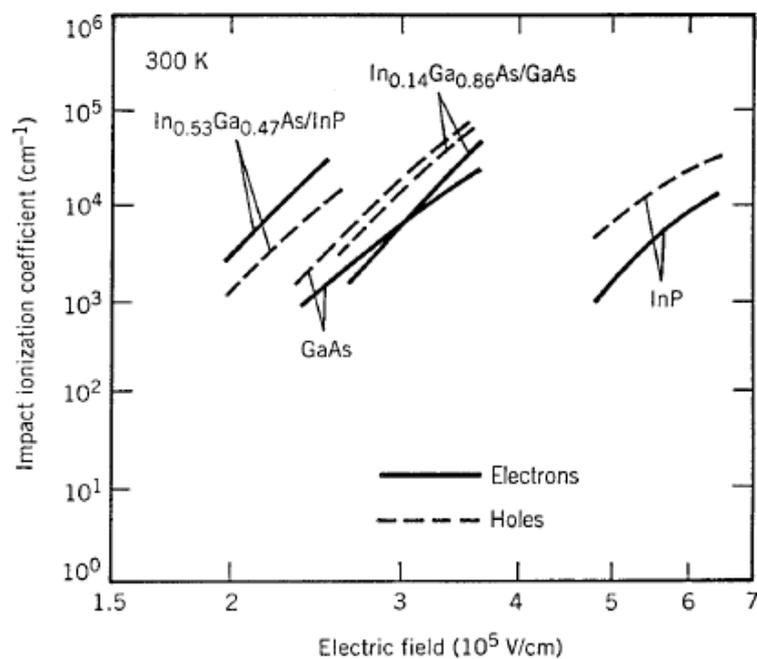
Dans les années 1990, déjà des grands efforts ont été faites pour développer des photodiodes afin qu'ils présentent plus de performance :

- À 1990, développement des photodiodes ayant une grande vitesse et se fonctionnent avec des débits de 10Gb/sec et la BP présentée a dépassée 70 GHz.
- À 1995, des photodiodes PIN développées ont présentées une BP de 110GHz.
- Et dans les dernières années, plusieurs techniques ont été proposées afin d'améliorer encore plus les performances de la photodiode. Dont plus de 94% d'efficacité a été arrivée, une structure présente 120 Ghz de BP a été réalisée. Des photodiodes à guide d'onde ont été utilisées pour la réception d'un débit de 40Gb/sec.

### 3.3.4.2 Photodiode à avalanche APD

- Le passage à l'utilisation des photodiodes à avalanche c'est que la sensibilité des photodiodes PIN est limitée.
- La photodiode à avalanche peut avoir des valeurs plus grandes de R, comme elles sont conçues de fournir un gain de courant. Et elles sont utilisées quand la puissance optique qui arrive au récepteur est limitée.

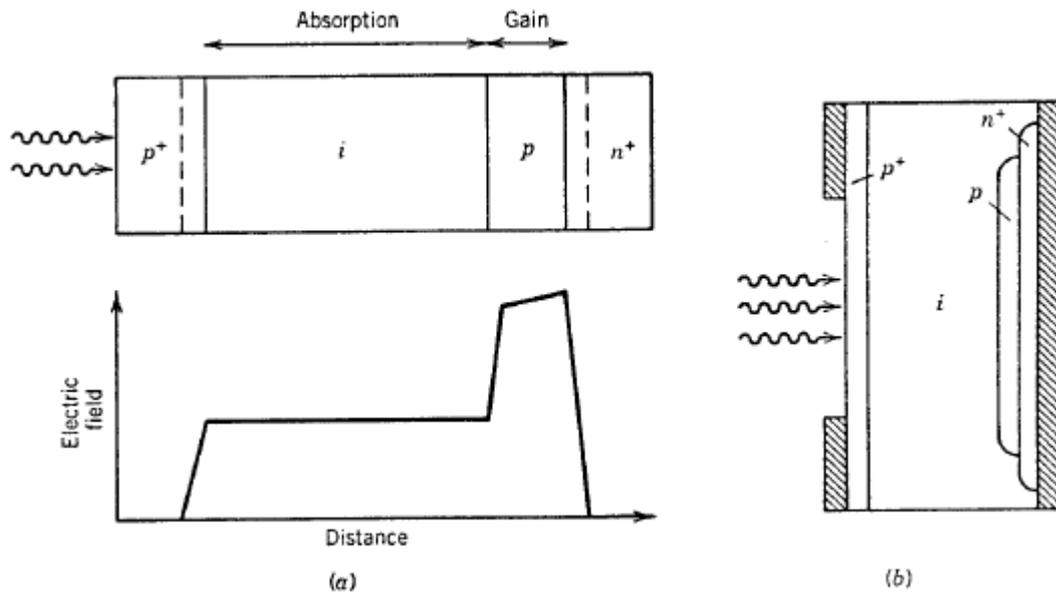
- Le phénomène physique derrière le gain de courant interne est connu aussi par le terme ionisation par impact. Sous certaines conditions, une accélération des électrons peut acquérir une énergie suffisante afin de générer des nouveaux paires électrons – trous.
- Le taux de générations des paires électrons-trous est régi par deux paramètres  $\alpha_e$ ,  $\alpha_h$  sont appelés les coefficients de l'ionisation par impact des électrons et trous respectivement. La figure 3.29 suivante montre  $\alpha_e$  et  $\alpha_h$  pour différents S.C



**Figure 3.29 :** Les coefficients de l'ionisation par impact pour différents S.C en fonction du champ électrique pour les électrons (la courbe continue) et pour les trous (la courbe discontinue) [6].

- Les photodiodes à avalanche se diffèrent dans leurs conceptions par rapport les photodiodes PIN dans une seule chose : une couche supplémentaire est ajoutée dont des paires électron-trous secondaires sont générées sous l'effet de l'ionisation par impact.
- La figure suivante montre la structure de l'APD avec un champ électrique variable dans les différentes couches. Sous une polarisation inverse, un grand champ électrique existe dans la couche de type-P mis entre les couches de type - i et type - n<sup>+</sup>. Cette couche est appelée

la couche de multiplication, cependant des paires  $e^-$  - trous secondaires sont générées ici sous l'effet de l'ionisation par impact. Et la couche  $i$  agit comme la région de déplétion dont la plupart des photons incidents sont absorbés et les paires  $e^-$  - trous primaires sont générées. Alors, les  $e^-$  générés dans la région  $i$  à travers la région de gain et les paires  $e^-$  - trous secondaires sont responsable pour le gain de courant.



**Figure 3.30 :** (a) : une photodiode APD avec la distribution d'un champ électrique dans les différentes couches sous la polarisation inverse [6].

(b) : Une conception d'une portée de silicium d'une photodiode APD.

Le courant total généré par la photodiode c'est la somme du courant d' $e^-$  et le courant de trous :

$$I = i_e(x) + i_h(x) \quad (3.49)$$

A cause du courant de gain, la sensibilité d'une APD est augmentée par le facteur de multiplication donné par.

$$M = \frac{1 - k_A}{\exp[-(1 - k_A)\alpha_e d] - k_A} \quad (3.50)$$

$$k_A = \frac{\alpha_h}{\alpha_e} \quad (3.51)$$

Et la sensibilité est donnée par :

$$R_{APD} = MR = M\left(\frac{\eta q}{h\nu}\right) \quad (3.52)$$

Paramètre	symbole	L'unité	Si	Ge	InGaAs
La longueur d'onde	$\lambda$	$\mu m$	0.4 – 1.1	0.8 – 1.8	1.0 – 1.7
La sensibilité	$R_{APD}$	$A/W$	80 – 130	3 – 30	5 – 20
Le gain de l'APD	$M$	–	100 – 500	50 – 200	10 – 40
Le facteur- k	$k_A$	–	0.02 – 0.05	0.7-1.0	0.5 – 0.7
Le courant d'obscurité	$I_d$	$nA$	0.1 – 1	50 – 500	1 – 5
Le temps de monté	$T_r$	$ns$	0.1 – 2	0.5 – 0.8	0.1 – 0.5
La bande passante	$\Delta f$	$GHz$	0.2 – 1	0.4 – 0.7	1 – 10
La tension de polarisation	$v_b$	$V$	200 – 250	20 – 40	20 – 30

**Tableau 3.2 :** Caractéristiques commun des photodiodes APD pour différents matériaux de S.C [6]

### 3.3.5 Les sources de bruit dans les photo-détecteurs :

La détection des signaux optiques est accompagnée avec la présence de bruit dont il est additionné avec le courant ou la tension de sortie. Certains de ces bruits sont inhérents aux champs des photons cependant autres dépendances du circuit est utilisé. Pour les photo-détecteurs, il y-a trois principales sources de bruits :

#### 3.3.5.1 Le bruit d'obscurité

La détection de la puissance optique consiste par un flux de photons dont ils arrivent aléatoirement. La probabilité d'arrivée d'un nombre de photons dans un temps donné est généralement donnée par une distribution de Poisson. Ça introduit une fluctuation aléatoire du signal. La source de génération de bruit est statistique. Et il n'existe aucun moyen de le réduire ou de l'éliminer.

Le courant d'obscurité, ou bruit de grenaille est due la génération thermique des paires électron-trous dans l'absence d'un rayonnement photonique. Pour des grandes valeurs de polarisation inverse, le courant d'obscurité estimé est donné par

$$I_{n-d} = \sqrt{2qI_s B} \quad (3.53)$$

Dont  $I_s$  est le courant de saturation de polarisation inverse dans l'obscurité et  $B$  est la bande passante.

### 3.3.5.2 Le bruit de grenaille

Ce bruit est associé aussi avec le signal (photo courant) à cause de la nature statistique de génération des paires électron-trous due à l'absorption des photons. Le signal de courant bruité est estimé par la formule :

$$I_{n-s} = \sqrt{2qI_{ph}B} \quad (3.54)$$

Dont  $I_{ph}$  est le (signal) photo courant.

### 3.3.5.3 Le bruit de johnson

Ce bruit s'augmente par le mouvement thermique des électrons dans n'importe quel élément résistif sans tenir compte de la tension appliquée. Le bruit est intrinsèque à toutes les résistances et il n'est pas due au mauvaise de construction. La valeur rms du bruit de Johnson à une température T est donné par la formule :

$$I_{n-j} = \sqrt{4kTB/R_{sh}} \quad (3.55)$$

Dont R est la résistance de dérivation (et appelée la résistance shunt).

En combinant le bruit ci-dessus le rapport signal bruit (SNR, the signal to noise ratio) est donné par

$$SNR = \frac{I_{ph}^2}{I_{n-d}^2 + I_{n-s}^2 + I_{n-j}^2} \quad (3.56)$$

Si le photo-courant est très grand, l'effet du courant d'obscurité et le bruit thermique peuvent négliger et le SNR est donné par

$$SNR = \frac{I_{ph}^2}{I_{n-s}^2} \quad (3.57)$$

### Exemple d'application

Soit une photodiode a une efficacité quantique de 80% à 1000 nm. Une radiation d'une puissance optique de  $0.01 \text{ watt/m}^2$  est incidente dans le composant dont la surface de réception est  $1\text{mm}^2$ . Le détecteur a un courant d'obscurité de  $5\text{nA}$  et une résistance de dérivation de  $10^8 \text{ ohms}$ . Si la bande passante est  $100 \text{ MHz}$ , calculer la puissance du SNR de ce détecteur.

### Réponse

La puissance d'entrée est  $P_0 = 0.01 \times 10^{-6} = 10^{-8} \text{W}$ . Le courant du signal est :

$$I_{ph} = \eta \frac{P_0 q \lambda}{hc} = 6.44 \times 10^{-9} \text{ A}$$

Pour calculer le SNR, on doit déterminer les valeurs des trois courants de bruit :

a) le bruit d'obscurité (voir la formule 3.53) :

$$I_{n-d} = \sqrt{(2qI_s B)} = \sqrt{(2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^{-9} \times 10^8)} = 4 \times 10^{-10} \text{ A}$$

b) le bruit de grenaille (voir la formule 3.54) :

$$I_{n-s} = \sqrt{2qI_{ph} B} = \sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 6.44 \times 10^{-9} \times 10^8} = 4.54 \times 10^{-10} \text{ A}$$

c) le bruit de Johnson (voir la formule 3.55) :

$$I_{n-j} = \sqrt{4kTB/R_{sh}} = \sqrt{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times 10^8} = 1.28 \times 10^{-10} \text{ A}$$
$$I_n = \sqrt{I_{n-d}^2 + I_{n-s}^2 + I_{n-j}^2} = 6.18 \times 10^{-10}$$

En appliquant la relation (3.56), on détermine le SNR :

$$SNR = \frac{I_{ph}^2}{I_{n-d}^2 + I_{n-s}^2 + I_{n-j}^2} = \frac{I_{ph}^2}{I_n^2} = 108$$

#### 3.3.5.4 le bruit d'excès

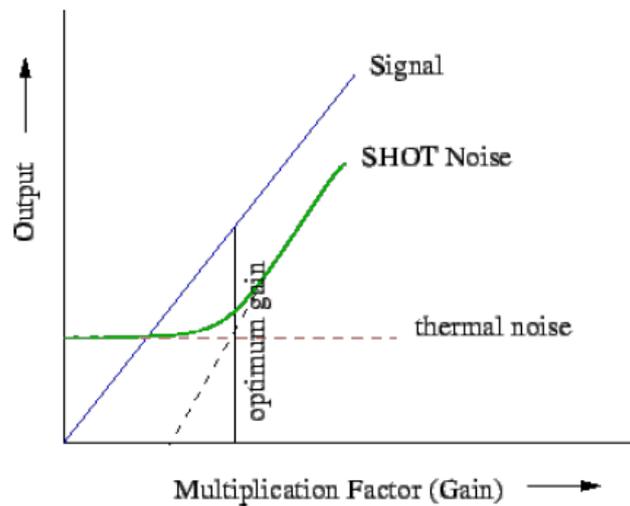
Le processus d'ionisation par impact dans une photodiode APD est un processus aléatoire. Ça mettra le facteur de multiplication lui-même aléatoire. Et se varie entre sa valeur moyenne.

Quand le gain APD s'augmente, le signal de sortie s'augmente linéairement. Cependant, le courant de bruit s'augmente comme montrer ci-dessous. Le niveau de bruit qui découle la fluctuation dans  $M$  est appelé le **bruit d'excès**.

Si  $I_{ph}$  et  $I_s$  sont respectivement, le photocourant et le courant dans l'obscurité dans l'absence de multiplication, le bruit de courant estimé dans une photodiode APD est donné par

$$I_{n-APD} = [2q(I_s + I_{ph})M^2FB]^{1/2} \quad (3.58)$$

Dont  $F$  est appelé le facteur de bruit d'excès.  $F$  est déterminé expérimentalement et est en fonction de  $M$ .



**Figure 3.31:** la puissance de sortie en fonction du facteur de multiplication [14]

### Exemple d'application :

Supposons une photodiode avalanche (APD) à un facteur de bruit d'excès  $F = M^{0.7}$ . cette APD est polarisée avec un facteur de multiplication de  $M = 5$ . Le courant d'obscurité dans l'absence de multiplication est 25 ns et la bande passante égale 50 MHz. Si l'efficacité quantique de non multiplication est 0.8 et la longueur d'onde est 1500 nm.

Déterminer la puissance optique minimale qui donne un SNR égale 10 (négliger le bruit thermique).

## Réponse

Le bruit d'obscurité est donné par :

$$I_{n-d} = \sqrt{2qI_s M^{2.7} B} = 5.55 \times 10^{-9} A$$

Le SNR est donné par :

$$SNR = \frac{M^2 I_{ph}^2}{[2q(I_{n-d} + I_{ph})M^{2.7} B]} = 10$$

Cela donne une équation quadratique s'écrit comme suivant :

$$I_{ph}^2 - 1.23 \times 10^{-8} I_{ph} - 5.55 \times 10^{-8} = 0$$

$$I_{ph} = 0.47 \times 10^{-4}$$

Et la sensibilité R est donnée par :

$$R = \eta q \frac{I_{ph} \lambda}{hc} = 0.97$$

$$P_0 = \frac{I_{ph}}{R} = 4.8 \times 10^{-5}$$

## Chapitre 04 : Système de transmission par fibres optiques

### 4.1 Schéma synoptique d'une chaîne de transmission optique

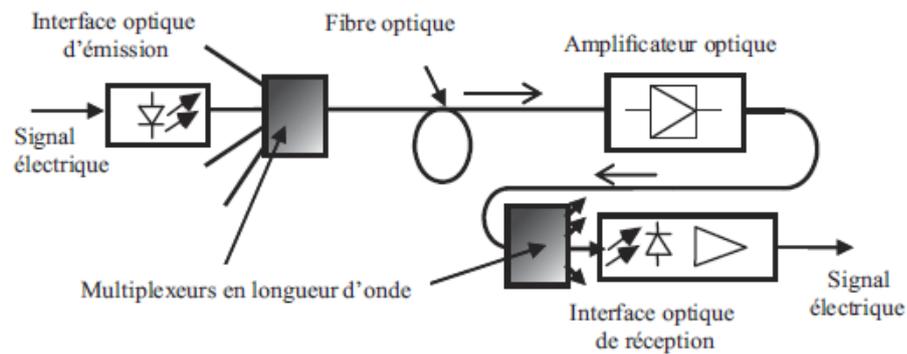
Dans une liaison point à point, en plus de la fibre étudiée théoriquement dans le chapitre 2 (fibres multimodes) et (fibre monomode). On trouve (figure 4.1) :

**A – l'interface optique d'émission** (parfois appelé TOSA, *transmitter optical subassembly*) qui a pour rôle de transformer le signal électrique en signal optique. Il contient principalement le composant optoélectronique d'émission, qui peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL). L'interface contient également des circuits d'adaptation et de protection ; il est relié au câble optique soit par une embase de connecteur, soit par une fibre amorce qu'il faut raccorder.

La modulation est classiquement une modulation d'intensité lumineuse obtenue par la modulation du courant qui traverse la diode d'émission, remplacée, à très haut débit (40 puis 100 Gbit/s et plus), par une modulation externe en phase optique et/ou amplitude (modulation cohérente) ;

**B – l'interface optique de réception** (ROSA, *receiver optical sub assembly*) qui contient une photodiode qui convertit le signal optique reçu en signal électrique, suivie d'un préamplificateur, dont la réalisation doit être soignée car c'est en général le bruit de celui-ci qui limite la puissance optique minimale détectable, et donc la portée du système. On trouve ensuite des circuits d'amplification, de filtrage et éventuellement de remise à niveau logique. Ces deux interfaces sont en général appariées dans un module appelé *transceiver* ;

**C – des répéteurs** : lorsque la longueur de la liaison le nécessite, on insère un ou plusieurs répéteurs. Les répéteurs- régénérateurs des premières liaisons (posées avant 1995) contenaient des interfaces de réception et d'émission, reliées par des circuits électroniques d'amplification et de régénération, d'où une discontinuité dans le signal et un obstacle à la croissance des débits. Les liaisons actuelles, terrestres et sous- marines, utilisent des amplificateurs optiques à fibres dopées Erbium (EDFA, *erbium doped fiber amplifiers*), et sont entièrement optiques sur des distances qui peuvent dépasser 12 000 km (toutefois, ces amplificateurs ne régénèrent toujours pas le signal).



**Figure 4.1 :** Liaison point à point sur fibre optique.

## 4.2 Raccordement des fibres optiques

Dans l'établissement d'une liaison par fibre optique on est contraint de relier :

- La source émettrice à la fibre optique (fibre amorce).
- Les fibres optiques entre-elles.
- La fibre optique au récepteur optique

On distingue 3 méthodes de raccordement des fibres optiques :

- Jointage :** Consiste à souder deux fibres entre-elles, bout à bout, par fusion des matériaux constituant en utilisant une fusionneuse automatique (affaiblissement 0,15dB maxi).
- Epissurage** Consiste, comme précédemment à assembler bout à bout deux fibres, et de coller le tout par l'apport d'une colle spéciale de même indice optique que les fibres à raccorder (affaiblissement 0,3dB maxi).
- Connexion amovible** Consiste à utiliser deux pièces mécaniques qui s'emboîtent ou se vissent pour amener les deux fibres en vis-à-vis.

## 4.3 Types de connecteurs

Les connecteurs les plus utilisés sont :

Le connecteur à baïonnette **ST ou ST2**: il utilise un système de verrouillage à baïonnette. C'est le connecteur le plus courant. Sa fêrûle en céramique garantit de hautes performances.



Le connecteur à encliquetage de type **push-pull' SC**. Il possède un corps surmoulé et un système de verrouillage à pousser et tirer. Il est parfait pour les applications de bureau, la télévision par câble et la téléphonie.



Le connecteur **FDDI**. Il présente une fêrule flottante en céramique de 2,5mm et une jupe fixe afin de réduire les pertes lumineuses.

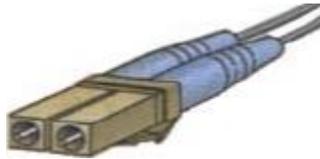
Un capot fixe entoure la fêrule pour la protéger.



Le connecteur **MT-RJ**. Il présente un verrouillage RJ similaire aux cordons souples Catégorie 5 et téléphoniques ; il possède un corps moulé et s'installe par simple encliquetage.



Le connecteur **LC**. Au facteur de forme réduit, il comporte une fêrule céramique et ressemble à un mini-connecteur SC.



Le connecteur **SMA905**. Il utilise une bague fileté. Il suffit de le visser en place. Au bout de sept tours complets environ, il est verrouillé.



Le connecteur **SMA906**. Il utilise également une bague fileté. Notez que la forme de la baïonnette s'adapte aux équipements pourvus de prises SMA905.



Chaque connecteur contribue à l'affaiblissement de la liaison, en général 0,15 à 0,3dB.

**Remarque :**

- 1° Le connecteur **ST** est de moins en moins utilisé pour les réseaux optiques en intérieur et extérieur.
- 2° Le connecteur **LC** est un petit connecteur **SC**. Ainsi, avec les mêmes propriétés, on peut le placer dans des endroits plus difficiles d'accès.
- 3° Le connecteur **SC** est préféré pour les applications de bureau, de TV ou de téléphonie câblée et d'applications réseau. De plus, il offre un faible coût, une simplicité et une durabilité.
- 4° Le connecteur **FC** fut un connecteur de choix dans toutes les fibres monomodes.

## 4.4 Les différents types de liaison optique

### 4.4.1 Liaison point à point

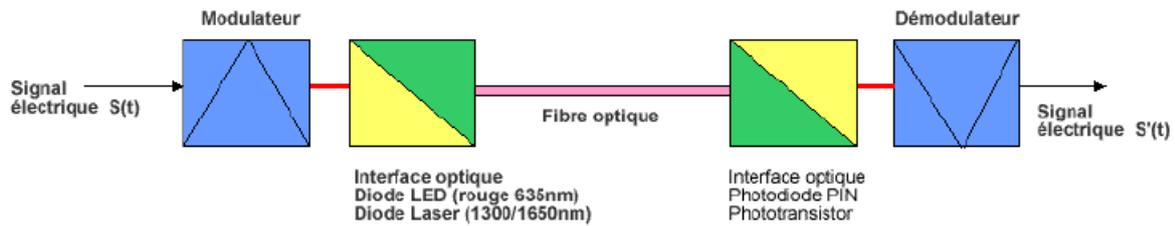


Figure 4.2 : liaison de transmission optique, cas générale [10]

- L'interface optique d'émission permet de convertir le signal électrique en un signal optique en utilisant une diode émettrice à semi-conducteur.
- L'interface optique de réception permet de convertir le signal optique en un signal électrique en utilisant une photodiode ou un phototransistor.

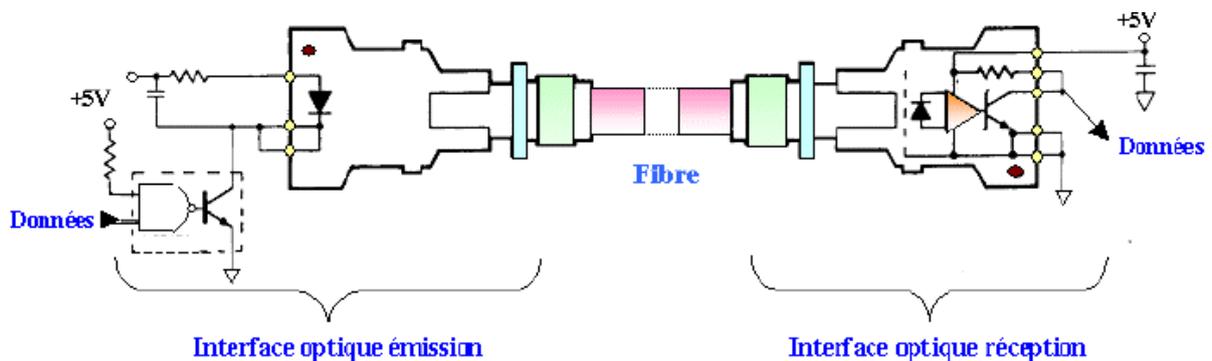


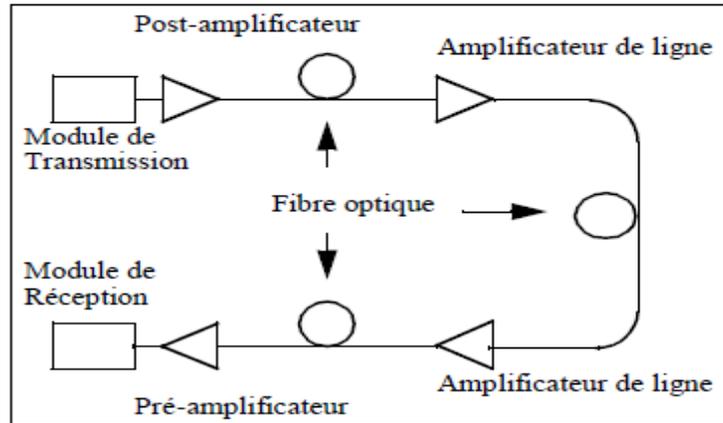
Figure 4.3 : liaison de transmission optique, interface optique de transmission /et interface optique de réception [10]

### 4.4.2 Liaison avec amplificateurs optique EDFA

L'amplificateur optique est un dispositif qui assure l'amplification du signal tout en restant dans le domaine optique.

Deux types d'amplificateurs optiques ont aujourd'hui des applications clairement identifiées :

L'amplification optique peut avoir lieu en trois points d'une liaison qui correspondent aux trois applications principales d'un amplificateur optique comme indiqué à la figure 4.4

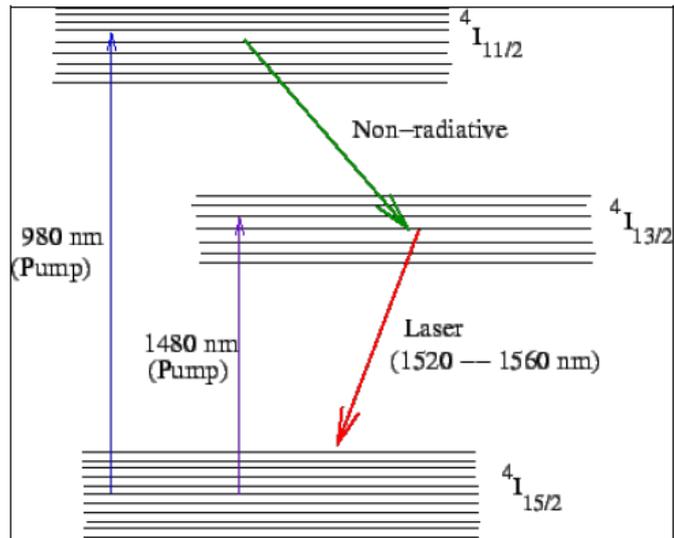


**Figure 4.4 :** Applications de l'amplificateur optique [17].

- Le post-amplificateur placé à la sortie du module de transmission a pour rôle d'augmenter la puissance de sortie de l'émetteur et donc d'accroître d'autant le budget total de la liaison.
- Les amplificateurs en ligne ont pour fonction de compenser l'atténuation du signal par la fibre et les différentes pertes encourues.
- Le préamplificateur situé à l'entrée du module de réception permet d'augmenter en même temps la sensibilité du récepteur et le budget de la liaison ; ici la minimisation du facteur de bruit est très recherchée.

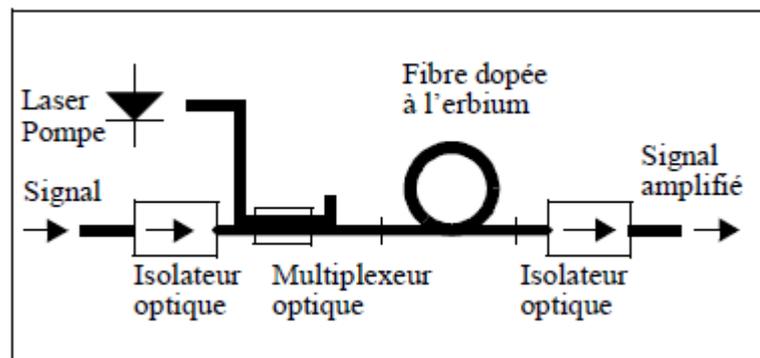
### **Amplificateur EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)**

- La fibre optique a un minimum d'atténuation à la longueur d'onde 1550 nm.
- Les systèmes optiques de transmission à haut débit utilisent généralement la longueur d'onde 1550 nm.
- Il est utile de déterminer un amplificateur à amplifier un signal lumineux de longueur d'onde 1550 nm.
- Il sont trouvés que les ions d'Erbium ont un niveau d'énergie d'excitation séparer l'état de masse par une différence d'énergie correspond 1550 nm. (Voir figure 4.5)



**Figure 4.5 :** Etats d'énergie d'un ion Erbium [17]

- Le pompage est réalisé optiquement par couplage dans la fibre optique d'un flux lumineux puissant provenant d'une diode laser de pompe. Les longueurs d'onde d'une pompe sont celles qui permettent les transitions vers les états excités de l'erbium. 980 nm et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe les mieux adaptées et, les diodes lasers à ces longueurs d'onde sont disponibles.
- Alors, le milieu amplificateur dans EDFA est le cœur d'une fibre optique monomode dopée avec des ions de terre rare. Pour l'amplification autour de 1550 nm, fenêtre de faible atténuation des fibres optiques en silice, les dopants sont des ions  $Er^{3+}$  comme montre la figure suivante.



**Figure 4.6 :** Configuration d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium avec pompage optique [17]

Et un schéma pratique de ce type d'amplificateur :

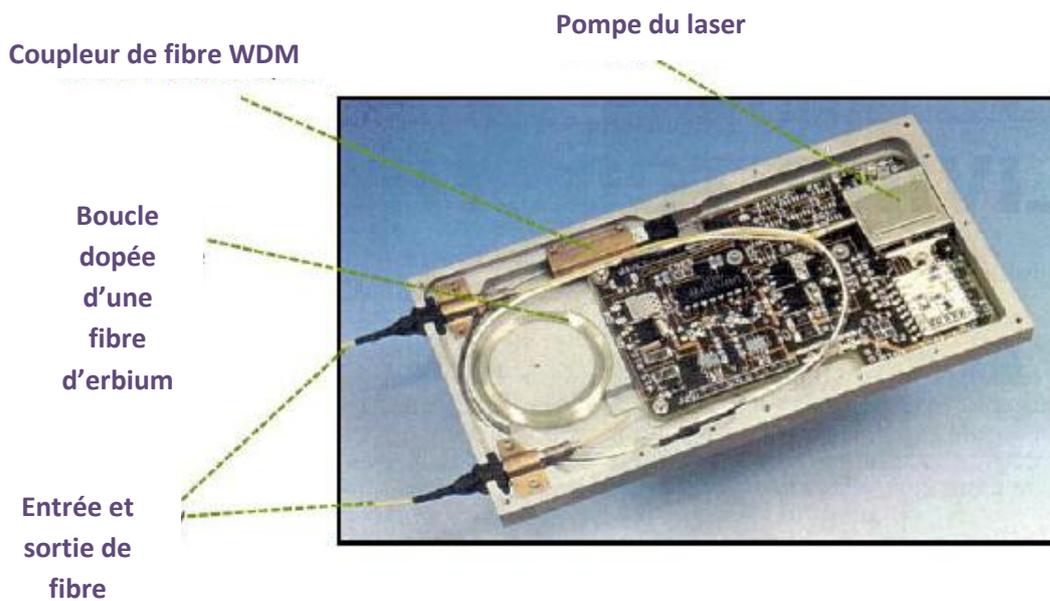


Figure 4.7 : une photo d'un amplificateur EDFA [15]

#### Comment le signal est-il amplifié ?

- L'EDFA consiste en un morceau de fibre optique monomode dopée, de longueur d'environ 10 - 20 m et d'une diode laser de pompe.
- La lumière provenant de la pompe excite les ions  $Er^{3+}$  au niveau d'énergie supérieur, ce qui permet de réaliser l'inversion de population.
- **Le multiplexeur optique** sélectif en longueur d'onde effectue le couplage dans la fibre dopée à l'erbium du signal à transmettre et du signal de pompe.
- **Les isolateurs optiques** permettent d'éviter les oscillations et d'assurer la stabilité des caractéristiques du gain en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de revenir en aval.

#### 4.4.3 Liaison multiplexée à WDM

Le principe du multiplexage en longueur d'onde est donc d'injecter simultanément dans une fibre optique plusieurs trains de signaux numériques sur des longueurs d'ondes distinctes. La fibre optique se prête d'autant plus à cela que sa bande passante est très élevée (de l'ordre de 25000GHz).

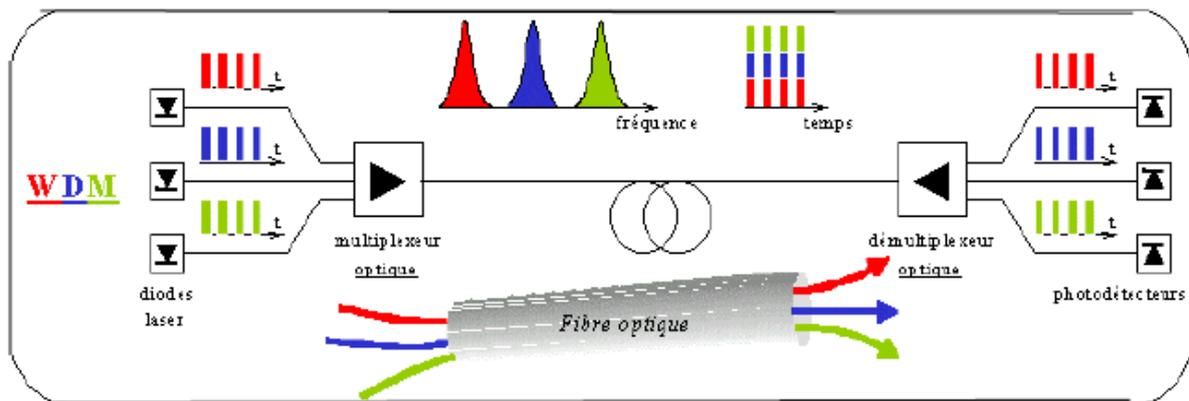
La norme ITU-T G692 définit la plage de longueurs d'ondes dans la fenêtre de transmission de 1530 à 1565 nm et un espacement normalisé entre deux longueurs d'ondes de 1,6 ou 0,8 nm.

Le multiplexage de longueur d'onde se fait exclusivement sur fibre monomode.

Lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'ondes est égal ou inférieur à 0,8 nm ou lorsque plus de 16 canaux sont utilisés, on parle alors de DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

Des tests ont déjà été effectués avec des espacements de 0,4 et 0,2nm.

Aujourd'hui, il est possible d'atteindre des débits pouvant aller de 10 à 200 Gbits/s. En effet, il existe des systèmes proposant de 4 à 80 canaux optiques à 2,5 Gbit/s par canal.



**Figure 4.8 : Principe d'une liaison WDM/DWDM**

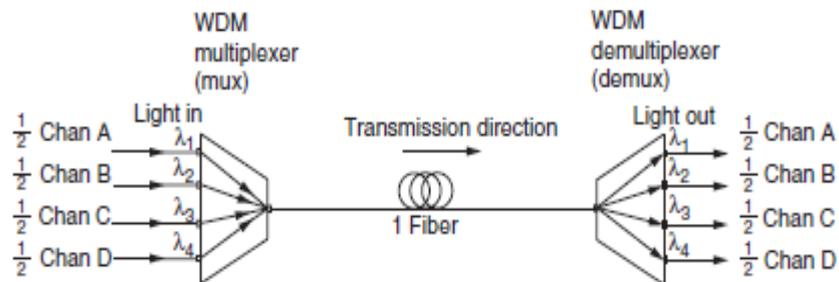
A chaque multiplexage ou démultiplexage de longueur d'onde, il y a des pertes appelées pertes d'insertion. Pour compenser ces pertes et également réduire le bruit, on utilise un amplificateur à fibre dopée erbium, EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier).

Mais il y a d'autres perturbations qui déforment le signal. En effet, des phénomènes non linéaires se produisent lors de la propagation du signal dans la fibre. Il apparaît des risques de diaphonie et de mélange des canaux. C'est pourquoi la technologie WDM nécessite des amplificateurs tous les 50 à 100 km.

#### 4.4.3.2 Des exemples de configurations d'une liaison WDM :

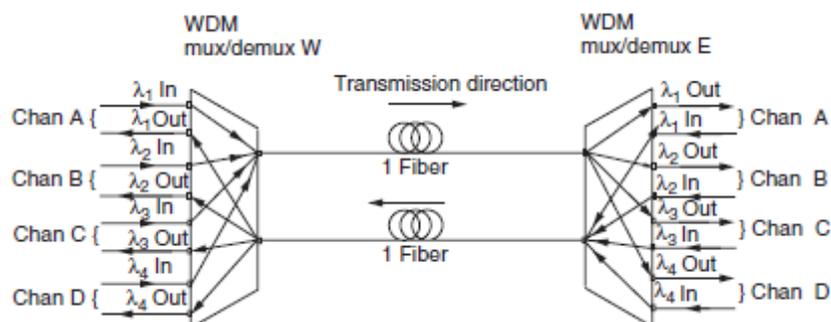
Les quatre types de base d'un système WDM sont : unidirectionnel, universel, bidirectionnel, et multiplexeur optique à insertion et extraction (où : OADM : optic add/drop multiplexer).

- Liaison de multiplexage WDM unidirectionnel permettre une transmission dans une seule direction. Dont lesquelles les ports de canaux sont connectés à un porte commun et le porte commun est connecté aux ports de canaux. Les ports de canaux dans le MUX unidirectionnel sont désignés comme (les ports d'entrées) et connecter à des diodes laser. Les ports de canaux dans le DEMUX unidirectionnel sont désignés comme les ports de sorties et connecter à l'équipement de réception. Les systèmes WDM unidirectionnel sont généralement installés comme une paire de MUX/DEMUX par des ports communs connectés entre eux par une fibre optique monomode comme est montré à la figure 4.9.



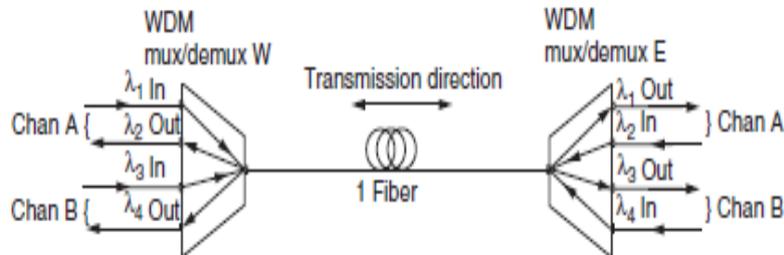
**Figure 4.9 :** Liaison d'un système WDM à 4  $\lambda$  de transmission unidirectionnel [7]

Une configuration commune d'un WDM unidirectionnel est composée par une double unité de MUX / DEMUX unidirectionnel. Ici les deux MUX et DEMUX sont combinés dans une seule unité dans chaque extrémité de la liaison comme montre la figure 4.10. Ce type de liaison nécessite deux fibres pour faire s'installer ce système. Chaque fibre fait la transmission dans une seule direction. Les ports du canal sont marqués comme ports d'entrées et de sorties.



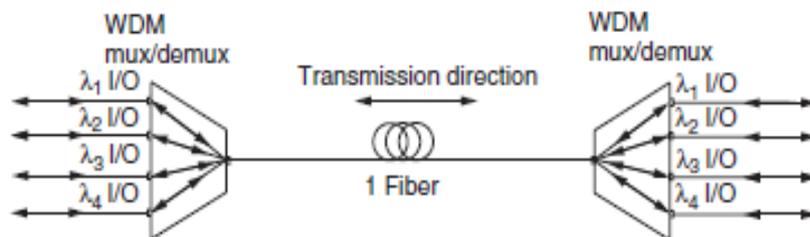
**Figure 4.10 :** Liaison d'un système de Mux / Demux WDM de 4 canaux de transmission unidirectionnel [7]

Un système WDM bidirectionnel permet une transmission dans les deux directions mais le composant laser et les récepteurs optique devront connecter dans les ports d'entrées et de sorties appropriés (figure 4.11).



**Figure 4.11** : Liaison d'un système WDM de 4  $\lambda$  à transmission bidirectionnel [7]

Le système WDM universel permet une transmission dans les deux directions dans n'importe quel port du canal et dans le port commun. Les unités peuvent fonctionner comme MUX ou DEMUX et peuvent être s'insérer dans les deux extrémités de la liaison, (voir figure4.12).



**Figure 4.12** : Liaison d'un système WDM Universel à 4 $\lambda$  [7]

#### 4.4.3.2 Une liaison typique d'un système WDM

Le schéma ci-dessous montre un multiplexage de 4 systèmes de transmission différents à l'aide d'un multiplexeur d'une capacité de 100 Gbs, les systèmes multiplexés sont :

- Un débit de 2.5 Gb généré par la technologie SONET
- Un protocole Giga Ethernet généré par un commutateur.
- Un débit de 155 Mb/s généré par un réseau ATM.
- Un débit de 10 Gb/s généré par un routeur.

Les ports des équipements de transmission se composent par un port de transmission et un port de réception, dont lesquelles les ports de transmission sont combinés à l'aide d'un multiplexeur, et les ports de réception servent à recevoir les données recombinaées par un autre multiplexeur.

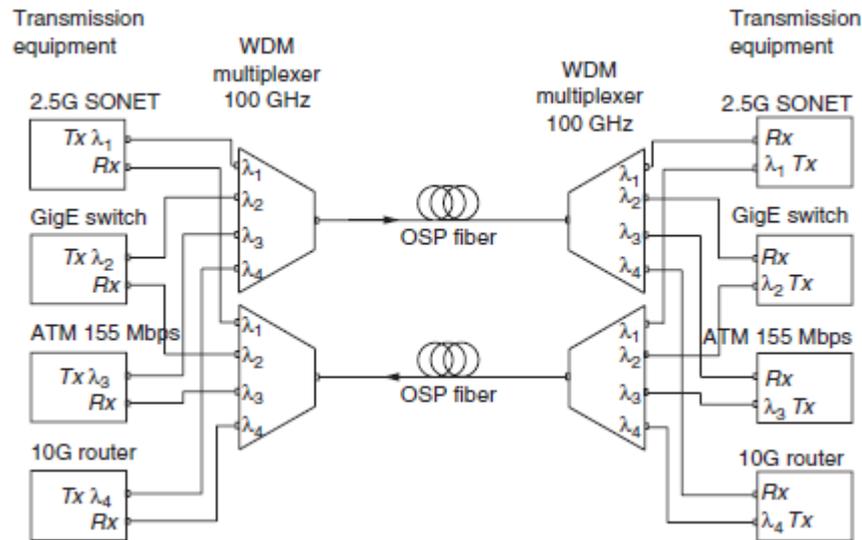


Figure 4.13 : Un exemple typique d'une liaison WDM à 4 canaux [7]

#### 4.4.3.3 Comparaison entre les CWDM et DWDM

- CWDM : Coarse (coarse = large) : lorsque le simple multiplexage de deux longueurs d'ondes (1310nm/1550nm) ne suffit pas à répondre au besoin de bande passante.
- DWDM (D = dense) lorsque le multiplexage CWDM ne suffit pas à répondre au besoin de bande passante ; ou pour de longues distances nécessitant amplification.

Paramètres	CWDM	DWDM
Longueur d'onde par FO	8-16	40-80
Espace entre $\lambda$	2500 GHz	100 GHz
Capacité par chaque $\lambda$	2.5 Gbps	10 Gbps
La capacité total dans la FO	20 – 40 Gbps	100 – 1000 Gbps
Application	Metro Accès	Metro Core, Long-Haul
La distance maximale	11 – 15 km	20 – 30 km

Tableau 4.1 : Certains paramètres du CWDM et DWDM [23]

### Remarque :

La WDM est dite DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) quand l'espacement utilise est inférieur ou égale à 0,8 nm, ou plus de 16 canaux sont utilisés. Un système a 16 canaux de 2.5Gbits/s, soit au totale 40Gbit/s, ce qui implique l'acheminement de 5.105 conversations téléphoniques. On s'attendra à un accroissement du débit offert sur chaque canal pourront vite atteindre 10Gbit/s.

#### 4.4.3.4 Cas particulier : Multiplexeur optique a insertion et extraction (Optical Add /Drop MuX) :

Un OADM permet d'extraire un ou plusieurs signaux à travers un flux de signaux multiplexés transitant à différentes longueurs d'onde et/ou de les introduire sans risquer de chevaucher avec les signaux déjà présents dans le flux. Les OADM couples avec la technique de multiplexage en longueur d'onde WDM offrent l'avantage de rallier rapidité et efficacité dans la manipulation des flux optiques.

Sans les OADM, on aurait eu besoin de placer un nœud à chaque site ou on envisagerait d'extraire ou d'introduire un signal dans le flux, ce qui mobiliserait à l'évidence plus d'investissement

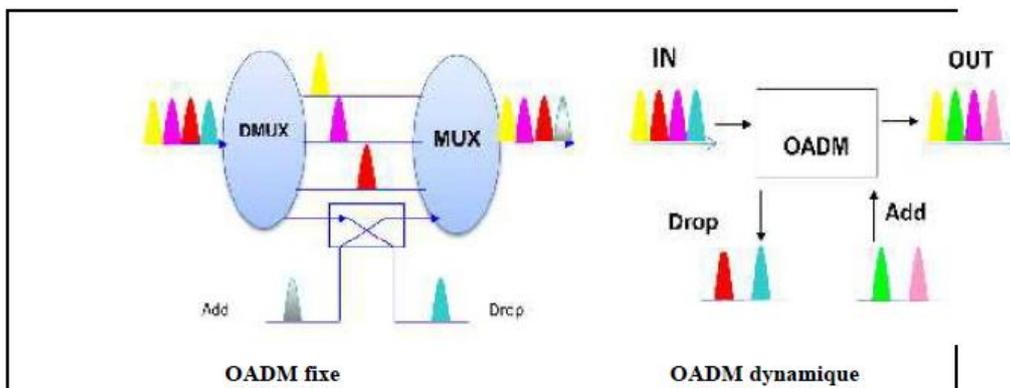


Figure4.14 : Multiplexeur a insertion/extraction (Add/Drop).

#### 4.4.4 Liaison de multiplexage à OTDM

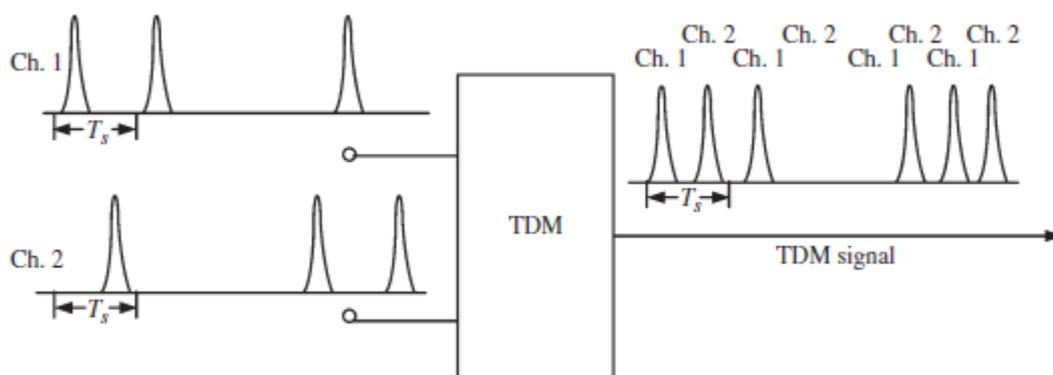
Dans le cas de multiplexage en fréquence, des flux parallèles de données sont modulés par porteuses ayant différentes fréquences ou les flux ne se chevauchent pas entre eux. Maintenant, on parle de d'autre type de multiplexage, c'est le multiplexage en temps (OTDM, Optic Time Division Multiplex). Dont les flux de données multiplexés peuvent être convertit en série de tel façon ces flux ne se chevauchent pas en temps. La figure 4.15 illustre deux canaux de TDM. Posons  $T_s$  est la durée de symbole pour un flux de données individuel

correspond à un taux de symbole  $B_s = \frac{1}{T_s}$ . TDM converti les flux de données parallèles en un flux de données en série dont les deux symboles sont d'une durée de symbole  $T_s$ , comme montré dans la figure 4.15. Pour éviter le chevauchement temporel, la largeur des impulsions devront être inférieure à  $\frac{T_s}{2}$ . Dans cet exemple, le taux de symbole total est  $2B_s$ . en générale, pour un système TDM à N canaux. Les largeurs des impulsions devront être inférieurs à  $\frac{T_s}{N}$  et le taux de symbole est  $NB_s$ .

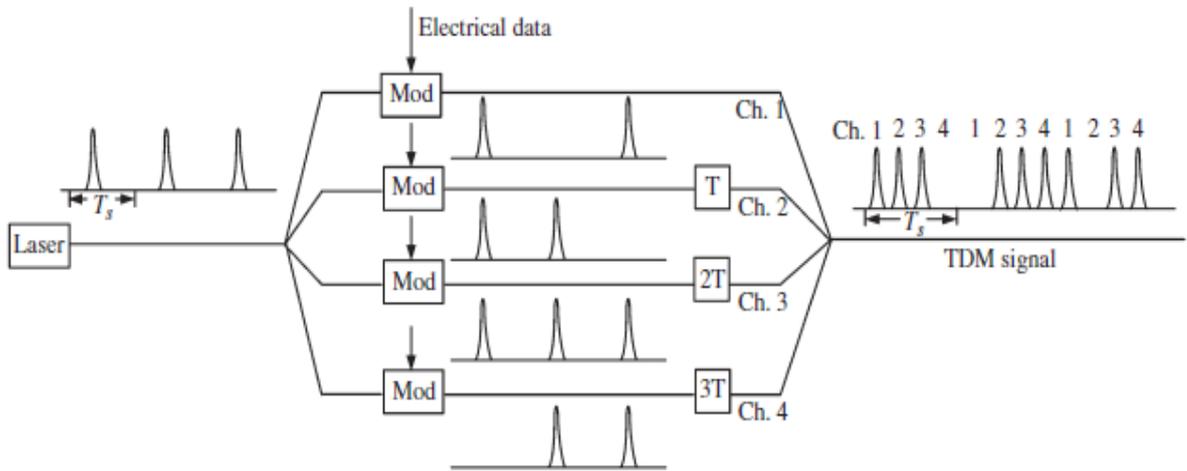
TDM peut être effectué soit en domaine électrique ou optique. Cependant, comme le taux de données s'augmente au-delà de 40Gb/s, donc TDM en électrique est devenu difficile à réaliser à cause des limitations imposées par la grande vitesse en électronique. autrement, les canaux peuvent être multiplexés dans le domaine optique, ça est appelé TDM optique (ou OTDM). Et en tant que les composants optique ont une grande bande passante, OTDM peut être utiliser pour atteindre un grand taux de données (des teras bits par seconde).

### Multiplexage :

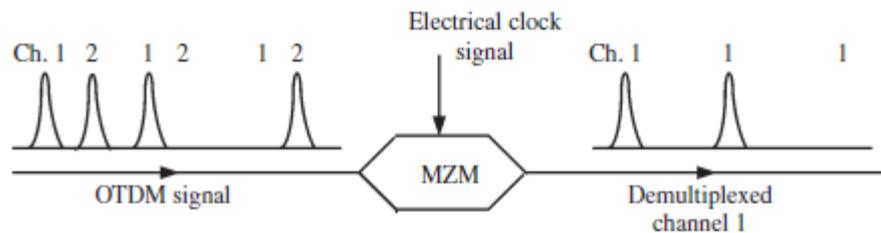
Afin de réaliser une liaison OTDM, les composants nécessaire sont un laser génère des courtes impulsions et des lignes à retards. La figure 4.16 montre un système OTDM composé de 4 canaux. Un train des impulsions de courte durées est divisé en 4 branches. Chaque branche est modulé par des données électriques. Pour éviter le chevauchement temporel des canaux, (un canal  $j$ ,  $j=1, 2, 3, 4$ ), ces derniers sont retardés par  $(j-1)T$ , dont  $T = \frac{T_s}{4}$ , en utilisant des lignes à retard, les lignes des retards peuvent être réalisés en utilisant des segments de fibre. La sortie de toutes les branches est combinée afin d'obtenir un signal TDM.



**Figure 4.15:** un schéma d'un système TDM de deux canaux [7]



**Figure 4.16:** un schéma OTDM de 4 canaux = Modulateur optique et T fait référence d'un retard de  $\frac{T_s}{4}$  [7]



**Figure 4.17:** un schéma d'un démultiplexeur OTDM. MEM = Mach-Zehnder Modulator [7]

### Démultiplexage:

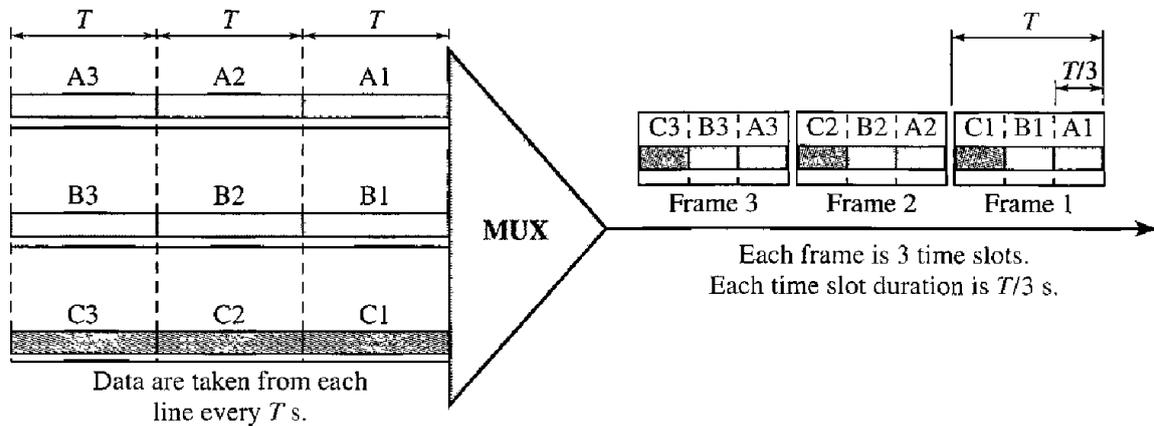
La figure 4.17 montre un schéma de démultiplexage d'un OTDM de deux canaux. Le MZM est commandé par un signal électrique à un taux d'horloge de  $B_s$ . Pour démultiplexé le canal 1, l'amplitude de la tension électrique commandée est choisie pour que le canal 1 soit au pic de la transmittivité du MZM et le canal 2 soit nul. Par conséquent, le modulateur transmette le canal 1 sans atténuation significative et rejette le canal 2. Un similaire MZM avec un retard approprié transmette le canal 2 et rejette en même temps le canal 1. MZMs peuvent être facilement mise en cascade pour démultiplexer un canal à partir d'un signal OTDM de N-canaux.

### Exemple d'application :

Dans la figure suivante, le taux de données de chaque connexion d'entrée au MUX est de **1kb/s**, si 1 bit à un temps donné est multiplexé (l'unité est 1 bit).

**A) Déterminer :**

- 1) la durée de chaque time slot (TS) d'entrée ?
- 2) la durée de chaque TS de sortie ?
- 3) la durée de chaque trame générée par le MUX?

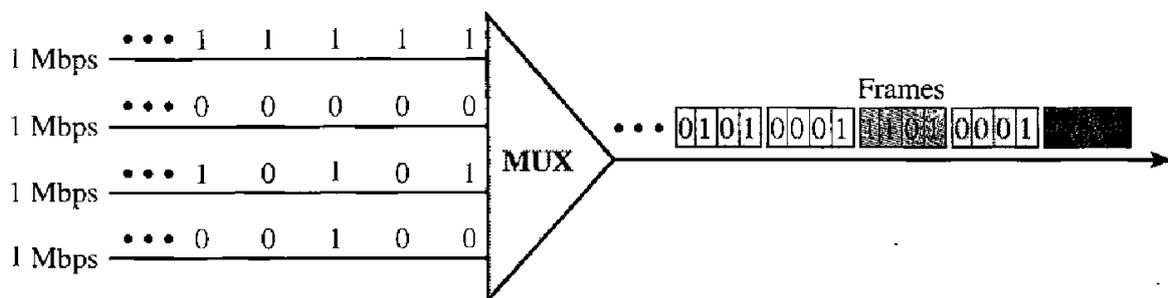


**Figure 4.18 : Mux OTDM de trois liaisons [3]**

La figure suivante montre un TDM synchrone avec un flux de données pour chaque liaison d'entrée et un seul flux en sortie. L'unité de donnée est **1 bit**.

**B) Déterminer :**

- 1) la durée d'un bit d'entrée ?
- 2) la durée d'un bit de sortie ?
- 3) le taux binaire en sortie ?
- 4) le taux de génération des trames sorties par la liaison?



**Figure 4.19 : Mux OTDM de 4 liaisons ayant un débit de 1 Mbps [3]**

**Réponse :**

**A)**

1) La durée de chaque TS d'entrée est :

$$T_s = \frac{1}{1000} = 1 \text{ ms}$$

2) La durée de chaque TS de sortie :

En tant que on a 3 liaisons multiplexés :

$$\text{Alors : la durée } TS_{\text{sortie}} = \frac{1 \text{ ms}}{3} = 0.33 \text{ ms.}$$

3) La durée de chaque trame :

Chaque trame est composée de 3 times slot de sortie.

$$\text{Donc, leur durée est : } 3 \times \frac{1}{3} = 1 \text{ ms}$$

Remarque : la durée d'une trame c'est la même que la durée de l'unité d'entrée.

**B)**

On voit bien dans **la figure 4.19** que chaque liaison génère un débit de 1Mbps et sachant que l'unité d'entrée est de 1 bit.

1) la durée d'un seul bit d'entrée :

$$\text{durée (TS)}_{\text{d'entrée}} = \frac{1}{1 \text{ Mbps}} = 1 \mu\text{s.}$$

2) la durée d'un seul bit dans la trame de sortie :

$$\text{durée (TS)}_{\text{sortie}} = \frac{1}{4} = 0.25 \mu\text{s.}$$

3) le taux de données binaire généré par le MUX :

$$D = \frac{1 \text{ bit}}{4 \mu\text{s}} = 4 \text{ Mbps}$$

4) Le taux des trames de sorties :

C'est-à-dire on calcule le taux de génération de 4 bits (qui forme une trame) dans une seconde.

Par conséquent : Taux de trame = 1 Mbps

## **Chapitre 05 : Réseaux sur fibres optiques**

### **5.1 Les réseaux optiques**

Le réseau à base de fibre optique peut-être actif ou passif. Il est actif lorsqu'il existe entre le central office (CO) et l'abonné, au moins un dispositif nécessitant une alimentation électrique (répéteur pour compenser les pertes induites par la distance, ou système d'aiguillage actif). Dans ce cas, on parle de réseau type AON (Active Optical Network).

Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsqu'aucun dispositif actif n'est interposé entre le CO et l'abonné, il est dit PON (Passive Optical Network ou Réseau Optique passif). Dans ce cas, comme on n'utilise que des composants passifs (répartiteurs et coupleurs optiques), on réduit considérablement les coûts d'installation et de maintenance vu que les équipements sensibles (ayant besoin de maintenance) sont situés aux deux bouts de la chaîne de transmission. Même si la pose de la fibre optique (génie civil), est très coûteuse pour l'installation du PON, cette solution est indispensable pour répondre aux besoins en comparaison aux technologies câblées ou sans fil déjà déployées. C'est ce qui la rend attractive aux yeux des opérateurs et équipementiers télécoms.

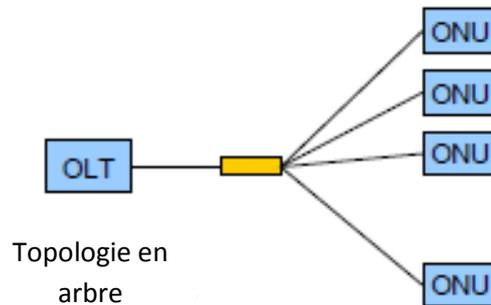
Les tous premiers travaux sur le PON ont débuté en 1990 avec le groupe FSAN (Full Service Access Network) qui fixa les premières spécifications du PON basées sur l'ATM (Asynchronous Transfer Mode) devenu A-PON (Asynchronous PON) normalisé ITU-T G.983.1. L'adaptation de l'A-PON pour le haut débit par le FSAN en 1998 a constitué les premières recommandations du B-PON (Broadband PON) normalisé ITU-T G.983.x. Dès 2001, le groupe IEEE déploie l'E-PON (Ethernet PON) normalisé IEEE 802.3ah avec sa technologie EFM (Ethernet First Mile) existante, légèrement modifiée pour être compatible PON. Deux ans plus tard, le FSAN proposa ses premières recommandations pour le G-PON (Giga-PON) des standards ITU-T G.984.x. Dans ce qui suit, nous présenterons les architectures PON existantes avec les techniques de multiplexage que l'on pourrait rencontrer dans ces types de réseau.

### **5.2 Les topologies de base des réseaux PON:**

Il y-a deux topologies principales pour les réseaux PONs, appelés :

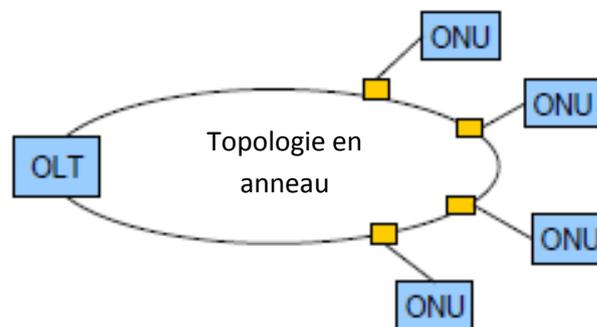
- a-** Topologie d'arbre.
- b-** Topologie en anneau.

**Dans la topologie d'arbre**, le signal optique se transmette à partir d'un OLT (Optical Line Terminal) et se divise à un nœud distant. Puis délivrer à la destination ONU (Optical Network Unit) via des fibres.



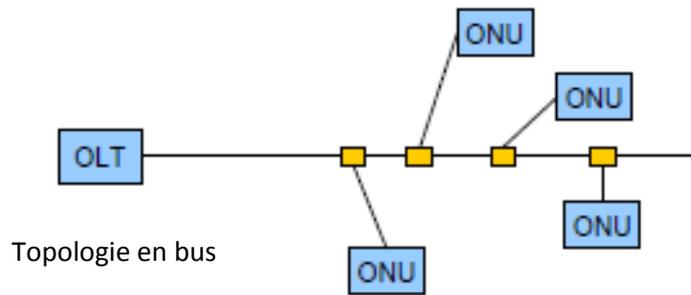
**Figure 5.1:**Topologie en arbre

Pour **les topologies en anneau**, l'OLT est connecté à multiple nœud d'accès (ou AN : Access Nodes) via un seul ou double anneau de fibres. Chaque AN compris un multiplexeur d'insertion et d'extraction (appelé OADM : Optical add drop multiplexer) ou simplement un diviseur de puissance optique. Dont les multiples ONU sont en outre connectés, soit dans une topologie d'étoile ou d'anneau.



**Figure 5.2 :** Topologie en anneau

En addition des autres topologies, il y-a d'autres topologies comme topologie en bus et en étoile. La topologie de réseau généralement définit la façon d'installation des chemins ou la façon de connexion entre l'OLT, et l'ONUs dont elle influence sur la protection du trajet de lumière et la fibre devra être dupliqué et incorporé.



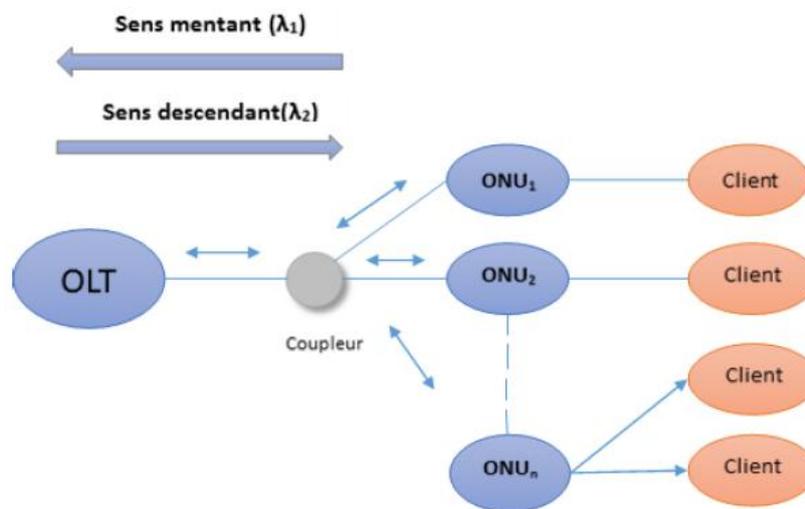
**Figure 5.3 :** Topologie en bus

**A titre d'exemple**, dans un réseau PON avec une topologie d'arbre, n'importe qu'elle fibre est coupée ce qui rendra l'ONU inaccessible par l'OLT.

Et ainsi, dans un réseau avec une topologie en anneau, n'importe qu'elle fibre qui sera coupée dans l'installation des fibres isolera le flux descendant provient par ANs au-delà de la position coupée sur le long de cet anneau. S'il n'a pas d'autre anneau de protection incorporé.

### 5.3 Etude des éléments d'un réseau optique passif

L'architecture d'un réseau optique passif PON est basée sur 3 éléments essentiels : OLT (Optical Line Terminal ou Terminaison de Ligne Optique), ONU (Optical Network Unit ou Unité de réseau optique), et l'élément passif qui est le coupleur ou (Splitter).



**Figure 5.4 :** Les éléments constitutifs du PON [19]

### **5.3.1 OLT (Optical Link Terminal)**

L'OLT est l'équipement maître d'accès optique pour des clients connectés au FTTx, un lieu de collecte permet de distribuer des services tel que : l'internet, la téléphonie et la vidéo, cet équipement est actif, placé au central, envoie et reçoit des signaux lumineux porteurs des données.

Le transmetteur optique est composé d'un module dont l'émetteur est généralement une diode LASER. Un récepteur qui permet d'adapter le seuil de décision de la photodiode en fonction des paquets de données reçues. L'OLT doit être conformes à la norme ITU.

### **5.3.2 ONT (Optical Network Terminal)**

L'ONT peut-être considéré comme un modem optique auquel le client vient connecter sa passerelle d'accès au haut débit. C'est un élément terminal du réseau optique.

L'ONU désigne un élément générique terminal du réseau d'accès optique FTTx. L'ONT se compose d'un module, d'un émetteur optique à base d'une diode LASER et un photorécepteur.

L'ONT est l'interlocuteur directe de L'OLT, les ONT émettent sur une même longueur d'onde pour des raisons de cout et de gestion des équipements.

### **5.3.3 Coupleur optique (splitter)**

On appelle coupleur le composant qui est intégré dans la ligne, assure la fonction diviseur ou concentrateur de la transmission. C'est un équipement passif qui nécessite aucune alimentation électrique, son fonctionnement est basé sur la seule propagation de la lumière à l'intérieur de la fibre.

Dans le sens montant le coupleur permet de combiner par addition les signaux optiques, dans le sens inverse (sens descendant) il divise le signal optique qui vient de L'OLT.

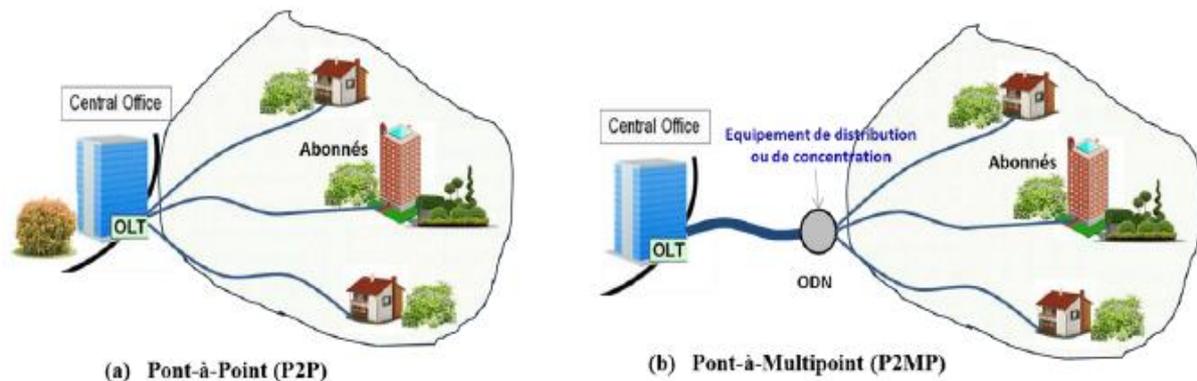
Le coupleur n'est pas capable d'aiguiller, de modifier, de retarder ou de bloquer les signaux qui le traversent.

#### 5.4 Les architectures du réseau PON :

La première architecture du réseau d'accès optique consiste à relier chaque abonné au (CO) par le biais d'une fibre optique. On parle d'architecture point-à-point (P2P). Dans cette architecture, chaque abonné bénéficie indépendamment de la totalité de la bande passante de son canal et le débit, facilement adapté selon l'utilisateur. Aucune forme de multiplexage n'est requise.

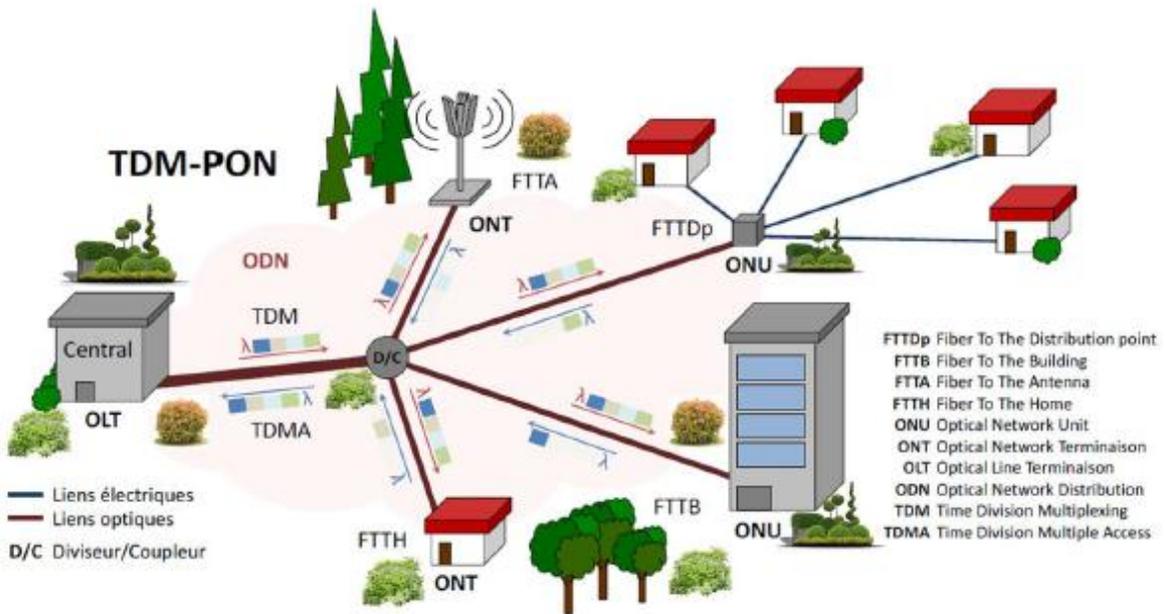
Une des alternatives pour réduire le coût de déploiement est d'utiliser une seule fibre pour alimenter plusieurs abonnés. Cela consiste à faire transiter dans une même fibre, les données des abonnés depuis le CO jusqu'au point d'éclatement d'où partent des fibres optiques vers chaque abonné. Il s'agit d'une architecture point-à-multipoints (P2MP : Point to Multipoint). Cette architecture nécessite au moins un ou plusieurs répartiteurs optiques et réduit le débit utilisateur, du fait du partage du support, mais elle reste la solution retenue car elle permet de réduire les coûts de déploiement.

La figure 5.6 présente un aperçu des deux architectures décrites précédemment.



**Figure 5.6:** Méthodes d'acheminement des données dans les PON [20].

La figure 5.7 montre un exemple de réseau d'accès optique P2MP où sont illustrées les terminologies du réseau PON avec les solutions FTTx pouvant être proposées à l'heure actuelle.



**Figure 5.7:** Terminologie du réseau d'accès optique passif et solutions FTTx [20].

Le central office (CO) se charge de traiter l'ensemble des données en émission ou en provenance des abonnés au moyen d'un émetteur et récepteur optique. Les données sont transportées par le biais d'une fibre unique jusqu'au point d'éclatement et de concentration (diviseur ou coupleur passif).

Du point d'éclatement, partent des fibres pour alimenter les différents abonnés. L'élément optique placé en bout du réseau optique est appelé ONU (Optical Network Unit) s'il est partagé entre plusieurs abonnés comme dans le cas du FTTB (Fiber To The Building) ou de FTDP (Fiber To The Distribution Point). L'ONT (Optical Network Termination) est l'élément optique installé chez l'abonné en technologie FTTH.

D'autres solutions FTTx sont proposées : FTTC (Fiber To The Curb), FTTN (Fiber To The Neighbourhood), FTTN (Fiber To The Node), FTTS (Fiber To The Street), FTTO (Fiber To The Office) ou la plus récente, FTTP (Fiber To The Premise).

L'ensemble des infrastructures optiques composées essentiellement des fibres optiques, des diviseurs ou de coupleurs optiques entre le central office et les abonnés représente ce qu'on appelle le réseau de distribution optique ou ODN (Optical Distribution Network).

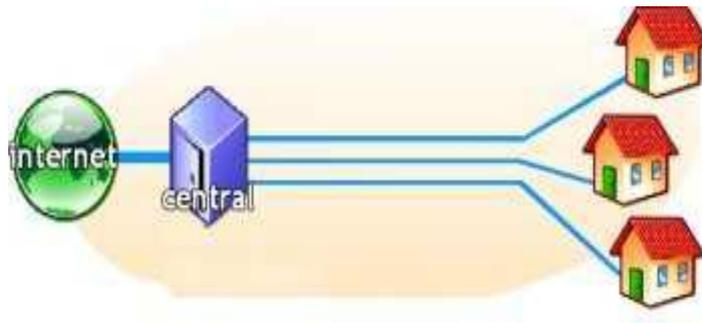
## 5.5 Les architectures du réseau d'accès optique :

Techniquement, on dénote plusieurs topologies de réseau d'accès optique :

- L'architecture point-a-point qui est celle choisie en France par l'opérateur Free qui vise un déploiement dans les zones très denses.
- L'architecture point-a-multipoint TDM (Time Division Multiplexing) choisie par les opérateurs France Telecom, Neuf Cegetel pour son avantage économique.
- L'architecture WDM (Wavelength Division Multiplexing) qui est un cas particulier du point-a-multipoint basé uniquement sur un multiplexage en longueur d'onde.

### 5.5.1 L'architecture Point-a-Point

Le point-a-point est l'architecture la plus simple à mettre en œuvre parmi les topologies physiques du réseau d'accès optique. Elle consiste à avoir un lien physique en fibre optique directement entre le central et l'abonné (généralement bi-fibre).



**Figure 5.8 :** Architecture Point-a-Point optique [21]

Une telle architecture offre plusieurs avantages, tout d'abord, parce qu'elle est aussi bien adaptée pour les clients résidentiels que pour les entreprises. Ensuite, dans une structure point-a-point, il n'y a pas de composant optique entre l'OLT et l'ONT. Par conséquent, le budget optique est traduit par une distance de transmission pouvant atteindre 100km sans amplification pour des débits jusqu'à 10Gbit/s. De plus, la gestion du réseau est simplifiée. En revanche, cela implique une absence de mutualisation de la fibre et une multiplication du nombre des interfaces optoélectroniques. Il en résulte un coût très élevé de déploiement d'un tel réseau.

### 5.5.2 Point-à-Multipoint passif : PON

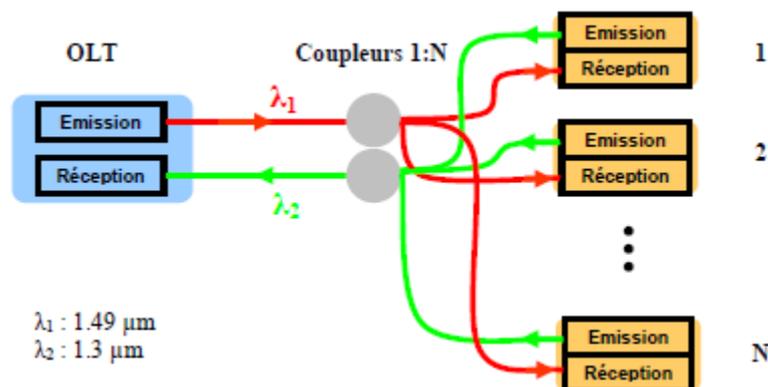
Le PON (Passive Optical Network) représente une solution Point-a-Multipoint optique permettant de mutualiser une partie de l'infrastructure entre plusieurs clients. L'élément clé de L'architecture est un coupleur optique passif 1 vers N qui divise la puissance optique vers autant de ports de sortie.

La norme ITU-T définissant le GPON (Giga PON) est la série G.984.x. Le GPON utilise un multiplexage temporel (TDM) pour 32 ou 64 (voire 128 utilisateurs) qui se partagent un débit de 2.5Gbit/s pour le sens descendant et 1.25Gbit/s pour le sens montant.

Le multiplexage temporel alloue des périodes, dans une trame, pour chaque client. Chaque ONU chez l'utilisateur reçoit toutes les informations mais n'est autorisé à lire que les données qui lui sont destinées. Dans le sens montant, chaque client a un intervalle de temps bien précis pour émettre afin de ne pas interférer avec un autre client.

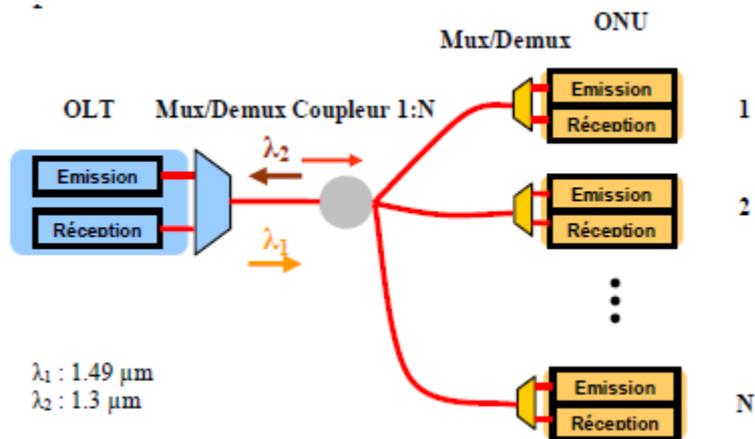
Une composante WDM est déjà présente dans les PON TDM de la norme G.984.2 puisque le signal descendant est à 1.49  $\mu\text{m}$  et le signal montant à 1.31  $\mu\text{m}$ .

La figure 5.9 représente une liaison unidirectionnelle où une fibre est dédiée pour le sens montant et une autre pour le sens descendant.



**Figure 5.9 :** Architecture PON unidirectionnelle [21]

Pour simplifier le réseau, économiser de la fibre et limiter les points de raccordements, une liaison bidirectionnelle peut être utilisée. L'utilisation d'un duplexeur est alors nécessaire (figure 5.10). Il peut s'agir d'un coupleur, d'un circulateur ou d'un multiplexeur en longueur d'onde. Ce dernier, noté (MUX/DMUX) est celui qui est généralement utilisé et intègre aux modules d'émission et de réception.



**Figure 5.10 :** Architecture PON bidirectionnelle [21]

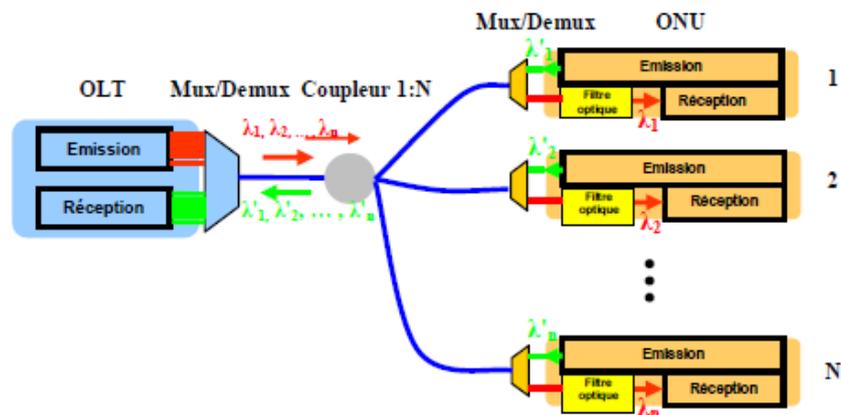
### 5.5.3 PON avec multiplexage en longueur d'onde (WDM)

L'introduction du multiplexage en longueur d'onde "WDM" est d'abord la réponse à une augmentation des débits et du taux de partage dans le réseau d'accès. Le WDM est une solution qui permet le partage du réseau en utilisant la longueur d'onde comme composante démultiplexage. En effet, la limite en débit imposée par le TDM peut être évitée en introduisant le WDM et en affectant, par exemple, une longueur d'onde par utilisateur avec un accès statique ou dynamique, ce qui revient à faire du point-a-point en longueur d'onde. Nous cumule ainsi les avantages et inconvénients du point-a-point et de la mutualisation de la fibre afin que le WDM offre le plus haut débit possible par ONT. Il est possible de combiner les méthodes démultiplexage TDM et WDM. On parle alors de multiplexage hybride qui a beaucoup d'intérêt dans le réseau d'accès optique et que l'on va étudier par la suite dans le cadre de la Nouvelle Génération de PON (NGPON).

Un multiplexage optique par longueur d'onde est possible à plusieurs degrés : CWDM pour Coarse WDM ( $\Delta\lambda$  de 20nm) ou encore DWDM pour Dense WDM ( $\Delta\lambda$  de 0.8nm). Le but étant d'allouer une longueur d'onde par client. Dans l'accès optique, des taux de multiplexage de 20 à 100 sont possibles et des travaux de recherche sont même sur de l'Ultra Dense WDM ( $\Delta\lambda$  de 0.2nm).

En termes d'architecture, il existe principalement deux techniques de PON WDM, l'une utilisant un coupleur comme composant de répartition, il s'agit alors du "broadcast and select", l'autre utilisant un multiplexeur et faisant appel à du démultiplexage spatial.

Dans ce type d'architecture, nous remarquons la présence du même élément principal que dans un PON TDM, c'est-à-dire le coupleur passif achromatique qui va diffuser les longueurs d'onde vers tous les ONU ("broadcast"). Chaque abonne reçoit toutes les longueurs d'onde mais un filtre optique différent chez chaque client (ou un filtre optique accordable) permet de sélectionner la longueur d'onde qui lui est attribuée ("select"). Il existe une configuration unidirectionnelle avec deux fibres, une pour chacune des voies montante et descendante.



**Figure. 5.11:** Architecture PON WDM bidirectionnelle "broadcast and select" [21]

## 5.6 Types de réseaux d'accès PON et Normalisations

Le réseau PON est basé sur plusieurs normes, ces dernières sont classifiées comme suit :

### 5.6.1 La norme APON

Dans le tronçon FTTH (Fiber To The Home) la méthode de prédilection est le réseau optique passif (ATM PON) qu'ils ont normalisé. C'est simplement un système point-multipoint sur fibre optique qui utilise l'ATM comme protocole de transmission. Ces normes sont définies par l'ITU-T. Avec l'APON, les données à haut débit, la voix et la vidéo peuvent être acheminées jusqu'aux abonnés sur une seule fibre. Un système APON peut relier jusqu'à 32 abonnés au PON et leur fournir un système d'accès flexible et un débit élevé (622 Mbit/s ou 155 Mbit/s dans le sens descendant, 155 Mbit/s dans le sens montant). Dans le sens descendant, le multiplexage des cellules ATM est utilisé, alors qu'un protocole de TDMA commande l'accès ascendant des abonnés au réseau.

### 5.6.2 La norme BPON

Le BPON (Broadband PON) est l'extension de l'APON en vue de fournir d'autres services, tels que l'Ethernet et la diffusion de la vidéo (broadcast vidéo). C'est un réseau de distribution

en fibre optique à large bande. En effet, les améliorations récentes de l'APON incluent une vitesse plus élevée, le multiplexage en longueur d'onde WDM, une commande dynamique de la largeur de bande, une meilleure sécurité de données.

Les autres caractéristiques des réseaux APON / BPON sont :

- 32 ONUs dans un seul PON.
- La longueur de la fibre peut aller jusqu'à 20 km.
- Pour la voix et les données, les longueurs d'onde utilisées dans le sens descendant et montant sont 1490 nm et 1310 nm respectivement.
- Une troisième longueur d'onde (1550 nm) peut être utilisée pour le transport de la vidéo numérique dans le sens descendant.

### **5.6.3 La norme EPON**

EPON (Ethernet PON) est un réseau dans lequel la topologie point-multipoints (P2MP) est mise en application avec des coupleurs optiques passifs et la fibre optique comme PMD (Physical Medium Dépendent), qui est basé sur un mécanisme appelé le protocole de

Contrôle Multipoint (Multi- Point Control Protocol MPCP), défini comme une fonction dans la sous couche MAC. Pour commander l'accès à une topologie de P2MP, chaque unité optique de réseau (Optical Network Unit ONU) dans la topologie de P2MP contient un élément du protocole MPCP, qui communique avec un autre élément de MPCP dans l'OLT (Optical Line Terminal). La différence principale entre EPON et APON est que dans les architectures EPON les données sont transmises en paquets de longueurs variables jusqu'à 1.518 octets selon le protocole IEEE 802,3 pour l'Ethernet, tandis que dans un APON les données sont transmises en cellules de longueur fixe de 53 octets (charge utile 48-octets et cinq octets d'en tête), comme indiqué par le protocole ATM. Ce format signifie qu'il est difficile et inefficace qu'un réseau APON transporte un trafic adapté au protocole IP. En effet dans un protocole IP les données sont segmentées dans des paquets de longueurs variables jusqu'à 65.535 octets.

Pour qu'un APON porte le trafic IP, les paquets doivent être divisés en segments de 48 octets avec un en-tête de 5 octets attaché à chacun. Ce processus est long et compliqué et augmente le coût des OLT et des ONU. De plus, 5 octets de largeur de bande sont gaspillés pour chaque segment de 48 octets, créant ainsi des pertes qui sont connues communément sous le nom «ATM cell tax ».

#### 5.6.4 La norme GPON

Le progrès de la technologie, le besoin en bande passante plus large, en plus de l'insuffisance de l'ATM, ont poussé à réviser le standard APON et à réfléchir à une autre solution appelée GPON (Gigabit PON) qui a été standardisée par l'ITU en 2003.

L'architecture GPON ne repose plus sur un tramage ATM mais sur un protocole beaucoup plus simple appelé GFP (Generic Framing Procédure : Protocole de multiplexage).

L'avantage majeur de GPON est qu'il peut supporter plusieurs services à la fois et permet la transmission des paquets en se basant sur des protocoles différents (ATM, IP). De plus, en comparaison avec le standard BPON, le GPON permet une transmission allant jusqu'à 2.48 Gbps dans le sens descendant et 1.244 Gbps dans le sens montant bien qu'il n'utilise qu'une seule longueur d'onde dans ce sens.

#### 5.7 Comparaison des standards d'un réseau PON

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques des différentes normes définies précédemment.

Norme	APON	BPON	EPON	GPON
Norme de recommandation	ITU-T G.983	ITU-T G.983	IEEE802.3ah IEEE802.av	G.984 (FSAN)
Protocoles	ATM	ATM	Ethernet avec accès CSMA/CD	GEM (ATM, Ethernet, TDM)
Longueur d'onde (descendant/montant)	1490nm/1310nm	1490nm/1310nm	1490nm/1310nm	1490nm/1310nm
Débit descendant	155Mbit/s ou 622Mbit/s	155Mbit/s ou 622Mbit/s	1.25Gbit/s 10Gbit/s	2.5Gbit/s
Debit montant	155Mbit/s	155Mbit/s ou 622Mbit/s	1.25Gbit/s 1Gbit/s ou 10Gbit/s	1.25Gbit/s
Taux de partage	16 , 32	16 , 23	16 ,32, 64	16 ,32, 64 jusqu'à 128
Distance OLT/ONT	10 ou 20 Km	10 ou20Km	20Km	20Km

**Tableau 5.1 : Comparaison des standards PON [19].**

La figure 5.12 présente les principales étapes de normalisation du PON (depuis l'A-PON jusqu'au NG-PON). Pour 2020, les réseaux NG-PON doivent :

- ✓ offrir une capacité atteignant les 80 Gb/s à 160 Gb/s ou plus,
- ✓ supporter jusqu'à 256 abonnés voire 1024 (ONUs connectés à la fibre principale)
- ✓ atteindre environ 20 à 60 km de distance de transmission
- ✓ avoir une faible consommation d'énergie
- ✓ être pas chers à réaliser et évolutifs
- ✓ faciliter une coexistence avec le G-PON.

Toutes ces exigences sont adoptées pour que le réseau PON puisse fournir de très grandes performances, s'élargissant jusqu'aux réseaux métropolitains et cœurs tout en se liant avec les réseaux sans fil, renforçant les réseaux hybrides du futur.

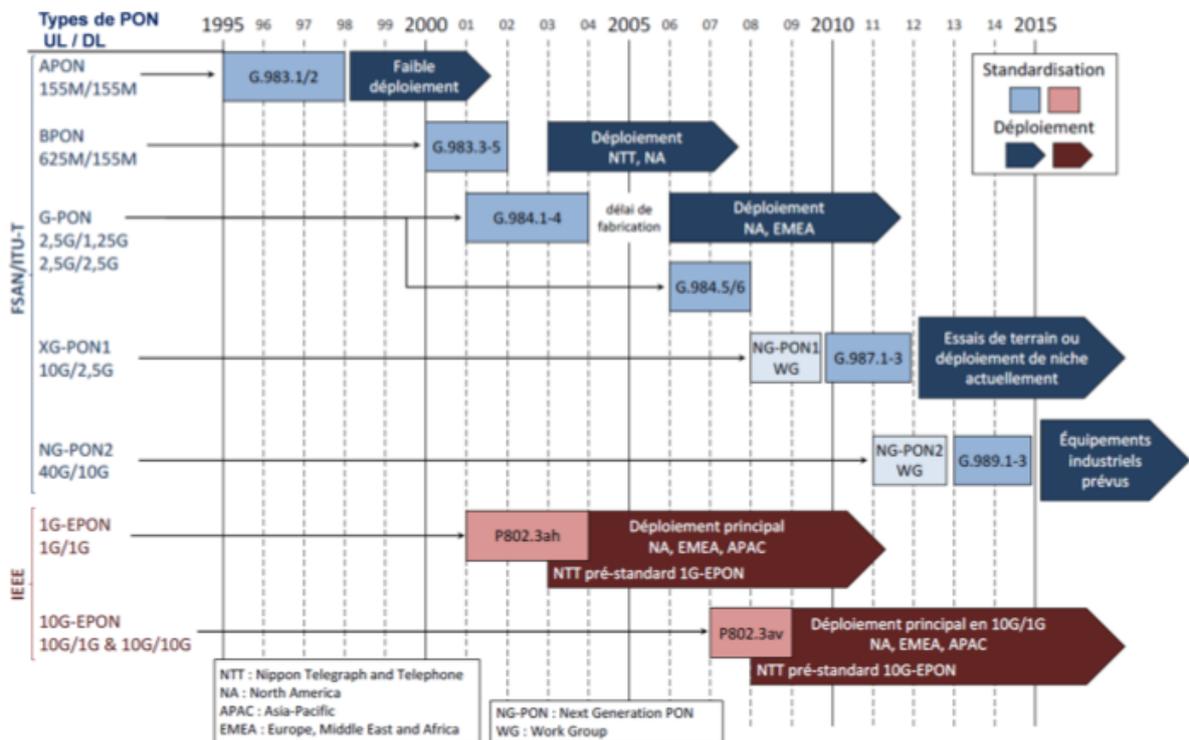


Figure 5.12: Les principales étapes de normalisation du PON [20]

**Questions :**

1. Quelle est la topologie qui reste plus fiable dans un réseau PON ?
2. Citer les deux architectures du système PON ?
3. Quelle est l'architecture d'un système d'accès optique passif (PON) pour une liaison descendante et montante?
4. Quels sont les composants optiques d'un système PON?
5. Décrire la fonctionnalité des composants optiques passifs d'un système PON ?
6. Quelles sont les caractéristiques de la norme GPON, en termes de protocole, débit descendant, débit montant, taux de partage, taille de la trame et le type de la trame?
7. Quel est le type de la photodiode qui doit être utilisée côté OLT et côté ONU ?

## References:

- [1] **Le Nguyen Binh** “Optical fiber communications systems” Theory and Practice with MATLAB® and Simulink® Models” edition Taylor & Francis Group, **2010**.
- [2] **Harry J. R. Dutton** “Understanding Optical Communications”. International Technical Support Organisation, 1<sup>st</sup> edition, **1998**.
- [3] **John M. Senior** « Optical Fiber Communications » Ebook 3<sup>rd</sup> edition, Prentice Hall, **2009**.
- [4] **Gerd Keiser**, Optical fiber communication, Ebook 3<sup>rd</sup> edition published by Mc Graw Hill. **2000**.
- [5] **Shiva Kumar, M. Jamal Deen**, Fiber Optic Communications Fundamentals and Applications. Ebook 1<sup>st</sup> Edition published by Wiley, **2014**.
- [6] **Govind P. Agrawal**, fiber-optic communication systems, Ebook, 4<sup>th</sup> Edition by wiley series in microwave and optical engineering, **2010**.
- [7] **Bob Chomycz** “Planning Fiber optic Networks” edition Mc Graw Hill, **2009**.
- [8] **Nick Massa** “Fundamentals of photonics, fiber optic” Springfield Technical Community College, University of Connecticut, **2000**.
- [9] Cours de la 5<sup>ème</sup> Année : Cycle d’Ingénieurs, Module 5M4, Version 1.0 Université Mohammed Premier, École Nationale des Sciences Appliquées d’Oujda, Septembre **2009**.  
<https://docplayer.fr/15560529-Universite-mohammed-premier-ecole-nationale-des-sciences-appliquees-d-oujda.html>
- [10] Cours MRIM: Etude des supports de transmission la fibre optique.  
<https://docplayer.fr/13137057-Cours-mrim-etude-des-supports-de-transmission-la-fibre-optique.html>
- [11] **Rebiai-Benahmed**, composants optoélectroniques, Polycopié de cours, Université de Saida.
- [12] **Hichem Mrabet** « Annales des exercices et examens transmission optique » Juillet **2015**.  
[www.academia.edu/.../Annales\\_des\\_exercices\\_et\\_examens\\_Transmission\\_optique](http://www.academia.edu/.../Annales_des_exercices_et_examens_Transmission_optique)
- [13] <http://www-irem.univ-fcomte.fr/download/irem/document/ressources/math-phys/refraction/fermat.pdf>.
- [14] **Module 9**: Photo Detectors Lecture: Principle of Photo Detection.  
<https://nptel.ac.in/courses/117101054/downloads/lect9.pdf>
- [15] **J.K.Chhabra** « WDM/ DWDM Systems & Components ». [http://www.nitttrchd.ac.in/sitenew1/app\\_sc/ppts/ofc/8.%20WDM-DWDM%20Systems%20&%20%20Components.pdf](http://www.nitttrchd.ac.in/sitenew1/app_sc/ppts/ofc/8.%20WDM-DWDM%20Systems%20&%20%20Components.pdf)
- [16] **Module 15**: Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFA).  
<https://nptel.ac.in/courses/117101054/downloads/lect15.pdf>

[17] **A. Boyoguéno Bendé, M.A Duguay, P. Fortier** « Étude sur l'amplification en ligne des systèmes de communication optique ».

[18] **Arribi Meriem, Elmahi Aicha** « Technologie WDM en télécoms optiques avancées » Mémoire de Master, université de Mascara, soutenue juin **2016**.

[19] **Louazani Marwa, Meddane Samira** « étude des réseaux d'accès optique exploitant le multiplexage en longueurs d'onde » thème de Master, université de Tlemcen, juin **2017**.

[20] **Max Frejus Owolabi Sanya** « Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans des métropoles de pays en développement : proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM » HAL Id: tel-01386160, thèse de doctorat, Université de Limoges, **2015**.

[21] **Fabienne Saliou** « Etude des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée » HAL Id: pastel-00566249, thèse de doctorat, Télécom ParisTech, **2010**.

[22] **Hassaoui Mounir** « modélisation des pertes dans les liaisons optique » Mémoire de master, Université Abderrahmane mira-Bejaia, **Juin 2012**.

[23] **Avizit Basa K, Md.Zargis Talukder & M d.Rakibul Islam** "Performance Analysis and Comparison between Coarse WDM and Dense WDM" Global Journal of Research in Engineering Electrical and Electronics Engineering. Vol 13 Issue 6, **2013**.