



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE DJILLALI LIABES, FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE**  
**DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE, LABORATOIRE RCAM**  
**SIDI BEL ABBES**

## **THESE**

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle LMD

Option : Réseaux Architecture et Multimédia

Par : Mlle. Wassila BERROUANE

---

**Etude de conception d'une chaine de transmission  
optique à très haut débit à base de semi-conducteur  
du type III-Nitrures.**

---

Thèse dirigée par : **Pr. M. ANANI**

Année Universitaire : 2017/2018

*Dédicace*  
*A mes parents*  
*A Mallo*

## Remerciements

Enfin, nous y voici...

En tout premier lieu, je remercie le bon dieu, tout puissant, de m'avoir donné la volonté et le courage pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier mon encadreur Mr. **M. ANANI**, pour le soin et l'attention avec lesquels il a suivi mon travail. Je le remercie infiniment pour son apport scientifique, ses qualités humaines et sa disponibilité tout au long de ces années, malgré ses nombreuses et lourdes obligations et responsabilités.

J'exprime toute ma gratitude à Mr. **H. ABID** qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je remercie de même MM. **B. MERABET**, **M. KHADRAOUI** et **H. CHAKER** de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être examinateurs de ce travail.

Je tiens également à remercier Mr. **Z. CHAMA** d'avoir accepté l'invitation au jury.

Je n'oublierai pas de remercier mon cher ami **Seddik**, pour le précieux soutien qu'il m'a apporté.

Enfin, je dois à mes parents beaucoup de ce que je suis devenue. Je les remercie infiniment.

## Sommaire

<i>Dédicace</i> .....	ii
<i>Remerciements</i> .....	iii
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Le Guidage Optique.....	3
Introduction .....	4
I. La lumière : propriétés fondamentales .....	6
1. La nature de la lumière est elle ondulatoire ou corpusculaire ? .....	6
1.1. Modèle ondulatoire.....	6
1.2. Modèle corpusculaire .....	7
2. Mesure des propriétés de la lumière .....	8
II. Les guides d'ondes optiques.....	10
1. Généralités.....	10
2. Phénomène de propagation guidée.....	12
2.1. L'approche géométrique.....	12
2.1.1. Lois de réflexion et de réfraction.....	12
2.2. L'approche ondulatoire .....	13
3. Guide plan à saut d'indice .....	15
4. Méthodes de calcul des indices effectifs et des champs électromagnétiques .....	18
4.1. Méthode de l'indice effectif .....	19
III. La fibre optique : principes de fonctionnement et différents types .....	21
1. La fibre optique standard.....	21
1.1. Caractère monomode/ multimode .....	21
2. De la fibre optique conventionnelle à la fibre optique microstructurée .....	24
2.1. Généralités.....	24
2.2. Types des FOM .....	27
2.3. Applications des FOM.....	29
3. Principe de guidage de la lumière .....	29
3.1. Dans une fibre optique standard.....	29
3.2. Dans les fibres microstructurées.....	32
3.2.1. Guidage par réflexion totale interne modifiée.....	32
3.2.2. Guidage par bande interdite photonique.....	33
Conclusion.....	36

Références chapitre 1 .....	37
Chapitre 2 Les Systèmes de Transmissions Optiques. ....	39
Introduction .....	40
I. Généralités.....	42
1. Les réseaux et les supports .....	43
1.1. Caractéristiques globales des supports de transmission .....	43
1.2. Différents types des supports de transmission.....	44
1.2.1. Le cuivre.....	44
1.2.1.1. Le câble coaxial.....	45
1.2.1.2. La paire torsadée .....	45
1.2.2. La fibre optique .....	46
1.2.3. Le faisceau hertzien.....	47
1.3. Avantages des fibres optiques par rapport aux autres supports.....	47
II. Les systèmes de transmissions optiques.....	48
1. Généralités.....	48
2. Effets de propagation et limitations des systèmes de transmission optique .....	49
2.1. Effets linéaires.....	49
2.1.1. Atténuation .....	49
2.1.2. La dispersion .....	52
2.2. Les effets non linéaires.....	53
2.2.1. Effet Kerr.....	54
2.2.2. Effet Raman et Brillouin .....	54
2.2.3. Super continuum.....	55
III. Différents composants d'un système de transmission optique.....	56
1. Composants d'émission.....	56
1.1. Les sources optiques.....	57
1.1.1. La diode électroluminescente .....	57
1.1.2. La diode laser .....	57
1.2. Les modulateurs .....	58
1.2.1. Modulation directe .....	58
1.2.2. Modulation externe.....	59
2. Composants de la ligne de transmission.....	60
2.1. Les amplificateurs .....	60
2.1.1. Amplificateur optique à semi conducteur (AOSC) .....	61

2.1.2.	Amplificateur optique à fibre dopée Erbium (EDFA).....	62
2.1.3.	Amplificateur Raman .....	64
3.	Composants de détection.....	64
3.1.	La photodiode.....	65
3.1.1.	Principe de la photodétection .....	65
3.1.2.	Différents types de photodétecteurs .....	66
3.1.2.1.	Photodiode PIN .....	66
3.1.2.2.	Photodiode à Avalanche (PDA) .....	66
IV.	Techniques de transmission et multiplexage.....	68
1.	Techniques de multiplexage en optique .....	68
1.1.	Le multiplexage dans le domaine temporel.....	68
1.2.	Le multiplexage en longueurs d'onde .....	69
1.3.	Le multiplexage par répartition de code.....	71
	Conclusion.....	73
	Références chapitre 2 .....	74
	Chapitre3 Le Haut Débit : du réseau d'accès au réseau cœur. ....	76
	Introduction .....	77
I.	Les systèmes de transmissions optiques.....	78
1.	Les réseaux dorsaux (Backbone).....	79
2.	Les réseaux WAN .....	79
3.	Les réseaux métropolitains MAN.....	79
4.	Les réseaux LAN ( d'accès) .....	80
4.1.	Description des réseaux d'accès.....	80
4.2.	Architecture des réseaux d'accès.....	81
4.2.1.	L'architecture point à point .....	83
4.2.2.	Point-Multipoint passif.....	84
4.3.	Les réseaux optiques passifs.....	84
4.3.1.	Les classes des PONs .....	85
4.3.2.	Les technologies pour le NG-PON.....	87
4.3.2.1.	TDM-PON.....	88
4.3.2.2.	PON avec multiplexage WDM.....	88
a.	PON WDM Broadcast and select.....	90
b.	Architecture à démultiplexage spatial .....	91
c.	Architecture hybride.....	91

4.3.2.3. OFDM-PON .....	92
II. Critères de qualité d'une transmission par fibre optique .....	94
1. Le diagramme de l'œil .....	94
2. Le taux d'erreur binaire TEB (BER Bit Error Rate) .....	95
3. Facteur de qualité Q .....	96
Conclusion.....	97
Références chapitre 3 .....	98
Chapitre 4 Les Semi-Conducteurs du Type III-Nitrides. ....	99
Introduction .....	100
I. Paramètres fondamentaux des Nitrides-III.....	102
1. Propriétés structurales .....	102
2. Les propriétés électriques .....	103
2.1. La polarité .....	103
2.2. La polarisation spontanée.....	104
2.3. La polarisation piézoélectrique.....	104
2.4. Le champ de claquage .....	104
3. Propriétés électroniques .....	105
3.1. Concentration des porteurs libres .....	105
3.2. Dopage des nitrides .....	105
3.3. La mobilité .....	106
3.4. Les défauts structuraux.....	109
3.4.1. Les défauts ponctuels .....	109
3.4.2. Les défauts étendus .....	110
4. Les propriétés thermiques .....	111
5. Les propriétés optoélectroniques.....	112
5.1. Structure de bande .....	112
5.2. Bande interdite (gap).....	113
5.3. Les masses effectives .....	115
6. Propriétés optiques .....	116
6.1. Constante diélectrique et indice de réfraction .....	116
6.2. Coefficient d'absorption.....	118
II. Théorie des Alliages.....	121
1. Propriétés des ternaires AlGaN et InGaN.....	122
1.3. Evolution du gap d'énergie .....	122

1.2.	Concentration d'électrons en fonction de la température dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ .....	124
1.3.	Vitesse de saturation des alliages .....	124
1.4.	Mobilité .....	125
1.5.	Indice de réfraction.....	126
1.6.	Variation de la longueur d'onde émise par $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de $x$ .....	128
2.	Hétérostructures en phase hexagonale.....	128
III.	Elaboration des nitrides-III .....	130
IV.	Applications.....	132
	Conclusion.....	137
	Références chapitre 4 .....	138
	Chapitre 5 Calcul des indices effectifs.....	140
	Introduction .....	141
1.	Principe de la méthode de l'indice effectif.....	142
2.	Programme de calcul de l'indice effectif.....	147
3.	Résultats .....	151
	Conclusion.....	155
	Conclusion générale .....	156
	Annexes.....	157
	Annexe 1 Processus d'interactions matière- rayonnement dans les semi-conducteurs.....	158
	Annexe 2 Principales structures de diodes lasers.....	161
	Glossaire.....	xiv
	Liste des figures .....	xvi
	Chapitre1 .....	xvi
	Chapitre 2 .....	xvii
	Chapitre3 .....	xviii
	Chapitre4 .....	xix
	Chapitre 5 .....	xxi





## Introduction générale

Trois décennies après sa première fabrication, la fibre optique est enfin utilisée pour connecter les particuliers via la technologie FTTH (Fiber To The Home). Ce support de transmission va transformer l'environnement des télécommunications à travers le monde au cours des prochaines années. Cette évolution aura un impact profond sur les fournisseurs et les opérateurs de réseau. En effet, au cours des 15 à 20 années à venir, les réseaux d'accès en cuivre à travers le monde seront en grande partie remplacés par un réseau d'accès fibre.

C'est dans ce cadre que s'inscrit mon projet de doctorat centré essentiellement sur l'étude d'une chaîne de transmission optique à très haut débit, à base de semi-conducteurs de types III-Nitrides.

L'intérêt porté sur cette étude est motivé par le potentiel des matériaux nitrides d'éléments III pour des applications dans le domaine de l'optoélectronique. Ce domaine se caractérise par l'interaction complexe des électrons et des photons à une échelle nanométrique, la diminution de la taille de ces dispositifs rend leurs performances en nette augmentation. Ces dispositifs sont nécessaires pour le transfert de signaux électriques en signaux optiques et vice-versa.

On peut diviser les dispositifs optoélectroniques en deux grandes familles, les émetteurs et les récepteurs. L'un des premiers émetteurs de lumière est la **diode LED** qui offre la particularité d'émettre un signal lumineux lorsqu'une tension est appliquée à ses bornes. Le développement des diodes électroluminescentes et **diodes lasers** émettant dans le visible (bleu et vert) à la fin des années 90 a provoqué un fort intérêt du monde de la recherche pour les semi-conducteurs nitrides. L'autre dispositif le plus courants utilisés est le **photodétecteur**. De nombreux dispositifs ont vu le jour selon le type d'utilisation. Les avancées perçues dans ce domaine ont permis la miniaturisation de ce composant, l'amélioration de ces performances et le pouvoir d'atteindre une multitude de longueurs d'ondes. L'idée est venue de voir comment modifier ce dispositif afin de pouvoir l'utiliser dans les domaines de l'ultra-violet et le visible. Ce fut la naissance des photodiodes à base des semi-conducteurs, particulièrement compacts.

Les technologies **d'optique intégrée** permettent une bien meilleure reproductibilité des composants, réalisés par des techniques de masquage sur des substrats diélectriques ou semi-conducteurs, et une beaucoup plus grande variété de fonctions, avec notamment la possibilité d'intégrer des fonctions différentes, y compris l'émission et la réception de la lumière dans des circuits intégrés. Parmi mes matériaux les plus utilisés dans la réalisation de ces circuits on trouve les semi-conducteurs de type **III-nitrides**.

En effet, avec les avancées technologiques dans le domaine optique surtout après la commercialisation des EDFAs et les améliorations faites sur la qualité des fibres et après l'apparition du multiplexage WDM qui ont permis d'accroître la capacité sans changer les infrastructures existantes. Tout cela aiderait l'implémentation de nouvelles architectures permettant d'atteindre le très haut débit.

Le présent document comprend cinq chapitres, dans le premier chapitre nous dresserons les principes de base du **guidage optique**.

Le deuxième chapitre se concentre sur les différents **systèmes de transmissions optiques**.

Dans le chapitre trois, nous parlerons des différentes technologies et architectures permettant d'atteindre **le très haut débit du réseau accès au réseau cœur**.

Puis nous passerons, dans le quatrième chapitre, à l'exploration des **semi-conducteurs à base de composés III-Nitrures**.

Enfin, dans le cinquième chapitre, nous passerons à l'étude de conception d'une chaîne de transmission à base de semi-conducteurs du type III-Nitrures, et cela par l'étude des caractéristiques et le **calcul des indices effectifs d'un guide d'onde à base d'InGaN**.

# Chapitre 1

# Le Guidage Optique.

## Introduction

La lumière est le principal moyen pour découvrir le monde qui nous entoure ; c'est peut être pourquoi la nature de la lumière a fait l'objet d'un débat qui figure parmi les plus longs de l'histoire des sciences.

Tout comme le courant électrique, les rayonnements optiques peuvent avoir deux types fondamentaux d'application :

- Applications énergétiques (éclairage)
- Applications informationnelles (la lumière sert de support à des informations dont elle assure la transmission).

La lumière transporte de l'énergie : voilà qui est évident pour toute personne qui s'est un jour amusée à brûler un trou dans un papier en y concentrant, avec une loupe, les rayons du soleil. **Mais quelle est la nature de cette lumière et comment voyage t-elle ?**

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons les deux modèles permettant de décrire la nature de la lumière à savoir le modèle ondulatoire et le modèle corpusculaire.

Depuis deux décennies environ ; la dimension des dispositifs manipulant la lumière a connu une évolution exceptionnelle, passant d'une échelle macroscopique à microscopique et évoluant maintenant vers le nanométrique. Cette évolution est évidente avec le développement des dispositifs électroniques et la miniaturisation de leur taille, ce qui a conduit à l'ultra densification des circuits actuels. On parle donc de dispositifs d'**optique intégrée**.

Le confinement de la lumière est le principe fondamental de l'**optique intégrée** ; ce confinement ou guidage de la lumière (**optique guidée**) est possible grâce aux guides d'ondes. Ces derniers interviennent dans des fonctions de couplage, de modulation, de multiplexage, d'amplification et s'applique dans des domaines de plus en plus divers.

Par conséquent, la deuxième partie de ce chapitre décrit d'abord les deux approches permettant de comprendre le principe de propagation de la lumière : approche **géométrique** et approche **ondulatoire**. Nous passerons en revue les équations de **Maxwell** qui décrivent la propagation des ondes lumineuses dans un guide d'onde diélectrique ensuite nous parlerons des guides plans qui présentent l'élément de base de l'optique intégrée. Après ça, nous passerons aux guides de largeur limitée. L'étude des caractéristiques de ces guides et leur analyse nécessitent des méthodes de calculs

numériques tels que la méthode de l'indice effectif qui sera présentée à la fin de cette partie.

La fibre optique, mince cheveu de verre très transparent, a révolutionné les télécommunications depuis sa découverte dans les années soixante en raison de sa faible atténuation, son faible poids, sa très petite taille et sa résistance mécanique. De nos jours, la fibre optique est un média qui est utilisé pour transmettre toutes les données numériques, telles que les paquets Ethernet, le son, la vidéo ...

L'étude des fibres optiques, leur classification, leur fabrication, leurs propriétés et leurs avantages, ainsi que les applications qu'elles permettent seront discutés dans la troisième partie. Ensuite nous intéresserons aux mécanismes de propagation de la lumière dans chaque type de fibre optique.

# I. La lumière : propriétés fondamentales

## 1. La nature de la lumière est elle ondulatoire ou corpusculaire ?

A propos de la nature de la lumière on entend tout et son contraire. Ce sujet a toujours été une préoccupation essentielle des scientifiques et philosophes.

Deux points de vue existent pour décrire le comportement de la lumière :

- Le point de vue **ondulatoire** qui décrit la lumière comme une onde électromagnétique.
- Le point de vue **corpusculaire** qui décrit la lumière comme des grains : les photons.

En réalité ces deux points de vue se complètent pour avoir une vision globale cohérente de la lumière.

Dans certains cas, il vaut mieux, et parfois même il faut avoir recours au concept de photon. Dans d'autres cas, seul un modèle ondulatoire peut expliquer les résultats obtenus.

### 1.1. Modèle ondulatoire

La lumière est comme le son, un phénomène vibratoire qui se propage par ondes. Elle ne représente qu'un petit domaine du spectre électromagnétique qui représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (figure ci-dessous).

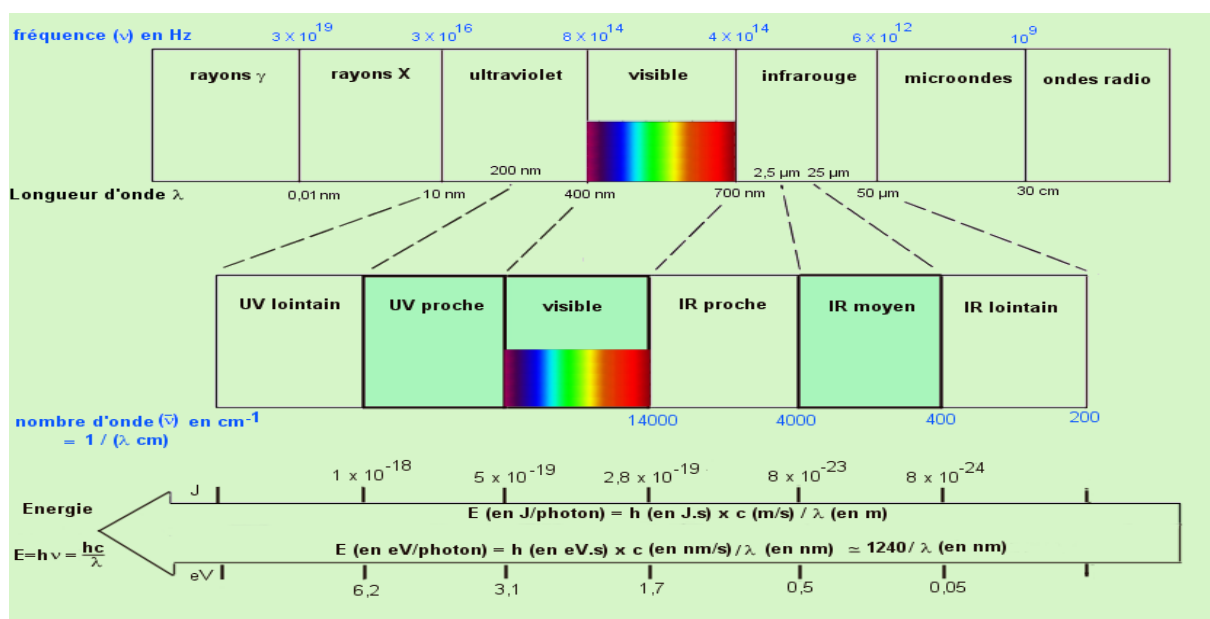


Figure-1- Spectre électromagnétique.

L'onde électromagnétique peut être définie comme étant l'oscillation d'un champ électrique et d'un champ magnétique sur deux plans perpendiculaires. Ces deux champs se propagent ensemble à une vitesse dite de la lumière. On note cette vitesse  $c$  appelée aussi célérité avec  $c = 3 \times 10^8$  m/s

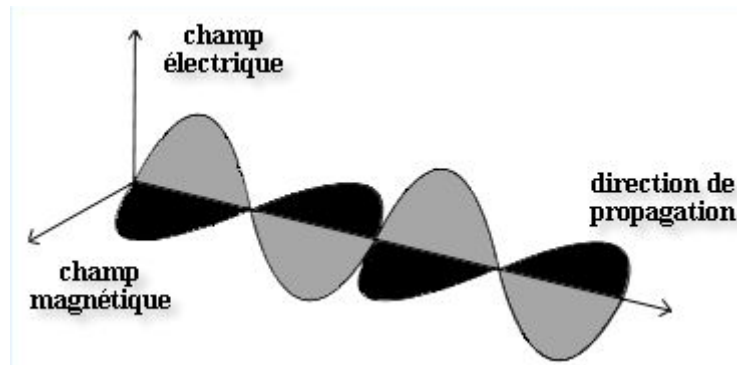


Figure -2- Représentation d'une onde électromagnétique.

La couleur de la lumière est déterminée par la fréquence de l'onde  $N$ , ou ce qui est équivalent, sa longueur d'onde  $\lambda$ .

Une lumière est dite **monochromatique** lorsqu'elle est composée d'une seule radiation de longueur d'onde déterminée, c'est-à-dire d'une seule couleur comme la lumière du LASER ; par contre, elle est dite **poly-chromatique** lorsqu'elle est composée de plusieurs couleurs telle que la lumière blanche.

## 1.2. Modèle corpusculaire

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, les travaux de Planck, Einstein, Bohr et d'autres ont montré que les propriétés d'émission et d'absorption peuvent être mieux comprises en supposant que la lumière est formée de quanta [5], la lumière n'est pas un écoulement continu, mais un flux d'un grand nombre de paquets, on dit qu'elle est quantifiée.

Donc ; la lumière peut s'interpréter aussi comme des « grains de lumière » appelés photons ; qui ont une certaine énergie associée avec eux. La mesure la plus courante de l'énergie d'un photon est l'électronvolt (eV).

Les photons qui voyagent dans des lignes droites sont appelés rayons ; ces rayons sont utilisés pour expliquer certains phénomènes en utilisant l'approche dite optique géométrique. Cette approche (décrite ultérieurement) est valable lorsque l'objet avec lequel la lumière interagit est beaucoup plus grand que la longueur d'onde de la lumière.

La conception corpusculaire de la lumière permet de rendre compte des phénomènes optiques simples : propagation rectiligne, réflexion, réfraction et dispersion.



## 2. Mesure des propriétés de la lumière

✓ Selon la conception mécaniste newtonienne, la lumière est formée par des particules très légères et de très grande vitesse. Sa vitesse est égale à la longueur d'onde  $\lambda$  fois la fréquence  $N$  de sorte que  $c = \lambda N$  ; avec  $c = 3 \times 10^8$  m/s. par exemple ; si la fréquence est connue et on cherche la longueur d'onde, on utilise :

$$\lambda = c/N = 3 \times 10^8/N$$

La vitesse de propagation de l'énergie lumineuse dans les milieux transparents (le terme transparent fait référence ici à un milieu non absorbant) est toujours inférieure à  $c$ . En fait, dans ce type de milieux, la lumière interagit avec les molécules composant celui-ci. Entre chaque molécule, les photons voyagent à  $c$  mais en interagissant, ils sont absorbés puis réémis.

✓ L'indice de réfraction  $n$  est une grandeur sans dimension caractéristique d'un milieu, décrivant le comportement de la lumière dans celui-ci, il dépend de la longueur d'onde et des caractéristiques de l'environnement dans lequel se propage la lumière.

L'indice de réfraction d'un milieu est défini comme étant le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide  $c$  et sa vitesse dans ce milieu notée  $v$  :

$$n = c/v$$

L'indice de réfraction est toujours supérieur ou égal à **1**, par exemple :

- $n_{\text{air}} \approx 1$
- $n_{\text{eau}} = 1.33$
- $n_{\text{verre}} = 1.5$

La lumière se propage plus lentement dans un milieu dense que dans un milieu qui l'est moins, l'indice de réfraction rend compte de cet effet. [7]

✓ La relation entre l'énergie d'un photon et sa fréquence (ou longueur d'onde) est déterminée par la loi de Planck :

$$E = h \cdot N = h \cdot c / \lambda$$

Où  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  J.s = 4.14 eV.s est appelée constante de Planck.

En terme de longueur d'onde (mesurée en micromètre) ; l'énergie en eV est donnée par :

$$E = 1.2406/\lambda$$

**La détermination de la nature de la lumière fut l'objet de nombreuses controverses durant l'histoire. La description ondulatoire et l'optique géométrique, à la limite de très faible longueur d'onde, sont adaptées à l'échelle macroscopique. En revanche, la description en termes de photons est plus adaptée à l'échelle microscopique.**

## II. Les guides d'ondes optiques

La lumière, comme toutes ondes électromagnétiques, est bien sûr capable de se propager d'un point à un autre en espace libre, c'est-à-dire sans que son trajet soit matérialisé par un guide. Ces communications en espace libre rencontrent plusieurs difficultés telle que la turbulence, la turbidité de l'atmosphère, la visibilité indispensable entre les deux points et la diffraction. Cette dernière est un effet très limitant en optique, seul un guidage de la lumière permet la dispersion de l'énergie par diffraction.

### 1. Généralités

Un guide d'onde électromagnétique est un élément capable de guider une onde électromagnétique depuis un point d'entrée jusqu'à un point de sortie. Lorsque la fréquence des ondes transportées correspond à des ondes lumineuses ; on parle de guide d'onde optique.

Les guides d'ondes optiques peuvent être classés selon :

- La géométrie du guide d'onde : planaire, guides d'onde à cristaux photoniques, fibres standards et microstructurées...
- Le mécanisme du guidage optique : réflexion totale interne, bande interdite photonique,
- Le mode : monomode ou multimode
- L'indice de réfraction : à saut d'indice ou à gradient d'indice.
- Matériau de construction du guide d'onde : verre, semiconducteur,...

En optique guidée, il existe différents types de guides d'onde dont le guide d'ondes plan, le guide d'onde ruban et le guide cylindrique qui concerne essentiellement la fibre optique. Cette dernière a connu un développement très important dans les années 1960, du à ses nombreuses applications dans le domaine des télécommunications.

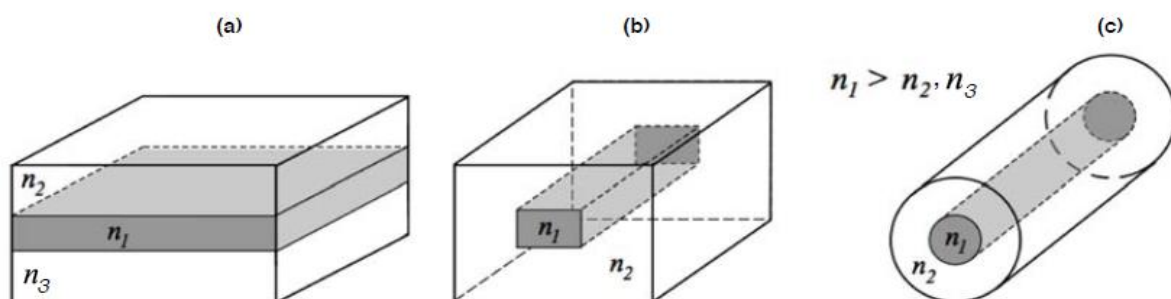


Figure-3- a- guide d'onde plan, b- guide d'onde ruban

c- guide d'onde cylindrique.

Dans le cas d'une structure planaire, la plupart du temps, la couche supérieure est l'air ( $n_2 = 1$ ). On peut alors décliner les différentes variantes de cette structure selon la dimension relative de la partie guidante et de sa position.

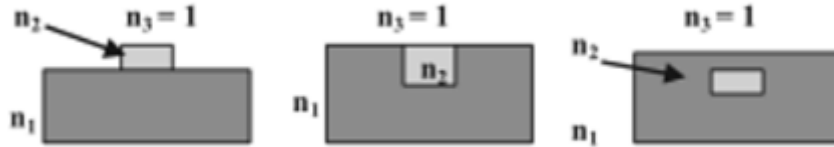


Figure -4- Différents guides d'onde.

De gauche à droite on distingue :

- Le guide en relief
- Le guide canal
- Le guide canal enterré

Les guides d'ondes sont dits **canaux**, lorsque la couche guidante a une dimension latérale limitée.

Les guides d'ondes optiques ont été fabriqués et évalués dans un grand nombre de combinaisons matériau/substrat. Il est essentiel que l'atténuation du faisceau lumineux guidé soit maintenue à un niveau extrêmement bas, ce qui impose les contraintes les plus sévères sur les procédés de fabrication.

Il existe deux méthodes permettant la fabrication des guides optiques ; la première consistant à empiler des couches d'indices différents par une méthode de dépôt et la deuxième à structurer l'indice de la proche surface d'un matériau par une méthode physique ou chimique (ou par fois les deux).

Les différents matériaux utilisés pour la réalisation des guides d'onde

- Les verres massifs
- Les semi-conducteurs (matériaux III-V, Silicium)
- Silice sur Silicium
- Les polymères organo-minéraux
- ...

Quelque soit la méthode, l'objectif à atteindre est d'obtenir des couches ayant une valeur d'indice souhaitée et de très grande qualité structurale, si l'on veut pouvoir guider et propager de la lumière sur des distances suffisantes pour les applications envisagées, sans pertes majeures par des processus de diffusion ou d'absorption optique. [4]

## 2. Phénomène de propagation guidée

Les concepts de base et la théorie des équations de propagation des ondes électromagnétiques sont requis pour la compréhension du phénomène du guidage de la lumière dans un guide optique.

Pour étudier le guidage des ondes électromagnétiques, il y a deux approches théoriques possibles : **l'approche géométrique** et **l'approche ondulatoire**.

### 2.1. L'approche géométrique

Appelée aussi optique des rayons, elle a été développée entre le 11<sup>e</sup> et le 18<sup>e</sup> siècle, étudie les propriétés des guides d'ondes en considérant la lumière comme un faisceau et non comme une onde électromagnétique. Les lois de l'optique géométrique permettent de prédire le comportement des faisceaux incidents.

L'optique géométrique base ses arguments sur le rayon lumineux, ce dernier représente la ligne suivant laquelle l'énergie lumineuse se propage. Les expériences montrent que dans les milieux homogènes la lumière se propage en lignes droites à partir de la source jusqu'au récepteur. Un milieu homogène est un milieu qui a les mêmes propriétés physiques en tout point. Par contre, en se propageant dans un milieu inhomogène ou en passant d'un milieu transparent à un autre, la lumière subit en général trois effets :

- La transmission, par laquelle la lumière traverse un milieu donné.
- La réflexion.
- La réfraction.

#### 2.1.1. Lois de réflexion et de réfraction

Le principe de guidage de la lumière peut être simplement expliqué avec les lois de la réfraction et de réflexion de Descartes. Il est connu que lorsqu'un rayon lumineux d'angle d'incidence  $\theta_1$  passe d'un milieu d'indice de réfraction  $n_1$  à un milieu d'indice  $n_2$ , il se sépare en deux : il est partiellement réfléchi et partiellement réfracté avec un angle de réfraction  $\theta_2$  tel que :  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

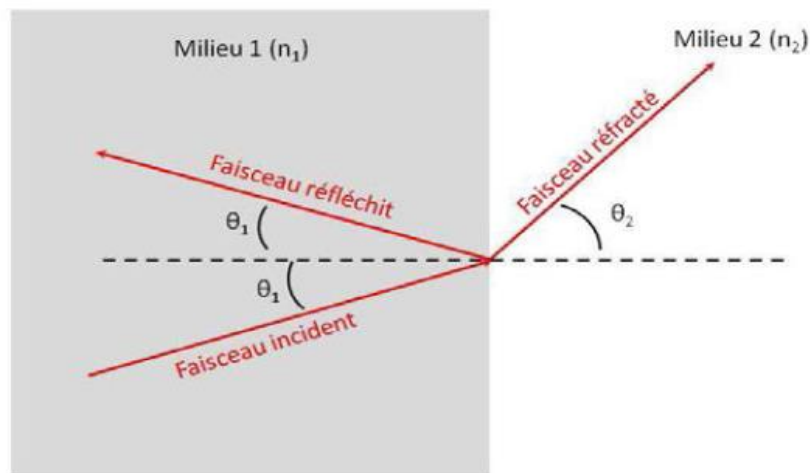


Figure-5- Réfraction de la lumière.

Dans le cas où l'angle d'incidence est plus grand que l'angle critique  $\theta_c$  avec

$$\theta_c = \arcsin (n_2/n_1) ;$$

alors le rayon n'est plus réfracté (angle de réfraction =  $\pi/2$ ) mais totalement réfléchi et il existe aucune perte de lumière ; on parle de **réflexion totale interne**.

En optique guidée, l'angle couramment utilisé n'est pas l'angle d'incidence mais plutôt son complémentaire :  $\theta' = \pi/2 - \theta_i$  ( $\theta_i$  angle d'incidence).

Dans ce cas, un rayon sera guidé si  $\theta' < \theta'_c$  avec  $\theta'_c = \arcsin (n_2/n_1)$ .

Cette approche n'explique pas de nombreux effets comme les déphasages induits lors des réflexions et ne nous donne pas accès à la distribution des champs électromagnétiques. Il faut recourir à la théorie électromagnétique.

## 2.2. L'approche ondulatoire

Cette approche a été développée au cours du 19<sup>e</sup> siècle, elle étudie la propagation de la lumière comme une onde, elle est basée sur les équations de Maxwell qui permettent de définir un ensemble de modes de propagation. La résolution de ces équations ramène à l'équation de dispersion (donnée dans la section suivante) qui admet pour solution une suite discrète de modes pouvant se propager dans le guide.

Revoyons ici quelques notions de base.

Dans un milieu isotrope, homogène, non chargé et non magnétique, les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\text{Rot } \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\text{Div } \vec{E} = 0$$

$$\text{Rot } \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\text{Div } \vec{H} = 0$$

Avec :  $\mu_0$  perméabilité du vide et  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  permittivité du milieu considéré.

On suppose que le guide d'onde est un guide plan à saut d'indice et qu'il est invariant selon  $y$  et  $z$  ; donc l'expression du champ électrique et magnétique se propageant suivant  $z$  est comme suit :

$$\vec{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \vec{E}(\mathbf{x}) e^{i\beta z}$$

$$\vec{H}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \vec{H}(\mathbf{x}) e^{i\beta z}$$

Où  $\beta$  représente la constante de propagation du mode considéré.

C'est donc le développement des équations de Maxwell qui aboutit aux diverses équations qui régissent la propagation dans le guide d'onde optique, suivant le type de milieu considéré. A partir de ces équations, il est possible d'établir l'équation de propagation générale de l'onde dans le milieu.

On appelle **mode** d'un guide, la solution des équations de Maxwell. La notion de mode est étroitement liée à l'idée de quantification. Alors qu'en optique géométrique, tous les rayons à l'intérieur du cône défini par l'ouverture numérique sont permis pour propager la lumière, en optique ondulatoire, les conditions d'interférence restreignent la propagation de la lumière en modes distincts.

Chaque mode comporte une fréquence de coupure qui est reliée aux dimensions du guide. Lorsque la fréquence du rayon est supérieur à la fréquence de coupure pour un mode particulier ; l'énergie du signal se déplacera dans le guide avec une atténuation minimale. Par contre ; si la fréquence du rayon est inférieure à la fréquence de coupure d'un mode particulier ; le signal disparaîtra après un très court trajet.

Le nombre de modes guidés supportés par le guide peut être déterminé à partir de l'équation de dispersion et dépend de l'épaisseur de la couche guidante et des écarts d'indices entre celle-ci et les couches périphériques.

Par ailleurs, on considère que tout champ électromagnétique est décomposable en somme de deux champs, l'un polarisé TE (Transverse Electrique) et l'autre TM (Transverse Magnétique). Pour l'onde TE, le champ électrique n'existe que dans la direction transversale à la direction de propagation, et c'est de même pour l'onde TM. Cette séparation en onde TE et TM permet de simplifier les équations de Maxwell. [4]

Bien que la théorie ondulatoire de la lumière ajoute une nouvelle condition de guidage et donne la notion de modes, il existe toujours des effets qu'elle ne peut pas décrire dont la distribution transverse des modes guidés et la transmission de puissance. [13]

### 3. Guide plan à saut d'indice

La base de l'optique guidée est le guide plan ; qui est un empilement de trois couches de matériaux d'indices de réfraction différents, une couche guidante ou le cœur ( $n_g$ ) comprise entre deux milieux diélectrique d'indice de réfraction plus faible : le substrat ( $n_{sub}$ ) et le superstrat ( $n_{sup}$ ). Ce guide d'ondes est très important parce qu'il a des solutions analytiques simples permettant de comprendre les caractéristiques des structures plus complexes. De ce fait ; nous tenterons ici de dégager les propriétés essentielles du guidage qui nous seront utiles pour le guide bidimensionnel.

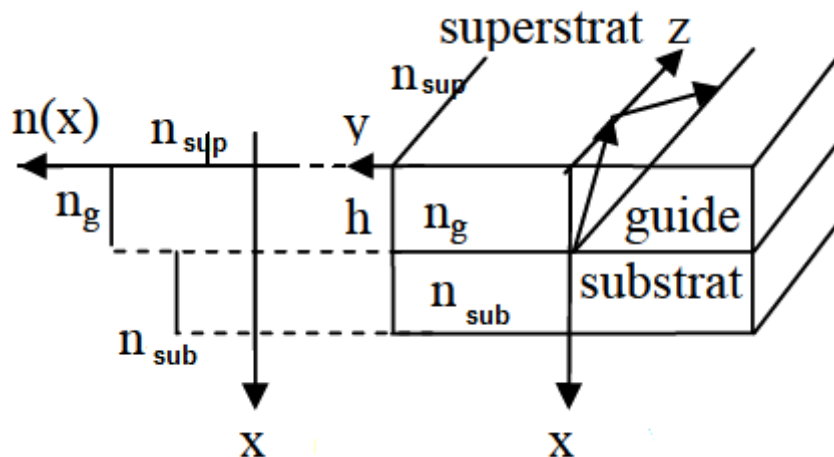


Figure -6- Structure d'un guide d'onde à saut d'indice et son profil d'indice.

La géométrie de ce type de guide assure le confinement des ondes optiques suivant une seule direction de l'espace.

Dans un tel guide, la propagation d'un rayon lumineux consiste en sa réflexion totale ou partielle sur les interfaces cœur-substrat et cœur-superstrat. Un rayon est guidé lorsque son angle d'incidence  $\theta$  par rapport à la normale est inférieur à  $\pi/2$  et est supérieur aux angles critiques  $\theta_{sub}$  et  $\theta_{sup}$  avec :

$$\theta_{sub} = \arcsin\left(\frac{n_{sub}}{n_g}\right) \text{ et } \theta_{sup} = \arcsin\left(\frac{n_{sup}}{n_g}\right)$$



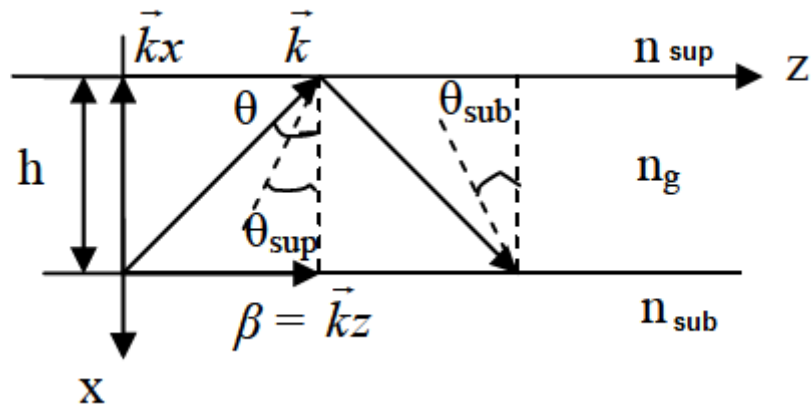


Figure -7- Propagation de la lumière dans un guide à saut d'indice.

Les différents modes guidés sont caractérisés par leur constante de propagation  $\beta$  avec  $\beta = k \cdot \sin\theta$

Où  $k$  est le module du vecteur d'ondes,  $k = 2\pi / \lambda = (2\pi / \lambda_0) \cdot n_g = k_0 \cdot n_g$

Avec :  $k_0$  : module du vecteur d'ondes dans le vide.

$\lambda_0$  : longueur d'onde dans le vide.

$\lambda$  : longueur d'onde dans le guide

En introduisant la notion d'indice effectif  $n_{eff}$  ; on aura :

$$n_{eff} = n_g \sin\theta = \beta / k_0$$

La notion d'indice effectif permet d'exprimer une condition de guidage. L'indice effectif veut dire que chaque mode se propage avec un indice de réfraction effectif vérifiant la condition suivante :

$$n_{sub} < n_{eff} < n_g$$

et par conséquent :

$$k_0 n_{sub} < \beta < k_0 n_g$$

On définit aussi pour chaque mode (chaque valeur de  $\beta$ ) un paramètre de guidage : **constante de propagation normalisée**.

$$b = \frac{n_{eff}^2 - n_{sub}^2}{n_g^2 - n_{sub}^2}$$

La condition des modes guidés est exprimée par  $0 \leq \beta \leq 1$ .

L'indice effectif d'un guide d'onde optique est un paramètre très important pour déterminer les caractéristiques de propagation des modes guidés. Les modes guidés ne sont pas les uniques solutions viables des équations de Maxwell. Il existe aussi d'autres possibilités : les modes rayonnés du substrat et les modes évanescents.

Un mode cesse d'être guidé si  $n_{\text{eff}} < n_{\text{sub}}$  ; la condition  $\beta = k_0 n_{\text{sub}}$  représente la condition critique en dessous de laquelle le champ est coupé et devient non guidé (mode rayonné) ; on l'appelle **condition de coupure**.

La fréquence normalisée permettant de caractériser un guide plan d'épaisseur  $h$  à une longueur d'onde  $\lambda$  dépend directement du rapport épaisseur/ longueur d'onde et du contraste d'indice entre le guide et son substrat. Elle est définie comme suit :

$$V = k_0 h \sqrt{n_g^2 - n_{\text{sub}}^2}$$

En plus de la condition de réflexion totale, pour pouvoir se propager, l'onde doit également satisfaire une condition d'auto cohérence (condition de phase) : après deux réflexions totales sur l'interface cœur-gaine, l'onde résultante doit être identique à l'onde incidente. [3] Cette condition est définie par l'équation de dispersion suivante :

$$k_0 \cdot h \sqrt{n_g^2 + n_{\text{eff}}^2} = \varphi_{10} + \varphi_{12} + \pi m \quad (*)$$

Avec:  $h$ : épaisseur du guide.

$\varphi_{10}$  : Déphasage dû à la réflexion totale à l'interface cœur-superstrat.

$$\varphi_{10} = \arctg \left[ \left( \frac{n_g}{n_{\text{sup}}} \right)^{2\gamma} \sqrt{\frac{n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{sup}}^2}{n_g^2 - n_{\text{eff}}^2}} \right]$$

$\varphi_{12}$  : Déphasage dû à la réflexion totale à l'interface cœur-substrat.

$$\varphi_{12} = \arctg \left[ \left( \frac{n_g}{n_{\text{sub}}} \right)^{2\gamma} \sqrt{\frac{n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{sub}}^2}{n_g^2 - n_{\text{eff}}^2}} \right]$$

Pour les modes TE ;  $\gamma = 0$

Pour les modes TM ;  $\gamma = 1$

Cette formule montre que pour chaque valeur de  $m$ , il existe une valeur minimale de  $h$ , appelée épaisseur de coupure  $h_c^m$ . Théoriquement, elle peut être déterminée en imposant  $n_{\text{eff}} = n_s$  dans la relation de dispersion. [14]

Le nombre total de modes guidés peut être déterminés à partir de la relation de dispersion (\*)

Les guides d'ondes plans nous permettent de démontrer les caractéristiques les plus importantes des ondes optiques guidées, mais cette structure n'est pas très utile pour les applications pratiques ; généralement des structures plus complexes sont utilisées y compris les guides d'ondes à gradient d'indice et les guides canaux.

Pour les composants d'optique intégrée, le confinement de l'énergie selon une seule direction n'est pas suffisant, la lumière doit être confinée dans deux directions de l'espace, ce sont les guides rectangulaires qui le permettent.

En ajoutant une autre dimension au guide confiné (2D), le problème de résolution de l'équation de propagation devient plus difficile. En général, la solution analytique est difficile à trouver, en conséquence ; on utilise des méthodes analytiques approchées (méthode de l'indice effectif) ou des méthodes numériques basées sur la résolution des équations de Maxwell (méthode des éléments finis). [13]

#### **4. Méthodes de calcul des indices effectifs et des champs électromagnétiques**

L'étude de la propagation de la lumière dans les guides d'onde optiques est d'une grande importance dans la conception et l'analyse de la performance des systèmes de communications optiques. Ci-dessous, nous citons les principales méthodes numériques permettant de simuler la propagation dans les composants de guides d'onde, afin de calculer l'indice effectif.

- La méthode des indices effectifs.
- La méthode variationnelle.
- La méthode de Galerkin.
- La méthode des faisceaux propagés BPM (Beam Propagation Method). Cette méthode comporte plusieurs classes :
  - BPM basée sur la transformée de Fourier.
  - La méthode des éléments finis en guidage faible.
  - La méthode à différence finie dans le domaine temporel.

Dans ce qui suit, on va détailler une de ces méthodes.

#### 4.1. Méthode de l'indice effectif

Pour des structures plus complexes, des méthodes de calcul numériques sont utilisées pour résoudre le problème de propagation. Celles-ci sont beaucoup plus souples et permettent de calculer d'une manière rigoureuse différents paramètres (indice effectif, répartition du champ,...).

Pour illustrer la méthode des indices effectifs, considérons le guide en ruban suivant :

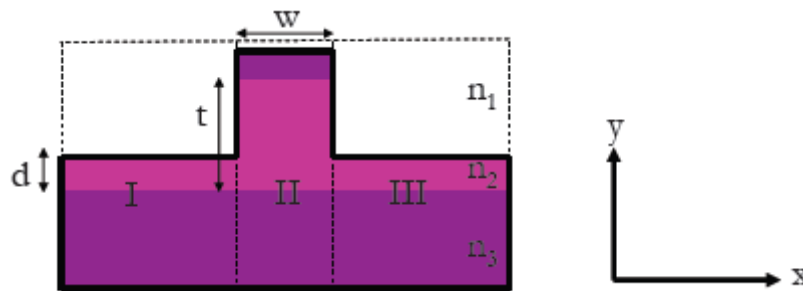


Figure-8- Représentation d'un guide ruban.

Ce guide ; comme le montre la figure ci-dessus est constitué d'une couche d'indice  $n_2$  et d'une gaine inférieure d'indice  $n_3$ . La structure est entourée d'un milieu d'indice  $n_1$  qui est généralement de l'air.

Ce guide ruban peut être subdivisé en trois régions **I**, **II** et **III** comme le montre la figure ci-dessous. Dans chaque région nous considérons l'empilement des couches comme une structure guidante. Nous avons donc trois guides plans indépendants. L'épaisseur de la couche d'indice  $n_2$  est  $d$  dans les parties **I** et **III** et  $t$  dans la partie **II**.

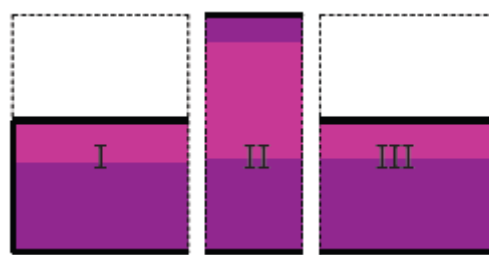
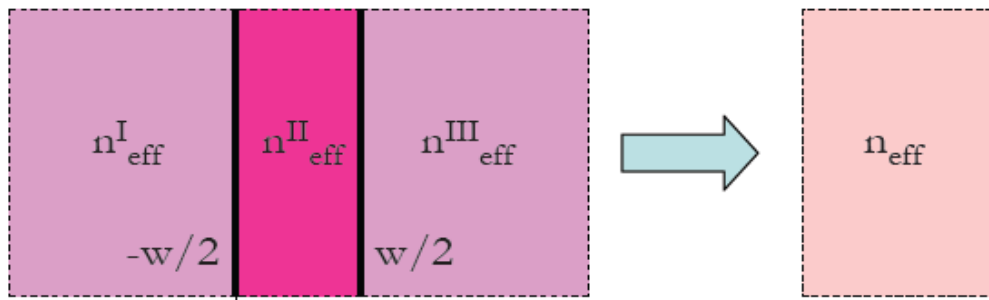


Figure-9- Guide ruban divisé en 3 parties.

Dans chaque région, on peut déterminer l'indice effectif ( $n_{\text{eff}}^{\text{I}}$ ,  $n_{\text{eff}}^{\text{II}}$ ,  $n_{\text{eff}}^{\text{III}}$ ) à partir de la relation de dispersion, puisque les régions **I** et **III** sont identiques, le problème se ramène au calcul de deux guides planaires.

A partir du guide planaire effectif à trois couches d'indices  $n_{\text{eff}}^{\text{I}}$ ,  $n_{\text{eff}}^{\text{II}}$ ,  $n_{\text{eff}}^{\text{III}}$  on peut calculer l'indice effectif  $n_{\text{eff}}$  du mode guidé.



**Figure-10- Méthode de l'indice effectif.**

Cette méthode simple est surprenante par l'efficacité de ces résultats. En fait ; la précision de cette méthode est presque la même que celle de la méthode de Marcatili, sauf que la méthode de l'indice effectif donne la plus grande estimation de la solution précise, contrairement à la méthode de Marcatili qui donne l'estimation la plus faible.

Cette méthode a été utilisée en premier lieu pour résoudre des problèmes de propagation dans des guides homogènes, bien souvent de section rectangulaire. Mais à la fin des années 80, Karl Van de Velde a montré que la méthode de l'indice effectif pouvait s'étendre à des guides de formes quelconques et des profils d'indice arbitraires. [8]

### III. La fibre optique : principes de fonctionnement et différents types

La fibre optique est un élément clé des systèmes de communications optiques. C'est tout simplement un guide d'onde diélectrique cylindrique qui permet le confinement et le guidage des ondes lumineuses le long de son axe.

Les fibres classiques sont élaborées à partir de silice ultra-pure. Ces fibres sont constituées d'un cœur et d'une gaine. Le cœur est dopé afin d'augmenter l'indice de réfraction et de permettre le confinement de la lumière. Il existe toutefois un autre design de fibre permettant le guidage de la lumière : les fibres microstructurées. Ces dernières présentent des particularités de par leur structure, leur composition et leurs propriétés.

Il n'existe pas à ce jour de consensus sur la fibre idéale pour les transmissions à longue distance et haut débit, Les types de fibres installées dépendent des progrès technologiques et de la qualité de la communication.

#### 1. La fibre optique standard

Les fibres en silice classiques appelées aussi fibres conventionnelles sont constituées de deux matériaux, l'un constituant le cœur et l'autre la gaine. La différence entre l'indice de réfraction de ces deux matériaux permet le guidage de la lumière dans le cœur de la fibre par **réflexion totale interne**. La fibre optique est souvent recouverte d'un revêtement protecteur qui ne joue aucun rôle dans le guidage de la lumière.

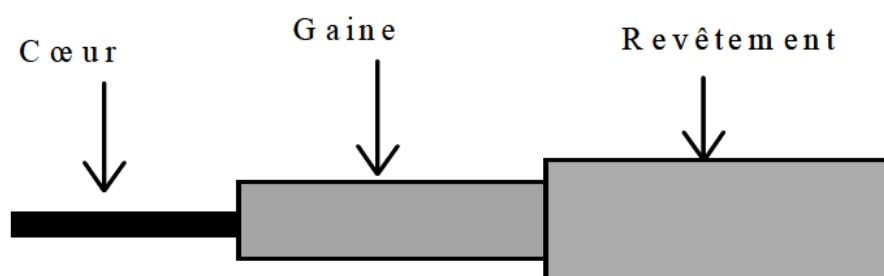


Figure -11- schéma de la structure d'une fibre.

#### 1.1. Caractère monomode/ multimode

Dans une fibre optique ; un mode correspond à l'un des multiples chemins possibles dans lequel une onde va se propager le long de cette fibre. En fonction du nombre de modes guidés on distingue deux types de fibres : monomodes et multimodes.

Une fibre est dite **multimode** lorsque plusieurs modes peuvent se propager le long de son axe, par contre, lorsqu'un seul mode peut se propager elle est dite **monomode**. Introduisons la fréquence normalisée ( $V$ ), nombre sans dimension, qui devra bien évidemment tenir compte du rayon du cœur ( $a$ ) :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Avec  $n_1$  et  $n_2$  indices de réfraction du cœur et de la gaine respectivement.

- Si  $V \leq 2.405$  la fibre est **monomode**.
- Si  $V > 2.405$  la fibre est **multimode**. Le nombre de modes se propageant dans le cœur est égale approximativement à  $V^2/2$ . Chaque mode possède également une fréquence de coupure en dessous de laquelle il n'est plus guidé.

La fréquence normalisée  $V$  est inversement proportionnelle à la longueur d'onde, donc la fibre optique perd son caractère monomode lorsque la longueur d'onde diminue.

Les fibres monomodes dénommées SMF (Single Mode Fiber) ont un paramètre très important appelé **longueur d'onde de coupure**  $\lambda_c$  (cutoff wavelength). Elle spécifie la longueur d'onde en dessous de laquelle la fibre n'est plus monomode.

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Il est à noter qu'il existe deux types de fibres multimodes : à saut d'indice et à gradient d'indice et pour chaque catégorie, différents profils d'indice de réfraction sont possibles comme le montre la figure ci-dessous.

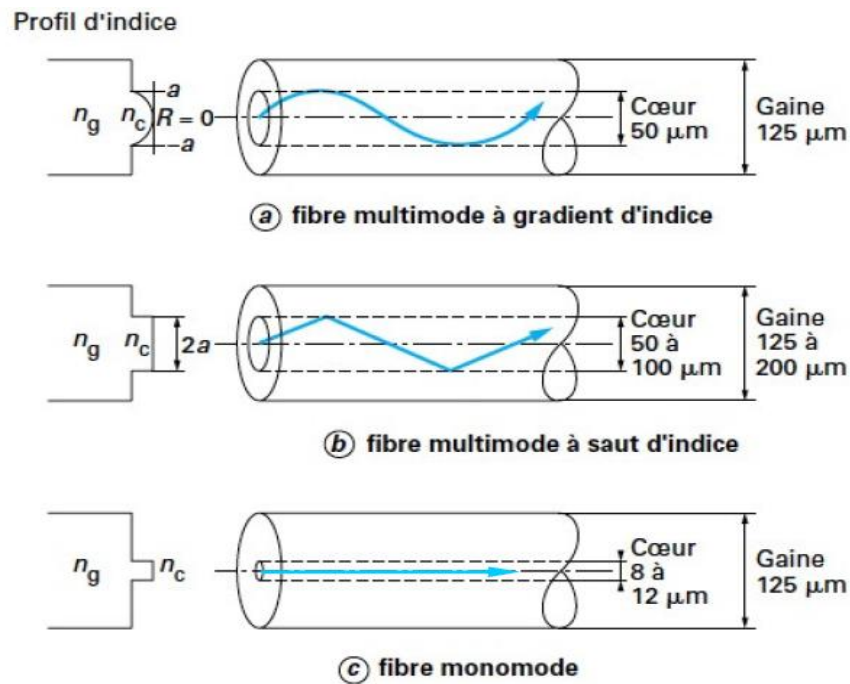


Figure -12- Différents types de fibre optique.

Les fibres à saut d'indice présentent une discontinuité de l'indice à l'interface cœur-gaine ; alors que pour les fibres à gradient d'indice la variation d'indice est continue de l'indice du cœur à l'indice de gaine. Les fibres monomodes sont généralement des fibres à saut d'indice et à petit cœur. [15]

L'avantage de la fibre multimode réside dans son diamètre du cœur ; qui est relativement grand, ce qui facilite l'injection de la lumière dans la fibre optique, avec un minimum de pertes de couplage.

Le phénomène de **dispersion modale** représente l'inconvénient majeur d'une fibre multimode. En fait ; dans une fibre multimode ; chaque mode se propage à une vitesse différente, cette différence est due aux différents angles d'incidence à l'interface cœur-gaine. Ce phénomène peut être réduit en utilisant les fibres à **gradient d'indice** dans lesquelles, l'indice de réfraction change progressivement entre le cœur et la gaine.

Cependant ; même avec une fibre à gradient d'indice, la dispersion modale peut encore limiter le débit binaire du signal transmis et la distance que le signal peut parcourir. En réduisant suffisamment le diamètre du cœur, il est possible de capturer uniquement un seul mode. Une fibre monomode a un diamètre de cœur d'environ **10µm** alors que le diamètre du cœur d'une fibre multimode varie de **50 à 100 µm**. Ainsi ; la fibre monomode élimine la dispersion modale, et permet par conséquent les transmissions sur de longues distances.



La grande transparence des fibres optiques en silice dans le proche infra rouge a conduit, dans les années 1990, à l'utilisation massive de la fibre optique comme milieu de propagation préféré dans les transmissions à haut débit terrestres et sous marines. Elle a permis aussi de réaliser de nouveaux composants passifs tels des coupleurs, des filtres mais aussi des composants actifs.

La figure ci dessous illustre le spectre lumineux de l'ultra violet à l'infra rouge, elle représente la gamme spectrale dans laquelle il est possible de travailler avec des fibres optiques standards, soit de la gamme visible jusqu'à la gamme infra rouge autour de  $2\mu\text{m}$ .

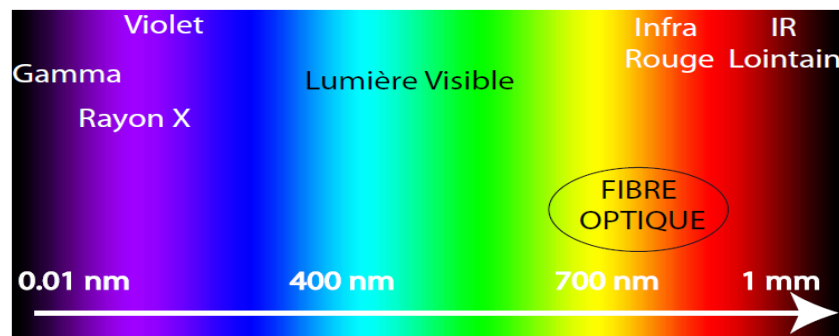


Figure -13- Le spectre lumineux.

Grâce à cette large plage de longueurs d'ondes, les applications des fibres optiques conventionnelles sont nombreuses. On en retrouve dans le domaine de l'éclairage, de l'imagerie ou de la téléphonie.

Les fibres optiques conventionnelles ont révolutionné les technologies de l'information. Notre quotidien s'en trouve amélioré. Mais malgré leurs propriétés déjà extraordinaires, certaines faiblesses subsistent. Par exemple, les effets non linéaires tel que la diffusion Brillouin, ces effets sont difficiles à éliminer. Aussi, la fabrication d'une fibre optique conventionnelle monomode à toutes les longueurs d'onde est impossible. Ces obstacles et bien d'autres sont en passe d'être dépassés grâce à la technologie émergentes des fibres à cristaux photoniques.

## 2. De la fibre optique conventionnelle à la fibre optique microstructurée

Fibres **microstructurées**, fibres à **trous**, fibres à **cristal photonique** ou à **bandes interdites photoniques**... autant d'appellations qui désignent cette jeune branche pourtant vaste de la famille des fibres optiques.

### 2.1. Généralités

Les fibres à cristaux photoniques (Photonic Crystal Fiber) connues encore sous le nom des fibres microstructurées, fibres de nouvelle génération ou fibres à trous procurent des propriétés optiques très attrayantes. D'un point de vue théorique, les

fibres microstructurées ne représentent qu'une illustration d'un concept théorique plus large, né en 1987 : les cristaux photoniques.

Ces fibres sont constituées d'un arrangement régulier ou non de canaux d'air de dimensions micrométriques disposés parallèlement à l'axe de propagation. Le nombre de rangées ou de couronnes de trous utilisées pour former la gaine microstructurée constitue un critère important pour réduire les pertes de guidage.

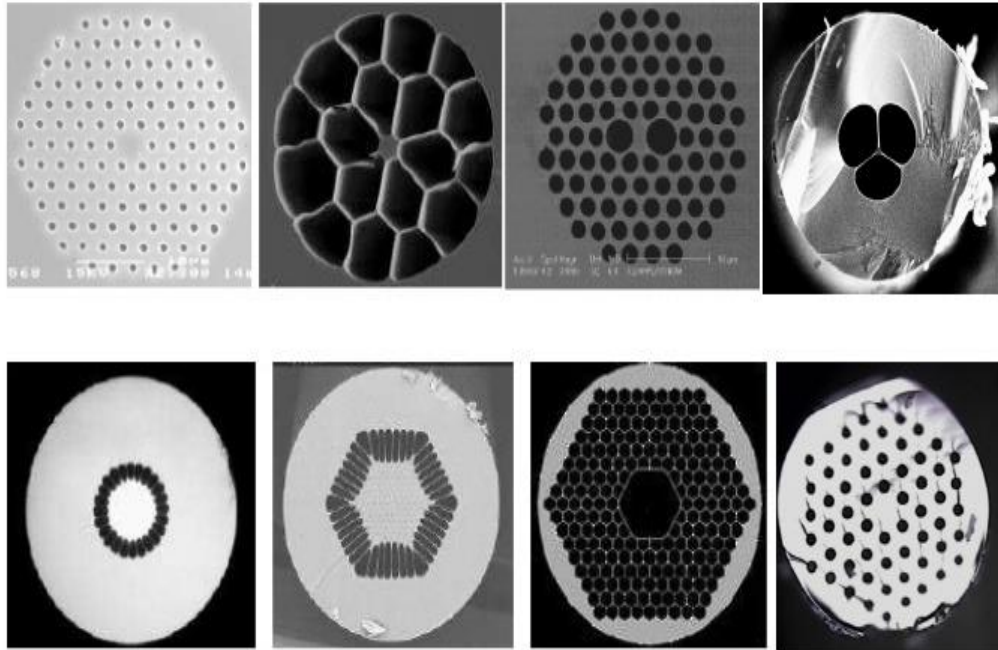


Figure-14- Photographie de plusieurs fibres microstructurées.

La microstructure est caractérisée par deux paramètres principaux :  $d$  et  $\Lambda$  (pas ou pitch) ;  $d$  correspond au diamètre des trous et  $\Lambda$  à la distance entre deux trous adjacents. Ces deux paramètres permettent de définir le rapport  $d/\Lambda$  traduisant la fraction d'air présente dans la fibre. En jouant sur les valeurs de ces deux paramètres on peut obtenir différentes fibres microstructurées, tout en ajustant leurs caractéristiques en fonction de l'application recherchée.

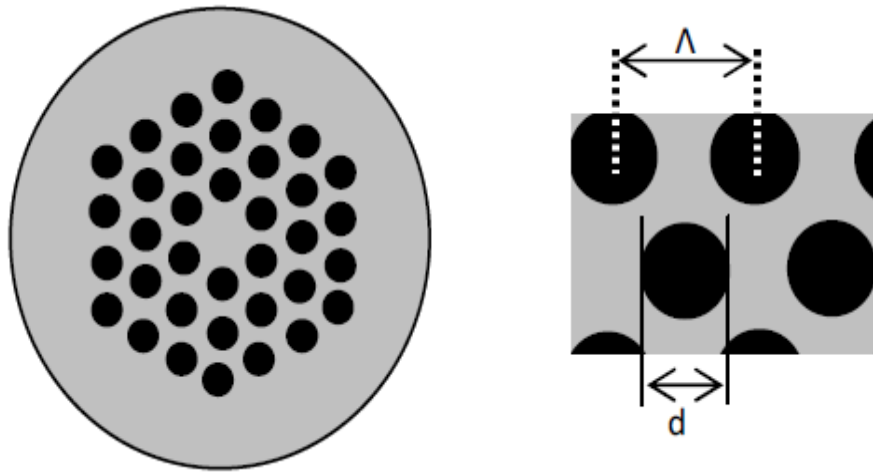


Figure -15- Structure d'une FOM.

Le nombre important de degrés de libertés possibles dans les PCF permet la fabrication de fibres avec dispersions particulières ; nulle à une longueur d'onde donnée ou constante dans une bande désirée. [9]

Différentes techniques permettent de fabriquer les FOM ; citant le perçage, l'extrusion ou le moulage, et l'assemblage-étirage. Cette dernière consiste à réaliser une préforme identique à la géométrie visée en empilant des barreaux circulaires (ou capillaires) de taille millimétrique. Ensuite ; le fibrage de la préforme est réalisé de la même manière que les fibres conventionnelles.

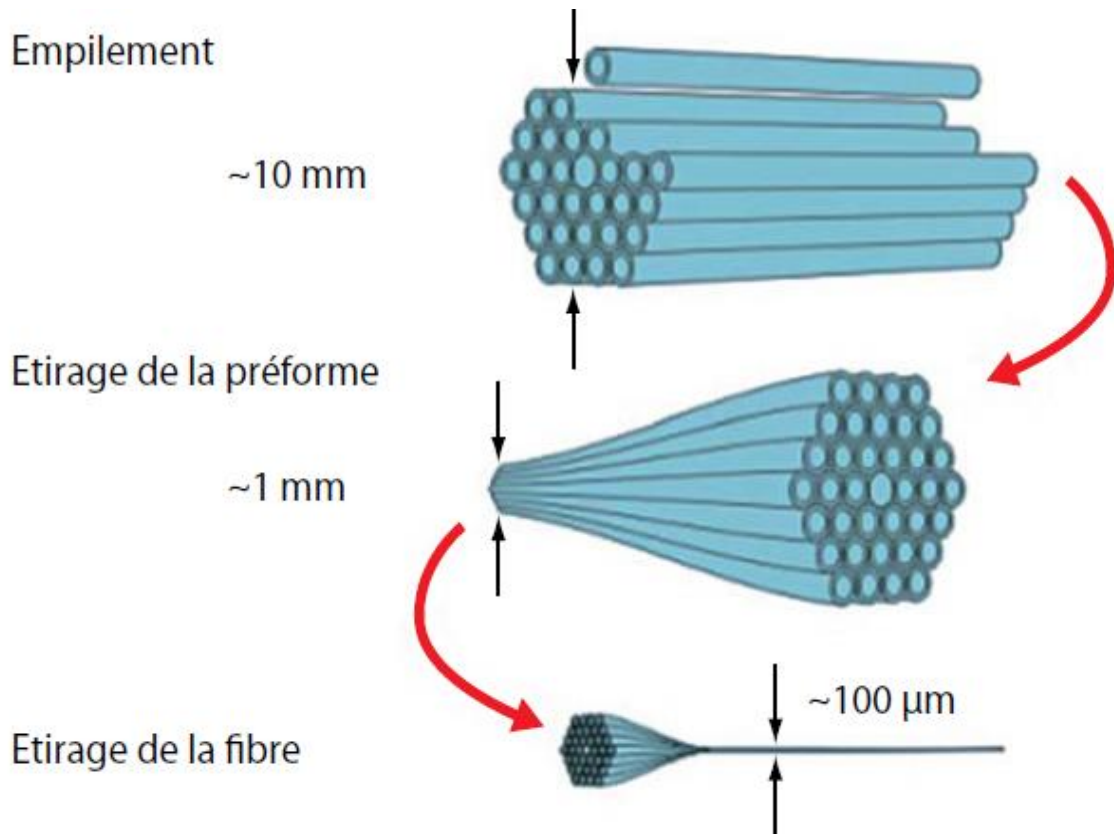


Figure-16- Différentes étapes de fabrication des FOM- a- assemblage  
b- étirage de la préforme – c- fibrage.

Les matériaux constituant la préforme sont l'air et la silice, ces deux matériaux sont de natures différentes ce qui crée différentes contraintes de fabrication. Une des premières contraintes consiste à gérer la suppression des trous interstitiels. La température joue aussi un rôle critique lors de la réalisation de ces fibres.

## 2.2. Types des FOM

Les fibres à cristaux photoniques se divisent en deux sous familles correspondant à deux principes de guidage différents. La première famille regroupe les fibres dites à **cœur solide** (indice du cœur est supérieur à l'indice moyen de la gaine), ces fibres sont très similaires aux fibres conventionnelles et le guidage de la lumière dans ce type de fibres est basé sur la **réflexion totale interne modifiée**. La seconde famille est constituée des fibres dites à **cœur creux** (indice du cœur est inférieur à l'indice moyen de la gaine) pour lesquelles le guidage se fait par **bande interdite photonique**.

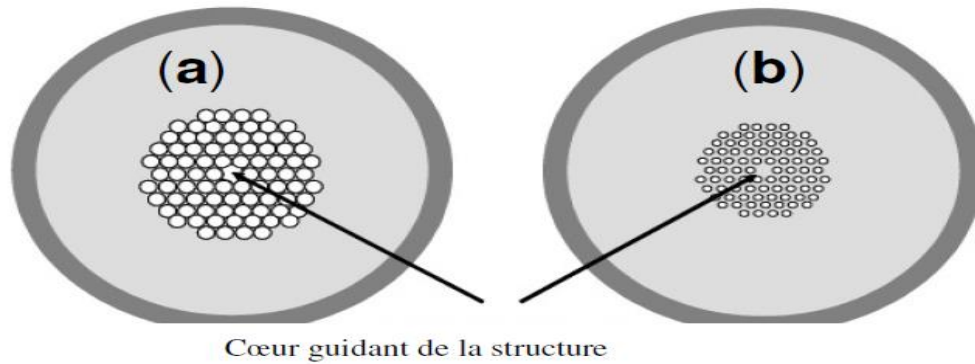


Figure-17- a- Fibre microstructurée à cœur creux  
b- fibre microstructurée à cœur plein.

La fréquence normalisée dans le cas d'une fibre microstructurée est définie par :

$$V_{PCF} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_{g\_PCF}^2(\lambda)}$$

Avec  $n_c$  l'indice du cœur, et  $n_{g\_PCF}$  l'indice effectif de la gaine microstructurée qui dépend de la longueur d'onde.

En plus des fibres multimodes et monomodes il existe des fibres qui ont un caractère **infiniment monomode**. Cela est possible lorsque le diamètre des trous d'une fibre microstructurée à cœur solide est suffisamment petit de manière à ce que  $d/\Lambda < 0.4 - 0.45$  (quelle que soit la longueur d'onde et quel que soit le diamètre du cœur)

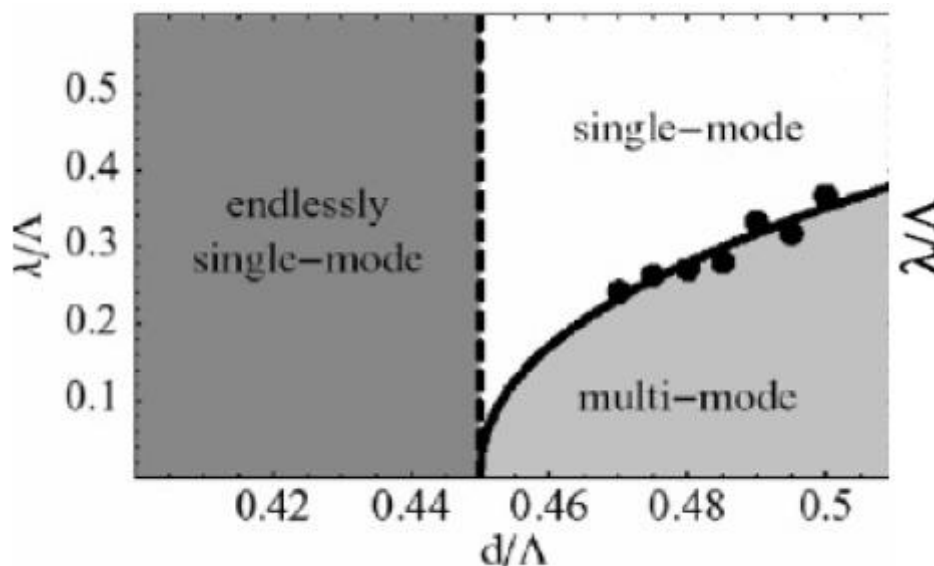


Figure -18- Comportement modal d'une fibre.

Le diagramme présenté ci-dessus permet de connaître à partir des paramètres géométriques de la fibre ( $d$  et  $\Lambda$ ) et de la longueur d'onde de travail le comportement modal d'une fibre. [6]

Ce qui a suscité l'intérêt des chercheurs avec cette nouvelle génération de fibres ayant une structure particulière, est leur capacité à pouvoir travailler à des longueurs d'ondes autres que la gamme présentée dans la figure-13- pouvant atteindre plus de  $20\mu\text{m}$  suivant les verres utilisés. [12]

### **2.3. Applications des FOM**

Les propriétés physiques propres aux fibres microstructurées ne demandent évidemment qu'à servir de tremplin pour le développement de différentes applications et la communauté scientifique a très rapidement réalisé l'immense potentiel de ces fibres. [11]

Un des domaines d'utilisation des fibres microstructurées est la fabrication d'amplificateurs optiques et de sources LASER. En raison de leurs propriétés modales et dispersives uniques, les fibres microstructurées peuvent être mises à contribution, notamment leur possibilité à ne supporter qu'un seul mode transverse.

Une autre application qui a démarqué les fibres microstructurées ces dernières années, c'est la génération de supercontinuum, c'est-à-dire la génération de lumière cohérente ayant un spectre très large. [11]

## **3. Principe de guidage de la lumière**

L'objectif de cette section porte sur l'acquisition des concepts de base qui servent à la compréhension des mécanismes de guidage de la lumière dans les guides d'ondes optiques. Plus particulièrement ; il sera fait mention des fibres conventionnelles basées sur la réflexion totale et les fibres microstructurées qui guident la lumière soit grâce à un phénomène de réflexion totale interne modifiée, soit grâce à l'existence de bandes interdites photoniques.

### **3.1. Dans une fibre optique standard**

Dans la section 2.1. le guidage de la lumière a été interprété par les lois de l'optique géométrique ; comme étant une succession de réflexions totales internes. En effet ; la réflexion totale interne permet de confiner un faisceau lumineux dans une fibre optique, constituée d'un cœur d'indice de réfraction  $n_c$  et d'une gaine d'indice de réfraction  $n_g$  avec  $n_c > n_g$ .

Un rayon qui entre dans la fibre de telle sorte que l'angle d'incidence à l'interface cœur-gaine soit supérieur à l'angle critique  $i_c$  avec  $\sin i_c = n_g/n_c$  (ou un angle d'incidence inférieur à  $\theta_{\max}$  avec  $\theta = \frac{\pi}{2} - i$ ) subit une réflexion totale ; ultérieurement il est réfléchi de la même manière par d'autres points de l'interface en vertu de la symétrie cylindrique de la fibre.[18] On définit alors le cône d'acceptance qui caractérise l'ensemble des rayons effectivement transmis ; tout rayon hors de ce cône est définitivement perdu.

Théoriquement, c'est l'ouverture numérique notée ON qui caractérise le cône d'acceptance, elle est donnée par :

$$ON = \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

L'ouverture numérique d'une fibre optique représente sa capacité à récolter la lumière, autrement dit ; elle mesure la quantité de lumière que la fibre peut capturer. Plus l'ouverture numérique est grande, plus l'angle d'acceptance augmente.

L'ouverture numérique des fibres commerciales varie entre 0.1 et 0.6, plus l'écart entre les indices de réfraction du cœur et de la gaine est important, plus l'ouverture numérique est grande et plus grand est le nombre de modes ou rayons lumineux qui se propagent dans la fibre.

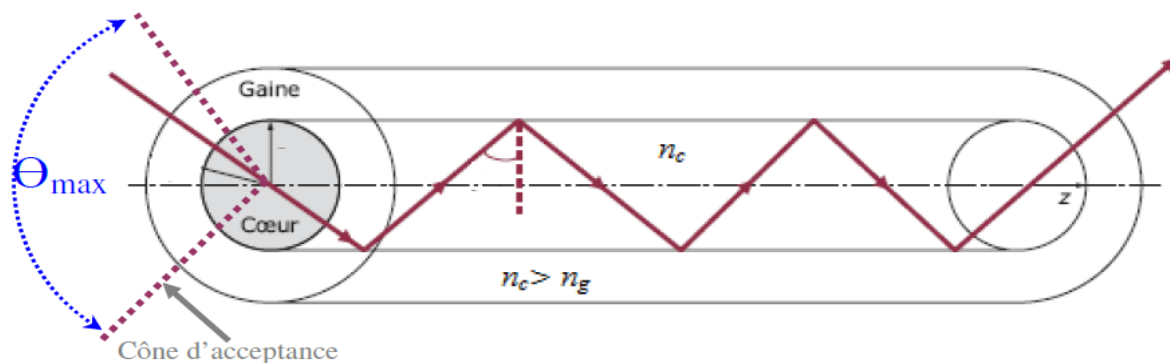


Figure -19- Guidage par réflexion totale interne.

Un rayon situé dans le cône d'acceptance est appelé rayon **guidé**, tandis que les autres, qui occasionnent des pertes de propagation sont dits **non guidés**.

La force de guidage d'une fibre optique est définie à partir de la valeur de l'indice de la gaine et de l'ouverture numérique par la relation suivante :

$$\Delta = \frac{ON^2}{2 n_g^2}$$

Le mécanisme de réflexion totale interne peut aussi être interprété à l'aide des diagrammes d'indice de réfraction des deux matériaux mis en jeu comme le montre la figure ci-dessous.

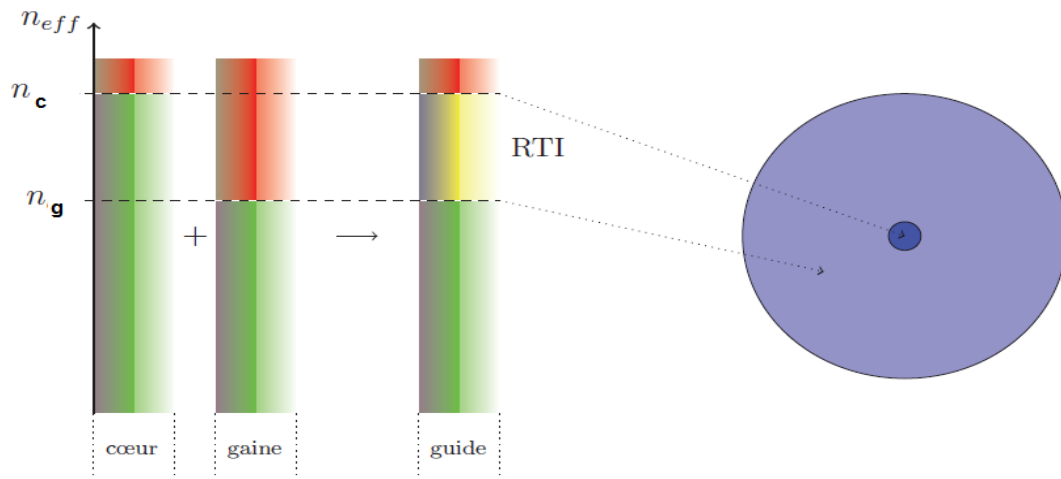


Figure -20- Diagramme des indices de réfraction d'une fibre optique.

Les zones vertes représentent les régions d'indice où la propagation est autorisée contrairement à celles en rouge où la propagation est interdite. On constate que dans le matériau formant le cœur, la propagation y est autorisée pour  $n_{eff} < n_c$  tandis que pour celui formant la gaine, la propagation est interdite pour  $n_{eff} > n_g$ . L'association de ces deux matériaux permet alors de piéger l'onde lumineuse dans le matériau constituant le cœur pour des indices effectifs assurant la condition suivante :

$$n_g < n_{eff} \leq n_c$$

Théoriquement la gaine n'est pas indispensable, puisqu'il est possible de guider les rayons par une fibre nue, l'indice du verre étant supérieur à celui de l'air. En fait ; la gaine a deux utilités : premièrement elle renforce la fibre et lui évite de se casser ou d'être endommager facilement, deuxièmement ; elle évite les fuites de la lumière vers d'autres fibres.

La nature ondulatoire de la lumière fait qu'il y ait interférence entre les diverses ondes à l'intérieur de la fibre. Les ondes lumineuses capables de se propager dans la fibre sont appelées modes et peuvent être déterminés mathématiquement par les équations de Maxwell. On distingue deux types de modes : rapides et lents.

Les modes rapides appelés aussi modes d'ordre faible sont les modes transmis dans la fibre avec un angle d'incidence faible, ces modes ci subissent peu de réflexions totales.



Par contre, les modes lents appelés aussi modes d'ordre élevé parcourent des trajets plus longs que les modes d'ordre faible.

### 3.2. Dans les fibres microstructurées

## Des trous d'air pour guider la lumière !!!

Le guidage de la lumière dans les fibres à cristaux photoniques peut s'effectuer de deux façons différentes, cela dépend de l'indice de réfraction du cœur, s'il est supérieur ou inférieur à celui de la gaine. Dans le premier cas, la propagation est réalisée par réflexion totale interne modifiée, alors que dans le deuxième cas, elle est assurée par l'existence de bandes interdites photoniques.

#### 3.2.1. Guidage par réflexion totale interne modifiée

Ce mécanisme peut s'interpréter de la même façon que pour les fibres standards à guidage par réflexion totale interne. En effet, les fibres à cœur plein présentent de nombreuses analogies avec les fibres à saut d'indice standards.

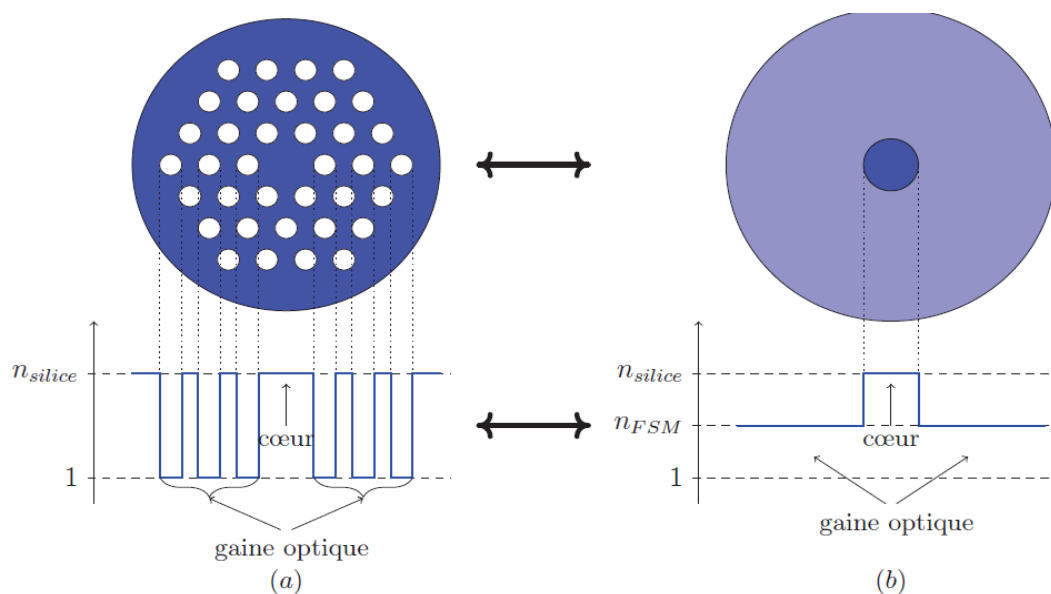


Figure -21- a- Fibre PCF à cœur plein  
b- Fibre à saut d'indice équivalente.

La figure ci-dessus schématise une fibre microstructurée à cœur plein (Holey fiber), le cœur est généralement constitué de silice pure et la gaine par un agencement de trous d'air. D'un premier abord, la justification d'une réflexion totale n'est pas évidente : rien n'empêche la lumière de s'échapper entre les cylindres d'air puisque le verre de silice constituant la fibre est le même partout. En fait, cette réflexion est liée à la nature ondulatoire de la lumière.

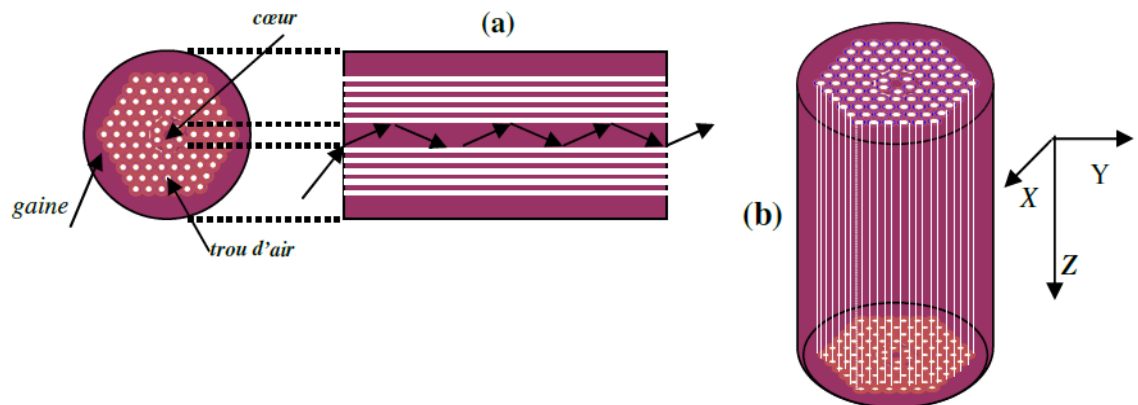


Figure -22- Réflection totale interne modifiée.

Pour que le guidage s'effectue, la condition physique à vérifier est que la constante de propagation  $\beta$  soit comprise entre  $kn_{\text{silice}}$  et  $\beta_{\text{FSM}}$ .

$$\beta_{\text{FSM}} < \beta \leq kn_{\text{silice}}$$

avec  $kn_{\text{silice}}$  constante de propagation maximale possible pour un mode dans la région du cœur (silice) et  $\beta_{\text{FSM}}$  la constante de propagation du mode de gaine de la fibre ayant l'ordre le plus faible. Ce mode est souvent appelé FSM (Fundamental Space-filling Mode) en raison de la distribution particulière de son énergie.

Dans une fibre microstructurée, l'indice de gaine dépend de la distance entre les trous et de leur diamètre, il est représenté par  $n_{\text{FSM}}$  contrairement à la fibre standard où l'indice de gaine est constant et défini par  $n_g$ .

Par analogie donc, la propagation par réflexion totale interne modifiée exige :

$$n_{\text{FSM}} < n_{\text{eff}} \leq n_{\text{silice}}$$

Cette analogie permet notamment d'introduire les mêmes paramètres comme la fréquence normalisée.

### 3.2.2. Guidage par bande interdite photonique

Comme l'indice du cœur est ici inférieur, le guidage ne peut pas se faire par réflexion totale interne modifiée, la lumière est plutôt confinée dans le cœur par la structure photonique qui l'entoure, qui est constituée d'un réseau périodique de trous d'air ; on parle d'un guidage par bandes interdites photoniques. Ces bandes sont

l'analogie pour les photons des bandes d'énergie interdites d'un semi conducteur cristallin pour les électrons. En fait la BIP est une bande de longueur d'onde pour laquelle la propagation de la lumière est interdite. Cette bande existe en raison de la périodicité du réseau, si on arrive à introduire un défaut dans ce réseau, alors un faisceau lumineux dont la longueur d'onde appartient à la BIP peut être piégé et propagé au niveau du défaut. Dans les fibres c'est le cœur qui constitue ce défaut. [7]

La largeur spectrale des bandes interdites photoniques dépend fortement de la différence d'indice entre les milieux qui composent le cristal. Plus cette différence d'indice est grande, plus les bandes interdites sont larges et donc, plus la bande de transmission de la fibre est grande. [10]

Les longueurs d'ondes centrales rejetées par le matériau BIP sont déterminées par la période  $\Lambda$  du cristal ( $\lambda \approx 2\Lambda$ ).

Pour que l'onde lumineuse soit confinée efficacement dans le cœur du guide, il faut que les deux conditions de guidage suivantes soient respectées :

- Les BIP doivent exister dans la gaine micro-structurée pour que la propagation y soit interdite.
- Les BIP doivent exister pour des indices effectifs inférieurs à l'indice du cœur pour que la propagation soit autorisée dans ce dernier.

Ces deux conditions sont alors traduites par les deux relations suivantes :

$$n_{\text{BIP bas}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{BIP haut}}$$

$$n_{\text{eff}} \leq n_{\text{cœur}}$$

Notons qu'il existe une autre condition sur la taille du cœur pour que la fibre supporte le guidage d'un ou plusieurs modes : si celle-ci est trop faible, aucun mode n'est correctement confiné même si les autres conditions sont respectées.

Les fibres à bandes interdites photoniques appelées aussi (Hollow fibers) réalisent le challenge de guider la lumière à l'intérieur d'un cœur d'indice plus faible que la gaine. [9] Cette nouvelle méthode de guidage de la lumière ouvre la voie à de nouvelles applications et à de nouveaux domaines de longueurs d'ondes accessibles de l'ultraviolet à l'infrarouge moyen. De plus, cette classe de fibre a d'autres propriétés spectaculaires non trouvées dans n'importe quel autre type de fibre. Elles sont peu sensibles aux courbures et leur dispersion anormale peut atteindre aisément des valeurs telles que plusieurs milliers de ps/nm/km.

Les fibres optiques à guidage par BIP ont deux propriétés principales : elles permettent d'ajuster la transmission sélective en longueurs d'ondes en fonction des paramètres opto-géométrique de la gaine microstructurée et la dispersion chromatique de vitesse de groupe due à l'effet BIP.

## Conclusion

Dans ce chapitre dédié à la propagation guidée et le guidage optique nous avons commencé dans un premier temps par la présentation des propriétés de la lumière et des deux modèles permettant de décrire sa nature (ondulatoire et corpusculaire).

La deuxième partie de ce chapitre avait pour but la présentation de l'élément clé de l'optique intégrée : le guide d'onde. Après la description des différents types des guides d'onde optiques et du phénomène de propagation guidée ; nous avons présenté les résultats caractérisant le guide d'onde plan à saut d'indice. Par la suite nous avons cité les principales méthodes utilisées pour calculer les indices effectifs et les champs électromagnétiques, telle que la méthode de l'indice effectif.

Dans la troisième et dernière partie de ce chapitre ; nous avons étudié les diverses propriétés des fibres optiques conventionnelles et microstructurées et le principe de guidage de la lumière dans chacune de ces deux types de fibres optiques. Comme nous l'avons souligné dans cette partie, la propagation de la lumière est régie par la réflexion totale interne dans les fibres conventionnelles, par réflexion totale interne modifiée dans les fibres microstructurées dont le cœur est un défaut de haut indice puis par guidage par bandes interdites photoniques dans les fibres microstructurées dont le cœur est un défaut de bas indice.

## Références chapitre 1

- [1] Snyder, A W, Love, J- Optical Waveguide Theory- 1984
- [2] Katsunari Okamoto- Fundamentals of Optical Waveguides- 2006
- [3] Charles CIRET- Structures de guides d'onde photo-induits et analogies quantiques- Thèse de Doctorat- Université de Lorraine- 2013
- [4] Bernard JACQUIER- Nano-optique du solide- 2012
- [5] Valérie MAUROY- Elaboration de fibres optiques nanostructurées dopées aux ions de terres rares- Thèse de Doctorat- Université de Nice-Sophia Antipolis- 2012
- [6] Mohammed El AMRAOUI- Fibres optiques microstructurées Chalcogénures fortement non linéaires à base de  $As_2S_3$  : vers de nouvelles sources supercontinuum infrarouges- Thèse de Doctorat- Université de Bourgogne- 2010
- [07] Perrine TOUPIN- Fibres optiques microstructurées en verre de chalcogénure pour la détection d'espèce chimiques et la conversion de longueurs d'onde- Thèse de doctorat- Université de Rennes 1 – 2013
- [8] Abdesselam HOCINI- Etude des guides d'ondes magnéto-optiques sol-gel en couches minces pour l'application en optique intégrée- Thèse de Doctorat- Université de Constantine- 2008
- [9] BENAÏSSA Fatima – Etude et simulation des ondes électromagnétiques dans les guides d'ondes à cristaux photoniques, Application aux fibres optiques – Mémoire de Magister- Université de Tlemcen- 2013
- [10] Ambre PEYRILLOUX- Modélisation et caractérisation des fibres microstructurées air/silice pour application aux télécommunications optiques- Thèse de Doctorat- Université Limoges- 2003
- [11] DAOUI Abdelkader – Fibres optiques microstructurées : Modélisation et optimisation des propriétés optiques- Mémoire de Magister- Université de Annaba- 2009
- [12] Coraline FORTIER- Génération de sources optiques fibrées très hautes cadences et caractérisations de fibres optiques microstructurées en verre de chalcogénure- Thèse de Doctorat- Université de Bourgogne- 2011
- [13] Rafael SALAS MONTIEL- étude et réalisation d'un PHASAR en optique intégrée sur verre- Rapport de Master II- Institut National Polytechnique de Grenoble- 2004
- [14] Riad BOUDELAL- étude de couplage d'un guide d'ondes avec une fibre optique Application en optique intégrée pour les télécoms optiques- Mémoire de Magister- Université Mentouri Constantine- 2010
- [15] Ibrahim EL MANSOURI- Sources impulsives picosecondes tout optique à très haut débit- Thèse de Doctorat- Université de Bourgogne- 2013
- [16] Casimer M.DeCusatis and Carolyn J Sher- Fiber Optic essentials – 200
- [17] Vincent PUREUR- Modélisation et caractérisation des fibres à guidage par bandes interdites photoniques à cœur solide- Thèse de Doctorat- Université de Lille- 2010

[18] Elisabeth GIACOBINO- Propagation guidée de la lumière – 2008.

# **Chapitre 2**

# **Les Systèmes de Transmissions Optiques.**



## Introduction

Parmi les éléments essentiels à l'existence humaine, le besoin de communiquer arrive juste après le besoin de survie. Les méthodes dont nous nous servons pour partager idées et informations évoluent sans cesse. Si le réseau humain se limitait autrefois à des conversations en face à face, aujourd'hui les découvertes en matière de **supports** étendent sans cesse la portée de nos communications grâce aux **réseaux de communications**.

La fonction principale d'un réseau est le transport de données d'une machine terminale à une autre. Une série d'équipements matériels et de processus logiciels sont mis en œuvre pour assurer ce transport, depuis les câbles terrestres ou les ondes radio dans lesquels circulent les données jusqu'aux protocoles et règles permettant de les traiter.

Nous entendons par **supports de transmission** tous les moyens par lesquels on peut transporter un signal d'une source vers une destination. Dans cette première partie nous allons tout d'abord citer les caractéristiques principales des supports de transmission, puis décrire quelques supports tels que le câble coaxial, la paire torsadée, la fibre optique... pour arriver enfin à faire une comparaison entre eux et expliquer pourquoi la fibre optique est le support privilégié pour les transmissions à haut débit.

La fibre optique est une alternative de plus en plus répandue aux câbles métalliques, qui utilise la lumière comme support des informations plutôt que l'électricité (**Chapitre 1**). En effet, il se passe entre les deux bouts de la fibre optique des phénomènes aussi divers que complexes. Ces phénomènes compliquent énormément l'utilisation de la fibre optique.

La deuxième partie de ce chapitre présente une vue générale sur les systèmes de transmission par fibre optique. En premier lieu, nous aborderons les différents effets de propagations qui limitent les performances d'une transmission par fibres optiques ; soit les effets linéaires tels que l'atténuation et la dispersion. Cette dernière se présente sous différentes formes ; on trouve la dispersion modale, chromatique et modale de polarisation. Soit les effets non linéaires tels que l'effet Kerr, les diffusions Raman et Brillouin.

Par la suite nous présenterons les composants constituant ces systèmes et nous décrirons les caractéristiques fondamentales des blocs principaux (bloc d'émission, ligne de transmission et bloc de détection).

La bande passante des fibres optiques permet théoriquement l'établissement de systèmes de transmission à des débits très élevés.

Pour profiter de l'avantage en bande passante qu'offrent les fibres optiques, il était nécessaire de développer des solutions permettant d'augmenter la capacité des réseaux, surtout avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs et de la quantité d'informations échangées dans les réseaux de communication. Les techniques de multiplexage permettent d'augmenter considérablement la capacité globale de transmission. On distingue plusieurs types de multiplexage dont les principaux sont le multiplexage temporel TDM et le multiplexage en longueur d'onde WDM.

Ces techniques permettant de transmettre  $N$  signaux de débit  $D$  sur le même canal, ce qui équivaut à la transmission d'un signal global de débit  $N \times D$ .

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous citerons les différentes techniques de multiplexage utilisées dans les systèmes de transmission optique et leurs principes de fonctionnement.

## I. Généralités

Un réseau est un ensemble d'équipements reliés entre eux grâce à des lignes physiques ou des ondes hertziennes dans le but d'échanger des données selon des règles bien définies.

On distingue généralement quatre catégories de réseaux informatiques, différenciées par la distance maximale séparant les points les plus éloignés du réseau :

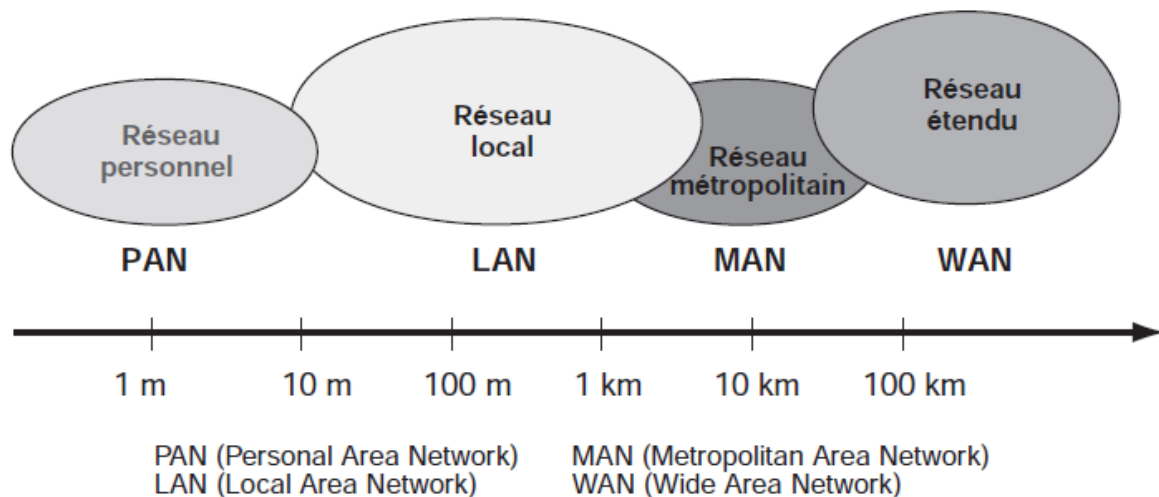


Figure -1- Catégories des réseaux informatiques.

- Les réseaux personnels **PAN** (Personal Area Network) aux dimensions d'une pièce, interconnectent des équipements personnels comme un ordinateur portable, une souris, etc.
- Les réseaux locaux **LAN** (Local Area Network) aux dimensions de locaux d'une entreprise
- Les réseaux métropolitains **MAN** (Metropolitan Area Network) aux dimensions d'une ville
- Les réseaux étendus **WAN** (Wide Area Network) aux dimensions d'un pays ou de la planète (Internet)

On peut également différencier les réseaux selon leur structure, ou plus précisément leur topologie. Selon le type de la topologie, l'information peut être diffusée sur un support commun (multipoint), ou être acheminée par les liens à l'accès unique (point-à-point). La première technique est largement répandue dans les réseaux locaux à courte distance. Le mode point-à-point est nécessaire dans les réseaux filaires longue distance.

La première chose à mettre en œuvre pour constituer le réseau est la transmission des informations d'un équipement à l'autre : on utilise des supports des transmissions dont nous présentons les caractéristiques dans le paragraphe suivant.

## 1. Les réseaux et les supports

Afin que les informations circulent au sein d'un réseau ; il est nécessaire de relier les différentes unités de communication à l'aide d'un **support de transmission**.

Un support est défini comme un canal physique permettant de relier des ordinateurs et des périphériques. Les caractéristiques et la qualité de transmission des données sont déterminées non seulement par les caractéristiques du signal transmis mais aussi par celles du support de transmission proprement dit.

### 1.1. Caractéristiques globales des supports de transmission

Dans la conception d'un système de transmission, il faut prendre en compte plusieurs facteurs caractérisant les supports de transmission, telle que la longueur maximale d'un câble ; qui est un critère très important et est généralement limitée par un facteur appelé atténuation. L'atténuation est l'affaiblissement du signal au fur et à mesure qu'il se propage sur le câble, plus celui-ci est long, plus l'atténuation sera importante.

Le blindage est également un critère important pour la conception. Certains câbles sont blindés de manière à ce que les interférences venant de l'extérieur ne modifient pas le signal lors de son passage dans le câble.

La nature du câble importe aussi. La plupart des câbles sont constitués soit de cuivre, et transportent un signal électrique, soit de fibre optique, et transportent alors un faisceau lumineux.

Ci-dessous les caractéristiques globales des supports de transmission.

- **La bande passante** : la bande passante est la plage de fréquences sur laquelle le support est capable de transmettre des signaux sans que leur affaiblissement soit trop important. Elle s'exprime en Hertz. Intuitivement plus le support a une bande passante importante plus il transporte d'informations par unité de temps.
- **Bruits et distorsions** : un signal transporté par un support de transmission est toujours déformé, même si sa fréquence est adaptée. En fait, il existe différentes sources de bruits qui perturbent le signal tels que les parasites. Les phénomènes environnementales introduisent aussi des perturbations ( orages, foudres, ...).

Par ailleurs, les supports affaiblissent et retardent les signaux. Ces déformations, appelées distorsions sont gênantes pour la bonne reconnaissance des signaux en sortie, d'autant qu'elles varient avec la fréquence et la phase des signaux émis.

Même lorsque les signaux sont adaptés aux supports, on ne peut pas garantir leur réception correcte à 100%. [19]

- **Longueur élémentaire** : elle représente la longueur maximale du support au-delà de laquelle le signal doit être amplifié ou répété pour être correctement reçu.

La capacité d'un support de transmission mesure la quantité d'informations transportée par unité de temps. Les caractéristiques citées ci-dessus font que la capacité d'un support est limitée. Elle est exprimée en bits par seconde par la relation suivante :

$$\text{Cap}_{\text{Max}} = W \log_2 (1 + S/B)$$

Où **W** est la largeur de la bande passante et **S/B** représente le rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit.

Selon le support, on peut atteindre des niveaux de qualité très divers selon :

- L'affaiblissement, en prenant en compte la distance maximale entre deux éléments actifs du réseau.
- La bande passante.
- L'immunité contre les parasites.
- L'isolation galvanique.

## 1.2. Différents types des supports de transmission

Les supports de transmission sont nombreux ; parmi ceux-ci on distingue les supports métalliques, non métalliques et les supports immatériels.

- 1.2.1. **Le cuivre** : deux types de support cuivre coexistent : la paire torsadée et le câble coaxial.

### 1.2.1.1. Le câble coaxial

C'est un câble utilisé en téléphonie et en télévision, il est constitué d'un cœur qui est un fil de cuivre. Ce cœur est dans une gaine isolante, elle-même entourée par une tresse de cuivre, le tout est recouvert d'une gaine isolante.

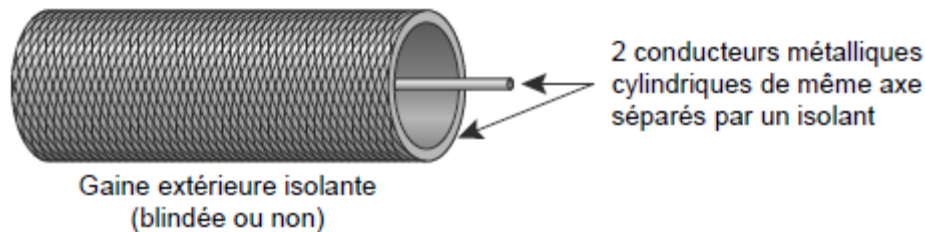


Figure -2- Câble coaxial.

La capacité de transmission d'un câble coaxial dépend de sa longueur et des caractéristiques physiques des conducteurs et de l'isolant. Moins sensible que la paire torsadée aux phénomènes électriques, la câble coaxial offre des débits potentiels beaucoup plus importants (jusqu'à 150 Mbps).

### 1.2.1.2. La paire torsadée

La paire torsadée est constituée de deux fils de cuivre isolés d'une épaisseur d'environ 1mm. Ces fils sont enroulés l'un sur l'autre, cela permet de réduire les radiations électromagnétiques perturbatrices.

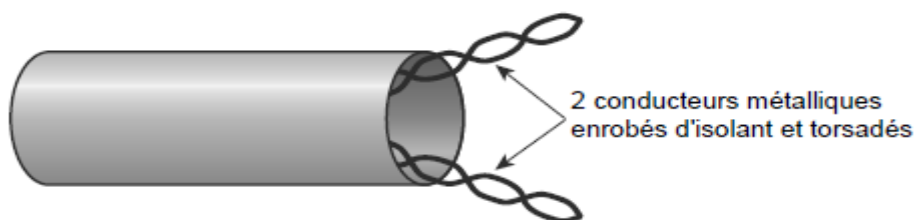


Figure -3- Paire torsadée.

La paire torsadée suffit pour les réseaux locaux d'entreprise où les distances se limitent à quelques kilomètres. Le débit binaire accessible dépend de la qualité du câble et de sa longueur, il peut varier entre quelques dizaines de Kbps sur quelques dizaines de Km, quelques Mbps sur quelques Km et plusieurs centaines de Mbps pour quelques centaines de mètres.

Pour améliorer les performances, on utilise la paire torsadée blindée, plus résistante aux perturbations électromagnétiques.

### 1.2.2. La fibre optique

La fibre optique est constituée d'un fil de verre très fin. Elle comprend un cœur, dans lequel se propage la lumière émise par une diode électroluminescente ou une source LASER et une gaine optique dont l'indice de réfraction garantit que le signal lumineux reste dans la fibre. [19]

Les fibres optiques offrent des bandes passantes très importantes de l'ordre du GHz, leur atténuation est très faible et les signaux véhiculés n'étant pas sujets aux interférences électriques, le taux d'erreurs est également très faible. De plus le câble optique est plus léger et moins encombrant qu'un support à base de cuivre.

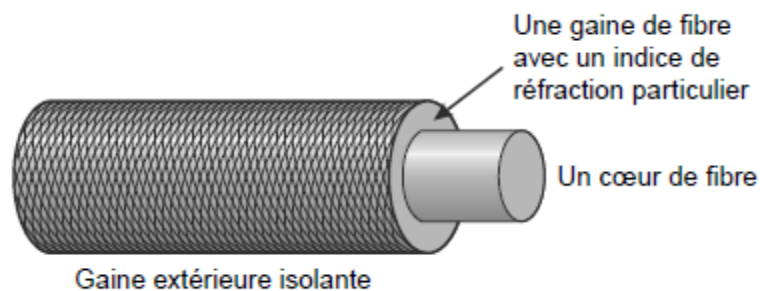


Figure -4- Fibre optique.

Le tableau ci-dessous regroupe les avantages et inconvénients des supports cités précédemment.

Type de câble	Avantages	Inconvénients
<b>Paire torsadée</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût faible</li> <li>- Simple</li> <li>- Possibilité de réutilisation de l'existant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensible aux perturbations électromagnétiques</li> <li>- Atténuation très importante</li> <li>- Débits faibles</li> </ul>
<b>Câble coaxial fin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caractéristiques intéressantes</li> <li>- Immunité aux bruits électromagnétiques</li> <li>- Transport des données analogiques (<math>75\Omega</math>) et numériques (<math>50\Omega</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficulté d'installation</li> <li>- Coût élevé</li> </ul>
<b>Fibre optique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de pertes d'informations</li> <li>- Haut débit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût très élevé</li> </ul>

Les supports immatériels appelés aussi supports non guidés peuvent être également utilisés lorsque la pose d'un câble physique est source de problèmes.

### **1.2.3. Le faisceau hertzien**

Les faisceaux hertziens utilisent des ondes électromagnétiques se propageant sur un milieu aérien. Un faisceau hertzien est constitué à l'aide d'un ensemble de relais terrestres permettant l'émission et la réception des ondes électromagnétiques ; ces ondes sont caractérisées par une bande passante très large, variant de 4 Ghz à 6 Ghz. La distance entre les relais varie entre 50 Km et 100 Km.

Ils sont principalement utilisés pour des réseaux de téléphonie, de transmission de données ou de diffusion d'émissions télévisées.

Le principal inconvénient de ces supports de transmission réside dans leur sensibilité aux conditions atmosphériques.

## **Pourquoi une fibre optique présente-t-elle un support approprié pour des liaisons des hauts débits ?**

### **1.3. Avantages des fibres optiques par rapport aux autres supports**

L'avènement des fibres optiques a révolutionné le domaine des télécommunications. Sa très faible atténuation, son niveau de bruit pratiquement nul et son faible coût ont fait que cette technologie s'est rapidement imposée comme milieu de choix pour le transport d'information sur de grandes distances.

Par rapport aux autres supports de transmission existants le choix de la fibre optique se justifie par les nombreux avantages qu'elle offre.

- Large bande passante (de l'ordre du THz) permettant d'atteindre des hauts débits (de l'ordre du Gbps).
- Grande sûreté de transmission.
- Faibles pertes d'information.
- Insensibilité aux rayonnements électromagnétiques et aux brouillages.
- Insensibilité thermique.
- Longue durée de vie.
- Peu d'interventions en maintenance.
- Petite taille et poids faible.



## II. Les systèmes de transmissions optiques

Les organisations des réseaux de télécommunications ont commencé à utiliser les systèmes de transmissions par fibres optiques il y a longtemps. Depuis, les chercheurs ont développé une collection impressionnante de composants sophistiqués actifs et passifs, des techniques de transmission spécialement pour les liaisons optiques et des logiciels basés sur des outils de modélisation des différents composants, des liens et des réseaux. Ces développements permettent aux systèmes de transmissions optiques d'offrir des débits de plus en plus élevés sur des distances de plus en plus longues.

La motivation pour développer des systèmes de transmissions par fibres optiques a commencé avec l'invention du LASER au début des années 1960. Les caractéristiques de fonctionnement de ce dispositif ont encouragé les chercheurs à examiner le spectre optique comme une extension du spectre des ondes radio et des micro-ondes pour fournir des liaisons de transmission avec de très grandes capacités.

### 1. Généralités

Les tous premiers systèmes de transmissions optiques étaient constitués de fibres optiques multimodes. La portée était limitée par la dispersion modale, due aux différentes vitesses de propagation des nombreux modes de la fibre, plutôt qu'à l'atténuation. Il était donc nécessaire de régénérer périodiquement le signal, à l'aide de répéteurs optoélectroniques impliquant une détection du signal lumineux, un traitement électronique complet incluant une resynchronisation puis une relise en forme du signal et un enfin un transfert de l'information sur une nouvelle fibre optique.

Vient ensuite la mise au point des fibres monomodes ; l'utilisation de ce type de fibres optiques posait un problème dans les années 1970; il n'existait aucune source de lumière qui pourrait coupler une quantité suffisante de puissance optique dans le petit cœur de ces fibres. Les principales sources de lumière étaient les diodes électroluminescentes et les diodes lasers émettant à 850 nm. La combinaison des premières sources lumineuses, des fibres multimodes et le fonctionnement à 850 nm limitait le débit des liaisons optiques à 140 Mbps sur des distances de 10Km.

La conception de lasers à semi conducteur émettant à 1300 nm ; à cette longueur d'onde la distorsion du signal due à la dispersion chromatique est la plus faible. Les systèmes ainsi conçus pouvaient transmettre des débits de l'ordre de 1Gbps, mais les distances atteignables étaient limitées par l'atténuation des fibres, de l'ordre de 0.5 dB/Km à cette longueur d'onde. Par conséquent, une nouvelle fenêtre de transmission a été exploitée (1550 nm), autour de cette longueur d'onde les pertes sont moins importantes 0.2 dB/Km, ce qui a permis d'atteindre des capacités d'environ 2Gbps.

L'apparition des amplificateurs à fibre dopée Erbium EDFA a permis la transmission des signaux optiques sur des distances de 9000 Km à des débits de 10 Gbps. Ces amplificateurs ont remplacé les répéteurs employés dans les systèmes de transmission optique.

C'est ainsi qu'au cours du temps, les performances des systèmes de transmission par fibres optiques ont augmenté de manière exponentielle.

Avant de décrire les principaux composants qui permettent de faire fonctionner un système de transmission optique, nous allons décrire les différents effets physiques que subissent les impulsions lumineuses au cours d'une propagation dans ce type de système ainsi que les conséquences de ces effets.

## **2. Effets de propagation et limitations des systèmes de transmission optique**

La propagation sur fibre optique comprend de nombreux effets physiques tels que les effets linéaires : pertes et dispersion et des effets non linéaires variés dont il faudra analyser les conséquences sur la qualité de transmission.

### **2.1. Effets linéaires**

#### **2.1.1. Atténuation**

L'atténuation correspond à une diminution de la puissance du signal transmis. En effet ; le niveau de puissance d'un signal qui se propage dans une fibre optique, s'affaiblit exponentiellement en fonction de la distance de propagation. L'atténuation s'exprime souvent en décibels par Kilomètre et est donnée par l'expression suivante :

$$\alpha_{\text{dB/m}} = \frac{10}{L} \log \frac{P}{P_0}$$

Où  $P_0$  est la puissance injectée en entrée,  $P$  la puissance mesurée en sortie et  $L$  la longueur de la fibre optique.

La distance maximale entre l'émetteur et le récepteur (ou bien entre les amplificateurs) dépend fortement de la constante  $A$  et de la puissance optique transmise par l'émetteur. [1]

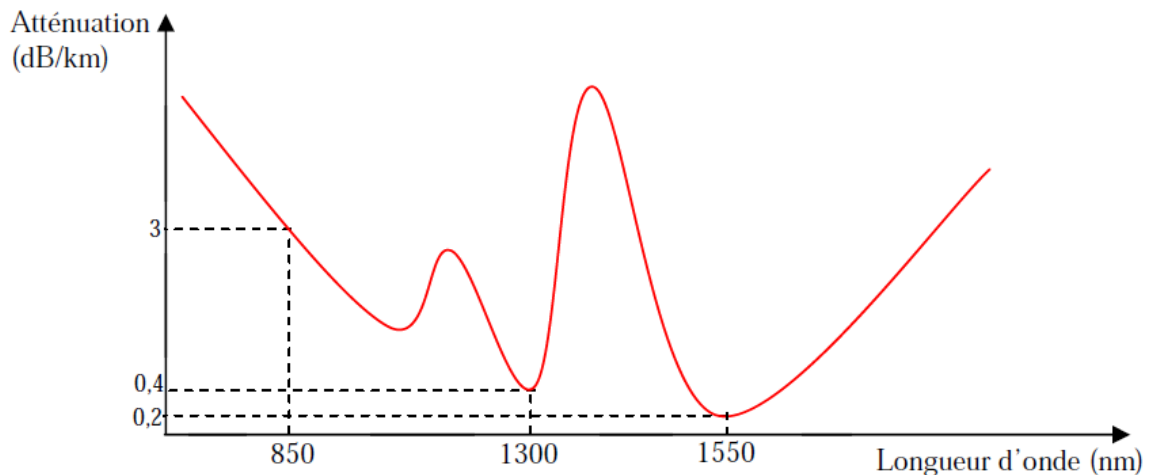


Figure-5- Pertes linéiques en fonction de la longueur d'onde.

Un minimum est observé autour de 1550 nm. A cette longueur d'onde les pertes de la fibre peuvent atteindre des valeurs inférieures à 0.2 dB/Km. A titre de comparaison les atténuations des câbles électriques sont de l'ordre de 100 à 1000 dB/Km.

L'atténuation dans la fibre optique a plusieurs origines ; la figure ci-dessous présente les différentes contraintes mécaniques et technologiques qui peuvent affecter les pertes des fibres optiques.

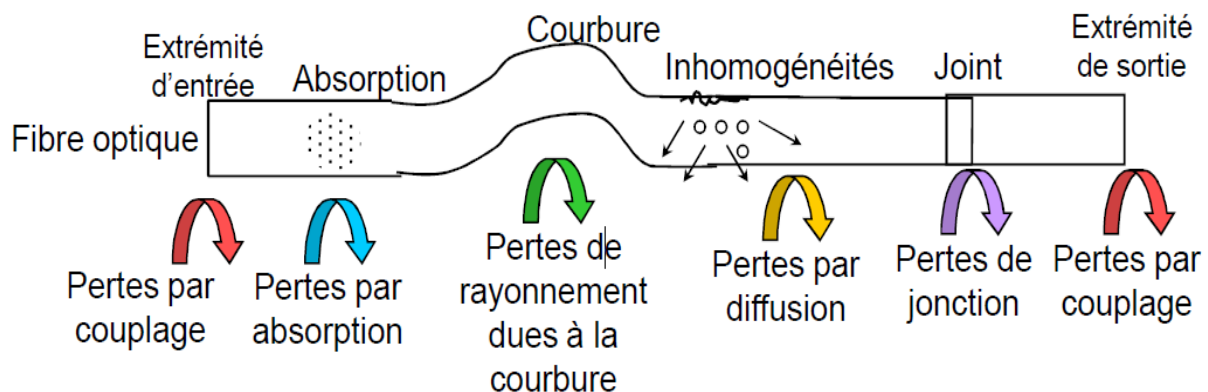


Figure - 6- Schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre optique.

## - L'absorption

Les phénomènes mis en jeu ici sont régis par les lois des échanges d'énergie au niveau des atomes constituant le matériau de la fibre (absorption intrinsèque) ou

ceux constituant les impuretés de ce matériau, comme les ions hydroxydes  $\text{OH}^-$  (absorption extrinsèque).

- **La diffusion**

- **Diffusion de Rayleigh** : tout milieu diffuse de la lumière. Cette diffusion est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la longueur d'onde ( $1/\lambda^4$ ). Elle se traduit par la propagation d'une partie de l'énergie incidente dans toutes les directions de l'espace.

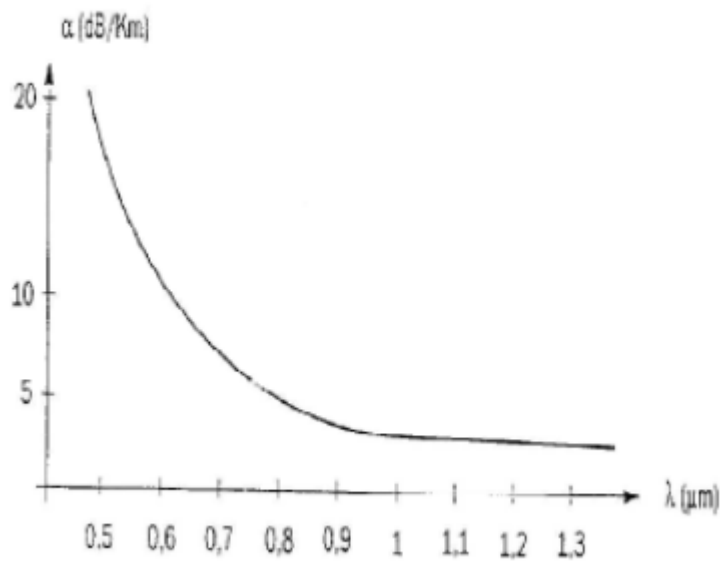


Figure -7- Diffusion de Rayleigh.

- Il existe un autre type de diffusion, dit **diffusion extrinsèque** qui est provoquée par les imperfections dans la structure de la fibre. cette diffusion ne dépend pas de la longueur d'onde et peut être réduite au minimum en améliorant les techniques de fabrication.
- **Courbures et micro courbures** : la courbure est une déformation de l'axe, une micro courbure est une déformation plus localisée. Toute courbure à petit rayon géométrique crée des pertes par rayonnement.
- **Pertes par couplage** : lors de l'injection dans la fibre optique, l'intégralité du rayonnement incident ne rentre pas dans le cœur ou ne se propage pas dans la fibre.

- **Pertes de connectique** : lorsqu'on raccorde bout à bout deux fibres optiques on voit apparaître des pertes ponctuelles ; ces pertes sont dues à une séparation longitudinale, un désalignement radial, un désalignement angulaire, une excentricité des cœurs ou une ellipticité des cœurs comme le montre la figure ci-dessous.

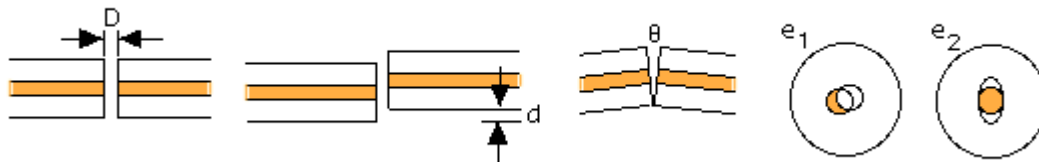


Figure -8- Pertes de connectique.

En superposant ces atténuations, trois fenêtres spectrales avec une atténuation assez faible apparaissent :

- La fenêtre à **0.8  $\mu\text{m}$** , la première utilisée historiquement, correspond à une atténuation de 2.5 dB/km.
- La fenêtre à **1.3  $\mu\text{m}$**  correspond à une atténuation de 0.7 dB/km en moyenne. Elle est utilisée pour les systèmes de télécommunications de courte distance (quelques dizaines de kilomètres) ou faible capacité tels que les réseaux urbains.
- La fenêtre à **1.5  $\mu\text{m}$**  correspond à une atténuation de 0.2 dB/km. Elle est très intéressante pour les applications à très longue distance.

### 2.1.2. La dispersion

Lorsqu'une impulsion se propage en régime linéaire dans une fibre optique, elle subit un phénomène de dispersion qui se traduit par un étalement temporel de celle-ci.

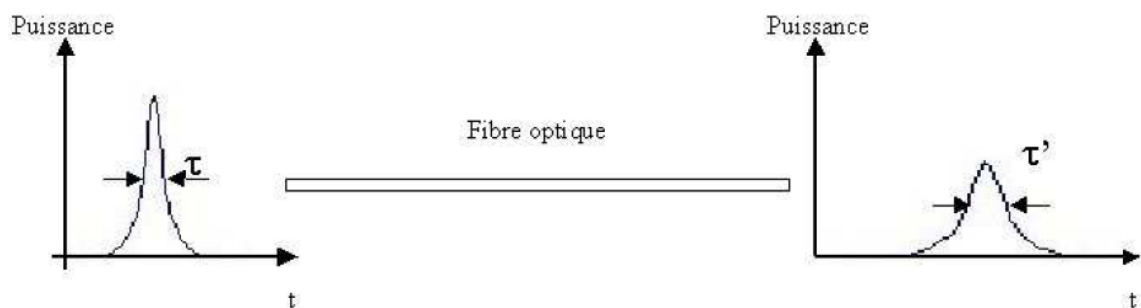


Figure -9- Phénomène de dispersion.

Il existe plusieurs types de dispersion, contribuant tous à l'étalement de l'impulsion au cours de sa propagation dans la fibre : dispersion modale ; déjà citée précédemment, dispersion chromatique et dispersion de polarisation.

**La dispersion modale** ou intermodale est la principale cause de dispersion dans les fibres multimodes, elle limite la distance de propagation et le débit avec lequel on peut transmettre l'information. [4] Elle provient principalement de la différence de temps de parcours des différents modes dans la fibre en fonction des chemins parcourus.

**La dispersion chromatique** est due à la variation de la vitesse de propagation des différentes composantes spectrales du signal de transmission, en fait, chaque impulsion de lumière est faite d'un nombre fini de longueurs d'onde qui se propagent de façon différente, donc la dispersion chromatique provient de la variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde.

La dispersion chromatique résulte de la somme deux effets : la dispersion propre au matériau et la dispersion du guide. Cette dernière provient de l'évolution de la constante de propagation des modes, rapportée à l'indice de réfraction, suivant les valeurs de la fréquence optique de la porteuse du signal. [4]

Elle limite la distance sur laquelle un signal peut être transmis sans régénération électronique du signal d'origine. Cette distance appelée limite de dispersion est donnée par la relation suivante :

$$L_D \approx \frac{1}{2 B D \Delta \lambda}$$

Où B représente le débit de transmission. Par conséquent, la dispersion chromatique limite également le débit d'une liaison optique.

**La dispersion modale de polarisation (PMD)** est une dispersion modale pour laquelle deux modes de polarisation orthogonaux de la lumière à la même longueur d'onde se propagent à des vitesses différentes en raison de la biréfringence de la fibre, provoquant également un élargissement des impulsions lumineuses. [5]

La PMD se traduit par une gigue temporelle dont les effets sur le récepteur vont être d'autant plus pénalisants que le débit est élevé.

## 2.2. Les effets non linéaires

Les systèmes de transmission optique sont conçus dans l'hypothèse d'une transmission linéaire. Les effets non linéaires présentent un des mécanismes fondamentaux qui limitent la quantité de données qui peuvent être transmises sur une fibre optique.

Un effet est dit non linéaire, si la réponse à la contrainte d'un système n'est pas proportionnelle (pas linéaire) à la contrainte appliquée. Dans le cas de l'optique non linéaire ; la contrainte correspond à un champ électromagnétique et la réponse varie selon le milieu traversé : émission de longueurs d'ondes, amplification du signal,...etc. [6]

### 2.2.1. Effet Kerr

Les effets non linéaires subis par le signal optique au cours de sa propagation proviennent majoritairement de l'effet Kerr. Cet effet consiste en une variation de l'indice de réfraction du matériau en fonction de l'intensité du signal optique. [7] L'influence de l'effet Kerr sur un signal optique peut s'observer à travers trois phénomènes différents : l'auto modulation de phase, la modulation de phase croisée et le mélange à quatre ondes

- **Auto modulation de phase : SPM** (Self Phase Modulation) ; une seule onde est mise en jeu ici d'où le nom d'auto modulation de phase. C'est la modification de la phase du signal sous l'effet de sa propre puissance. Elle provoque un élargissement spectral des impulsions de forte intensité. Dans le contexte du WDM, cet effet peut créer la diaphonie entre les canaux (cross-talk).
- **Modulation de phase croisée : XPM** (Cross Phase Modulation) ; très similaire à l'auto modulation de phase ; cet effet intervient quand il y a au moins deux ondes de fréquences différentes qui se propagent simultanément dans la fibre. la puissance d'un signal modifie l'indice de réfraction et donc les propriétés du milieu dans lequel se propage également le second signal. Ainsi si un signal est modulé en intensité, l'indice de réfraction de la fibre se trouve également modulé ainsi que la phase du second signal. [8]
- **Mélange à quatre ondes : FWM** (Four Waves Mixing) est un effet optique non linéaire qui consiste en l'interaction de trois ondes électromagnétiques menant à la génération d'une quatrième.

### 2.2.2. Effet Raman et Brillouin

Deux autres effets non linéaires, les diffusions Raman et Brillouin stimulées peuvent dans certains cas limiter la performance des systèmes de communication. Ces phénomènes sont tout à fait similaires, la principale différence réside dans les états de vibrations excités. L'effet Raman résulte de l'interaction d'un photon avec un phonon optique alors que l'effet Brillouin résulte de l'interaction d'un photon optique avec un phonon acoustique.

L'effet SBS (Stimulated Brillouin Scattering) impose une limite sur la quantité de puissance optique qui peut être utilement injectée dans une fibre optique. L'effet SRS (Stimulated Raman Scattering) limite la quantité de la lumière qui peut atteindre le récepteur.

### **2.2.3. Super continuum**

Un super continuum est un phénomène optique non linéaire correspondant à l'élargissement conséquent du spectre d'une onde optique au cours de sa propagation dans un milieu. Il est dû à la combinaison de plusieurs effets non linéaires cités précédemment.

Les quelques effets non linéaires décrits ci-dessus ne présentent pas une liste exhaustive des effets non linéaires rencontrés dans les fibres. Cependant, ils sont les plus couramment rencontrés.

Les effets non linéaires dans une fibre optique peuvent avoir un impact significatif sur les performances des systèmes de transmission optique WDM. Dans un système WDM ; ces effets imposent des contraintes sur l'espacement entre les canaux adjacents, ils limitent aussi la puissance maximale du canal, le débit binaire maximal et la portée du système.

Dans cette partie nous avons évoqué les principaux effets limitant le débit des transmissions numériques optiques. Il ressort de cette présentation que les dégradations vont croître ; en termes de pénalité dans le système ; avec le débit du signal et la longueur de la ligne de transmission. Dans ce qui suit, nous allons présenter la chaîne de transmission optique tout en décrivant très brièvement le rôle de chaque bloc et composant de cette chaîne optique.



### III. Différents composants d'un système de transmission optique

L'architecture d'un système de transmission est en pratique très complexe mais au niveau élémentaire, tous les réseaux sont fondés sur des lignes qu'on appelle liaisons point à point et dont l'architecture est présentée dans la figure ci-dessous. Tous les systèmes se composent d'un module d'émission, d'une série de tronçons de fibres optiques et d'un module de réception.

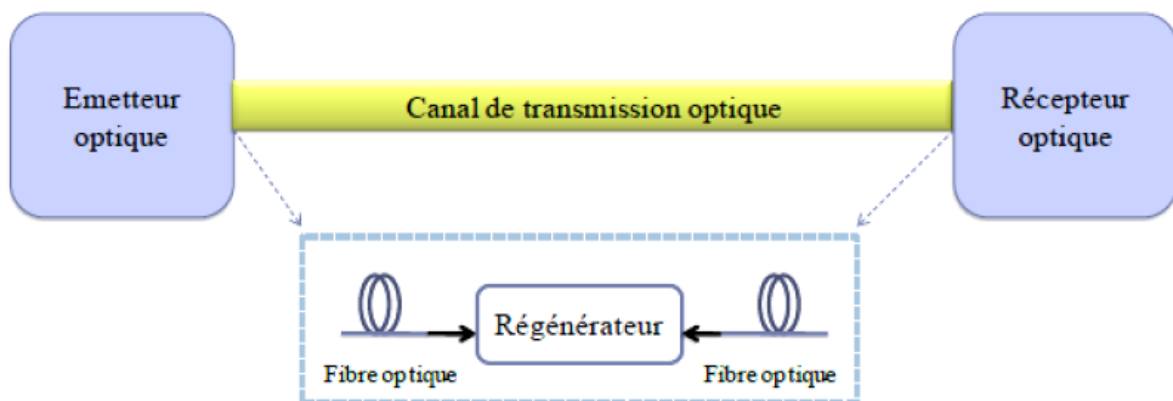


Figure -10- schéma d'une liaison optique .

Le rôle d'un tel système est premièrement, au niveau du bloc émetteur, d'émettre un signal optique continu et de le moduler. Ensuite ; la ligne optique a pour objectif de faire propager ce signal optique sur une distance donnée, en prenant en considération les différents effets de propagations qui peuvent affecter le signal. Et finalement, au niveau du récepteur, ce signal optique est détecté par un module de détection.

#### 1. Composants d'émission

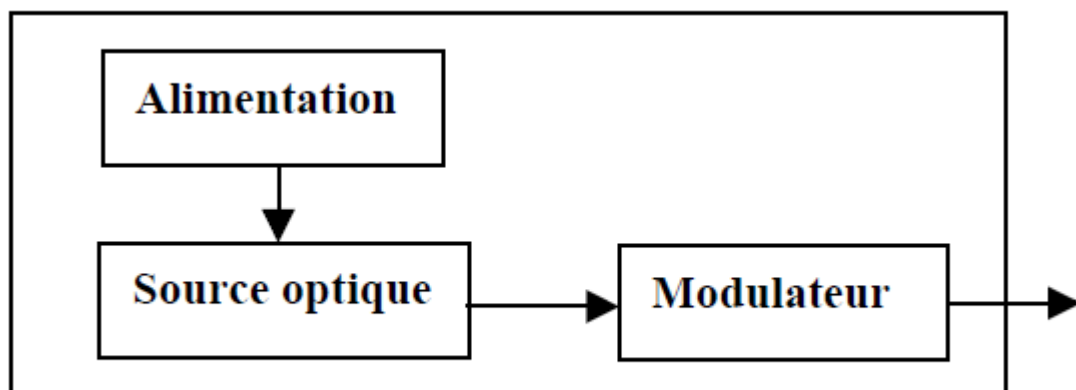


Figure-11- Structure d'un émetteur optique.

## **1.1. Les sources optiques**

Les sources optiques sont des composants actifs dans les systèmes de transmission par fibre optique, leur fonction principale est la conversion électro-optique, c'est-à-dire la conversion de l'énergie lumineuse en une énergie optique.

Une bonne source de rayonnement doit être intense, consommer peu de puissance, avoir un temps de réponse rapide, être modulable facilement, fiable et économique. En outre ; le choix de la source doit tenir compte des propriétés de la fibre : la lumière doit être injectée dans le cône d'acceptance, la longueur d'onde doit correspondre à une atténuation réduite et la largeur spectrale doit être faible pour minimiser la dispersion.

On distingue les diodes électroluminescentes et les diodes lasers ; ces deux dispositifs sont différents malgré leurs similitudes. Tous les deux réalisées à partir de jonction PN polarisée en direct et basées sur la recombinaison des paires électron-trou.

### **1.1.1. La diode électroluminescente**

Si on regarde autour de nous, on trouvera des diodes électroluminescentes partout. Elles peuvent être trouvées en vert, jaune ou rouge dans les véhicules, le matériel informatique, les téléphones ou tout dispositif électronique.

Une diode électroluminescente ou LED (Light Emitting Diode) est le composant émetteur le plus simple. Elle est basée sur l'émission spontanée et la lumière produite à sa sortie est caractérisée par un large spectre et une faible directivité. Elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes.

### **1.1.2. La diode laser**

Une diode laser est un composant capable de produire un rayonnement par émission stimulée comme l'indique l'acronyme dont le mot est issu de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ». C'est une source cohérente et monochromatique, elle a une bande passante très importante et une faible largeur spectrale. Elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance.

Il existe différents types de diodes lasers (Annexe2) : les lasers FP (Fabry Perrot), les DFB (Distributed-feedback) et les VCSEL (Vertical-cavity Surface Emitting Laser) (voir Annexe2). Ces diodes lasers ont généralement une petite taille, une bonne qualité spectrale, une faible consommation énergétique et une longueur d'onde ajustable compatible avec les fenêtres de transmission des fibres optiques. [5]

Comme le montre la figure ci-dessous, la LED présente un spectre continu et assez large, par conséquent cette source est très sensible à la dispersion chromatique. Par contre ; le spectre d'une diode laser est monomode longitudinale.

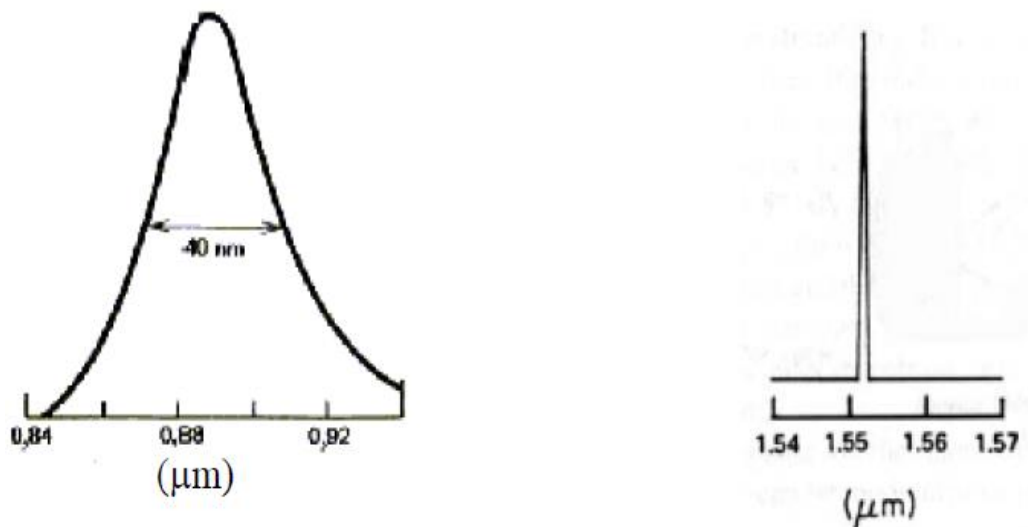


Figure-12- Spectre d'émission d'une LED et d'une DL.

La diode électroluminescente est privilégiée pour la conception de liens de communications optiques sur de courtes distances en prenant en compte son faible coût et sa facilité de mise en œuvre. Par contre ; la diode laser est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques car elle permet d'avoir la meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre.

## 1.2. Les modulateurs

Pour transmettre des données à travers une fibre optique, ces données doivent tout d'abord être codées ou bien modulées. Il existe principalement deux techniques : la modulation directe (interne) et la modulation externe.

Parmi les différentes techniques de modulation existantes ; la modulation d'amplitude numérique à deux états ASK-2 appelée aussi OOK (On Off Keying) est la méthode préférée vu sa simplicité.

### 1.2.1. Modulation directe

Dans ce type de modulation c'est la source optique qui réalise la modulation en plus de la conversion électro-optique.

La modulation directe a l'avantage d'être simple, facile à mettre en œuvre, efficace et peu coûteuse. Elle nécessite une tension réduite et une puissance faible. L'inconvénient de cette modulation est que lorsqu'on module en amplitude le courant d'injection d'un laser est accompagné d'une modulation de fréquence parasite ou chirp

### 1.2.2. Modulation externe

Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser. [9] Elle est utilisée pour les fréquences très élevées, à partir de 5 à 10 Ghz. Cette méthode est plus rapide et permet donc d'envoyer des débits plus élevés.

Deux types de modulateurs externes sont couramment utilisés dans la pratique : le modulateur Mach-Zehnder (MZM) et le modulateur à électro-absorption (EAM).

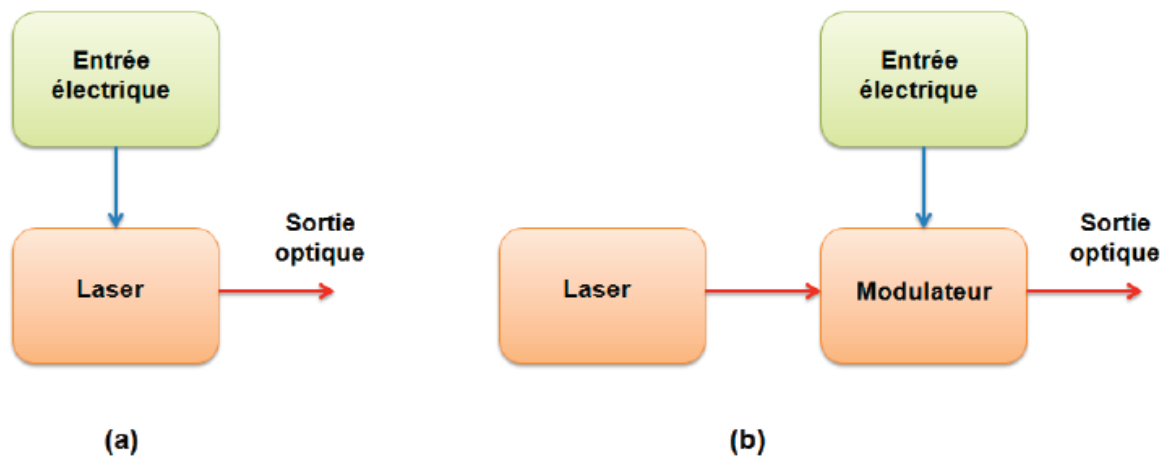


Figure -13- Bloc-diagramme de l'émetteur optique avec (a) modulation directe et (b) modulation externe.

La modulation directe a l'avantage d'être simple et moins coûteuse. Elle est généralement utilisée pour les transmissions à un débit de quelques Gbps. Mais au-delà de 5Gbps la modulation externe est indispensable pour maintenir une qualité de transmission correcte.

Les formats de modulation constituent un sujet de recherche important pour les transmissions à haut débit puisque la forme physique du signal doit être adaptée d'une part, pour mieux contrecarrer les effets physiques de la propagation et d'autre part, pour augmenter la densité spectrale d'information. [10]

## 2. Composants de la ligne de transmission

Une fois le signal optique émis par la source et modulé suivant le format choisi, il est introduit dans la première fibre optique du système et peut ainsi commencer, sous cette forme, une propagation sur une distance pouvant aller de quelques centaines de kilomètres pour les systèmes métropolitains à plus de 10000 km pour les systèmes sous marins les plus longs. [7]

L'étude des différentes propriétés de la fibre optique a été faite dans le chapitre précédent. Bien que ce support de transmission ait une atténuation très faible par rapport aux autres supports, le signal qui s'y propage ne peut pas être détecté après une certaine distance. Pour cela on utilise ce qu'on appelle les amplificateurs.

### 2.1. Les amplificateurs

Dans les systèmes de transmission optique, les signaux optiques s'atténuent en se propageant dans la fibre, les pertes sont dues à la fibre elle-même et aux différents composants optiques parcourus par ces signaux. Au-delà d'une certaine distance, les pertes deviennent importantes et le signal devient trop faible pour être détecté. Avant que cela se produise, il faut restaurer la puissance du signal.

Avant l'avènement des amplificateurs optiques, des répéteurs permettant de renforcer le signal ont été utilisés, ces derniers se positionnaient tout au long de la ligne de transmission pour régénérer le signal (R), le remettre en forme (2R) et la resynchroniser ou récupérer le rythme (3R).

Contrairement aux répéteurs, les amplificateurs optiques ont plus de performances car ils sont insensibles à la vitesse de transmission et au format de modulation utilisé par le système. En plus ; les amplificateurs optiques bénéficient d'une bande assez grande et par conséquent, un seul amplificateur peut amplifier plusieurs canaux WDM en même temps, ce qui n'est pas possible avec les générateurs qui sont spécifiés pour chaque canal.

Les amplificateurs sont caractérisés par le **gain** qui mesure le rapport entre la puissance de sortie du signal et la puissance d'entrée. Parfois ; les amplificateurs sont aussi caractérisés par un paramètre appelé **efficacité du gain** qui représente le rapport entre le gain et la puissance de pompe (en dB/mW). Seulement une gamme de fréquences optiques ou de longueurs d'onde appelé **bande spectrale** peut être amplifiée par un amplificateur donné. Tout amplificateur optique a une puissance de sortie maximale appelée **puissance de saturation** au dessus de laquelle l'augmentation de la puissance d'entrée du signal n'aura aucun effet sur la puissance de sortie.

Il y a plusieurs sources de bruit qui affectent les amplificateurs optiques, en particulier, ces dispositifs sont sensibles à la variation de la polarisation du signal. La **sensibilité à**

la **polarisation** se réfère à la variation du gain de l'amplificateur en fonction de la polarisation du signal.

Les caractéristiques d'un amplificateur optique varient selon sa position dans la chaîne de transmission. On distingue :

Le **post-amplificateur** appelé aussi amplificateur de puissance (booster amplifieur) ; il est placé juste après le module d'émission. Il permet d'amplifier le signal de l'émetteur pour lui permettre d'être transmis sur une longue distance. Il doit avoir une puissance de saturation très élevée.

L'**amplificateur en ligne** ; placé sur une ligne de transmission, son rôle est d'amplifier le signal après une certaine distance de propagation pour lui permettre de parcourir une autre distance. Il doit avoir un faible facteur de bruit et un gain important.

Le **pré-amplificateur** ; placé juste avant le module de réception pour permettre au signal d'avoir une puissance suffisante pour être détecté dans de bonnes conditions. Il doit amplifier le signal utile qui a accumulé beaucoup de bruit et subi une forte atténuation. Par conséquent ; le facteur de bruit doit être le plus faible possible.

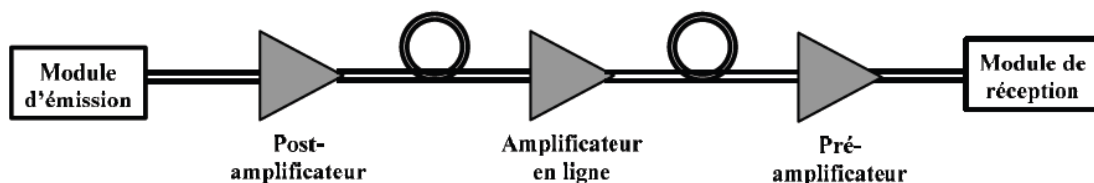


Figure -14- Types des amplificateurs selon la position dans la chaîne de transmission.

Les amplificateurs optiques ont le même principe de fonctionnement d'un laser, ils sont basés sur l'émission stimulée (Annexe1). Ils peuvent être classés en 2 grandes catégories : les amplificateurs optiques à fibre et les amplificateurs optiques à semi conducteur.

### 2.1.1. Amplificateur optique à semi conducteur (AOSC)

Un SOA est un dispositif optoélectronique qui peut, dans des conditions d'exploitation appropriées, amplifier un signal lumineux incident. Les travaux sur les amplificateurs à semi conducteur ont commencé à partir du moment où les lasers à semi conducteur fonctionnaient en continu avec une fiabilité acceptable. Leur structure de base est peu différente de celle d'une diode laser. Contrairement aux lasers à semi

conducteur ; il n y a pas de miroir aux extrémités mais un revêtement anti-reflets est déposé sur les faces afin de minimiser les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit. Ce dispositif d'amplification est de petite taille et a l'avantage que le pompage est électrique .

### 2.1.2. Amplificateur optique à fibre dopée Erbium (EDFA)

L'EDFA est considéré aujourd'hui comme un dispositif clé pour tous les réseaux optiques actuels. Il s'agit de morceaux de fibres optiques de longueur variant de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres dans le cœur desquelles ont été ajoutés des ions de terre rare (la plupart du temps c'est des ions d'Erbium car ils présentent une transition radiative autour de 1.55  $\mu\text{m}$ ). Un pompage optique conduit à l'inversion de la population des ions terre rare qui passent dans un état excité. Le pompage s'effectue autour de 980 nm ou 1480 nm. Le signal optique qui traverse la fibre dopée stimule le retour à l'équilibre des ions Erbium dans la fibre. L'émission radiative stimulée autour de 1.55  $\mu\text{m}$  qui en résulte amplifie le signal. [11]

Lorsqu'un signal laser de longueur d'onde plus faible (980 ou 1480 nm) dit signal de pompe est envoyé dans la fibre, les dopants passent dans un état de plus haute énergie dit excité.

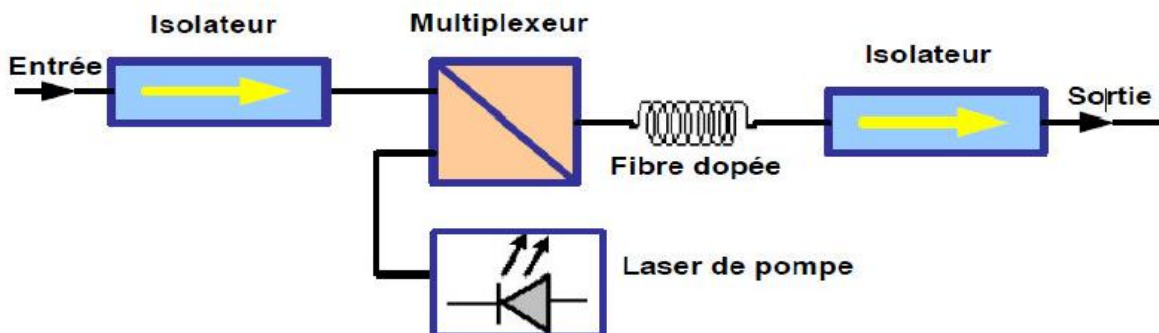


Figure -15- Eléments constitutifs de l'amplificateur EDFA.

La figure ci-dessus représente les éléments constitutifs de l'EDFA qui sont :

- La fibre dopée
- La pompe laser
- Le multiplexeur
- L'isolateur ; un dispositif passif ne permettant la propagation du signal que dans un sens.

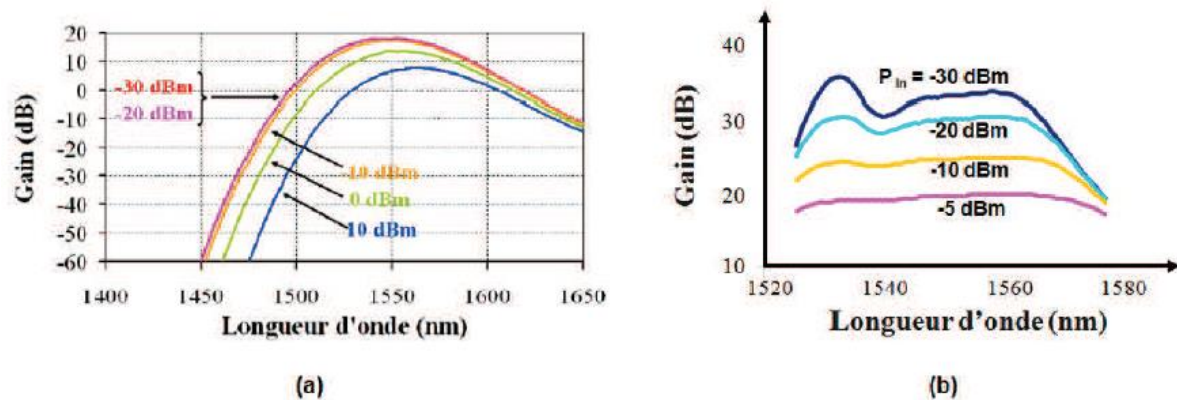


Figure-16- Spectre du gain (a) d'un SOA (b) d'un EDFA.

Le tableau ci-dessous montre une comparaison entre les principales caractéristiques du SOA et de l'EDFA.

Caractéristique	SOA	EDFA
Gain maximum	20 – 35 dB	30 – 50 dB
Bande de longueur d'onde	1280 – 1650 nm	1530 – 1560 nm
Bande passante à -3 dB	30 – 80 nm	35 nm
Pertes d'insertion	3 dB	0.1 – 2 dB
Puissance de saturation à la sortie	5 – 15 dBm	10 – 20 dBm
Facteur de bruit	7 – 12 dB	< 5 dB
Alimentation	électrique	Optique

La comparaison des performances des SOA et des amplificateurs à fibres dopées sont aujourd'hui en faveur des amplificateurs EDFA. Ces derniers ont l'avantage de la facilité d'utilisation. Il est en effet plus facile de raccorder un amplificateur fibré à une fibre optique car on conserve le même type de guide d'onde. Les pertes d'insertion seront réduites au minimum si on utilise un bon connecteur. Par contre ; dans le cas d'un amplificateur à semi conducteur, l'injection du signal de la fibre à l'amplificateur, et de l'amplificateur à la fibre nécessite une adaptation et les pertes seront plus importantes.

Toutefois, des études récentes montrent que les SOA peuvent atteindre des performances des EDFA tout en ayant une bande passante optique plus large de l'ordre de 100 nm à 1dB.

Il est aussi possible de réaliser des amplificateurs optiques basés sur les effets non linéaires telles que les diffusions Raman et Brillouin.



### 2.1.3. Amplificateur Raman

Les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de transmissions optiques longues et très longues distances, ce qui en fait d'eux les premiers dispositifs optiques non linéaires largement commercialisés dans le marché des télécommunications.

L'amplificateur Raman utilise la fibre de transmission elle-même comme un milieu d'amplification. L'amplificateur Raman est basé sur le principe de la diffusion Raman qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un phonon.

#### ! Bruit d'émission spontanée

L'utilisation des amplificateurs optiques présente une grande source de dégradation du signal, puisqu'elle génère un bruit d'émission spontanée amplifiée (**ASE Amplified Spontaneous Emission**). Elle est due aux recombinaisons spontanées et émet des photons en tout point de la zone active. A chaque passage dans un amplificateur à fibre dopée ou à semi conducteurs, on dégrade le rapport signal sur bruit.

Ce bruit optique, lié à l'émission spontanée amplifiée est le facteur essentiel qui limite les performances des amplificateurs optiques.

Avec l'augmentation des débits, les amplificateurs optiques dans les systèmes de transmissions optiques doivent aujourd'hui réunir, en plus des caractéristiques d'amplification en termes de gain, de facteur de bruit et de puissance de saturation, d'une grande bande passante optique permettant d'envoyer des canaux supplémentaires.

**La nécessité de disposer de photorécepteurs performants, fiables, compacts et susceptibles d'être produits en grandes quantités, et par la même à faible coût, s'inscrit dans la droite ligne du formidable essor des télécommunications optiques de ces dernières années.**

### 3. Composants de détection

Après propagation le long d'une série de tronçons de fibres optiques, et d'amplificateurs, le signal arrive au niveau du récepteur. La fonction d'un récepteur dans un système de transmission optique est de détecter et démoduler un signal lumineux transmis sur une fibre. Autrement dit, le but de la détection est de réaliser la fonction inverse de celle du modulateur à savoir convertir le signal optique en signal électrique. [12]

Le module de réception se compose de trois blocs fonctionnels : le bloc du premier étage composé de photodétecteur, il peut être accompagné d'un préamplificateur. Ce dernier permet de rendre le photocourant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photodétecteur. [13] Le deuxième bloc se compose d'un amplificateur électrique et d'un filtre réducteur de bruit et le troisième bloc dans lequel se fait la récupération des données on trouve un circuit de décision et un autre de synchronisation (circuit de récupération du rythme).

- **Détection cohérente** : elle réalise une détection linéaire, elle consiste à transposer l'enveloppe complexe du signal du signal optique reçu dans le domaine électrique.
- **Détection directe (hétérodyne)** : c'est une détection quadratique, elle consiste à convertir, en utilisant une photodiode, les fluctuations de puissance optique porteuses de l'information en fluctuations de courant électrique. Cette méthode délivre un courant électrique proportionnel à la puissance optique.

### 3.1. La photodiode

La photodiode est un dispositif optoélectronique, qui, suite à l'absorption de photons, génère un courant électrique. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité, le photodétecteur doit être utilisé dans des systèmes fonctionnant à 10 Gbps voire même 40 Gbps, et la troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit. [14] Les photodétecteurs à semi-conducteur présentent le choix qui satisfait la plupart de ces conditions.

#### 3.1.1. Principe de la photodétection

Les photons transmis par la fibre optique pénètrent dans le détecteur, constitué d'un semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Ce n'est pas tous les photons qui subissent automatiquement une photodétection ; ils doivent posséder une énergie  $E$  supérieure ou égale à la hauteur de la bande interdite pour faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Dans cette dernière les électrons moins liés deviennent libres. Chaque photon va donc laisser place à une paire électron-trou. Afin d'empêcher l'électron de retomber dans son état le plus stable, une différence de potentiel est appliquée. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. [15]

### 3.1.2. Différents types de photodétecteurs

#### 3.1.2.1. Photodiode PIN

Dans le cas de la photodiode **PIN** (Positive Intrinsic Negative), le détecteur est réalisé par une diode de type (Positive Intrinsic Negative) ; elle est constituée d'un matériau intrinsèque désigné par *i* et légèrement dopé *n* qui est inséré entre un substrat de type *p* et un substrat de type *n*.

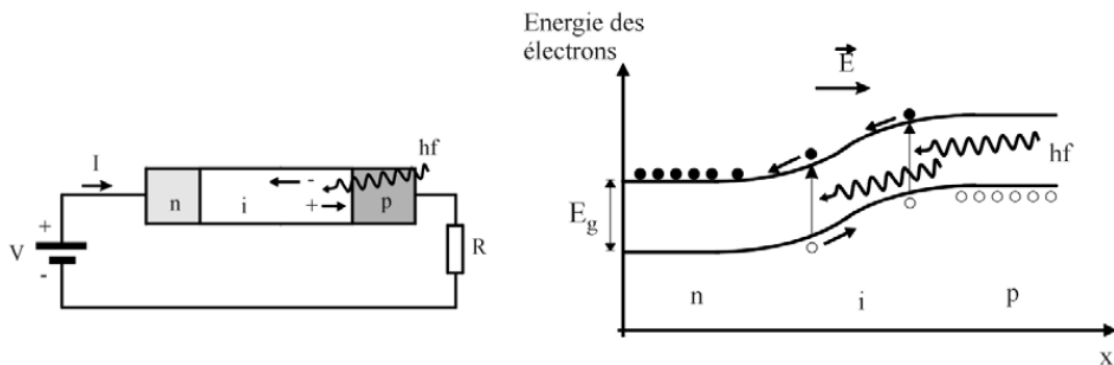


Figure -17- Diode PIN et diagramme d'énergie correspondant.

Par rapport à la jonction PN simple, la zone de champ électrique non nul a été élargie par rapport aux zones conductrices, ce qui augmente la probabilité d'absorption et donc de création de paires électron-trou dans cette région.

#### 3.1.2.2. Photodiode à Avalanche (PDA)

Une photodiode à avalanche est avant tout une structure PIN à laquelle on applique une polarisation inverse proche à la tension de claquage. Contrairement à la photodiode PIN, la photodiode à avalanche est un dispositif avec gain, c'est-à-dire que le nombre de paires électron-trou collectées est supérieur au nombre de photons absorbés.

La photodiode PIN présente certains avantages par rapport à la PDA ; elle est plus stable, elle nécessite une tension de polarisation inférieure et elle est plus facile à mettre en œuvre. En revanche ; la PDA qui peut être vue comme une version améliorée de la photodiode PIN autorise des puissances optiques incidentes plus faibles et son gain est 10 à 1000 fois supérieur à celui de la PIN.

### 3.1.3. Caractéristiques du photodétecteur

- **Le rendement quantique** : c'est le rapport entre le nombre de paires de porteurs (collectés) et le nombre de photons incidents. Il ne peut être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante.
- **La sensibilité (coefficient de réponse)** : elle est exprimée en Ampère par Watt (A/W), elle lie le photo-courant  $I_{ph}$  à la puissance lumineuse incidente  $P_{opt}$  par la relation  $R_i = I_{ph} / P_{opt}$
- **La bande passante**
- **Le bruit du photodétecteur** : certains électrons du courant utile peuvent être générés sans qu'un photon n'ait été absorbé. Ils s'ajoutent aux photoélectrons et parasitent le courant. [16]
- **Le coefficient d'absorption** : ce coefficient dépend du matériau utilisé et de la longueur d'onde. Il détermine le rendement du photodétecteur.

## IV. Techniques de transmission et multiplexage

Les systèmes de communications optiques actuels mettent en œuvre des techniques d'accès multiple, dont le principe repose sur le multiplexage de plusieurs canaux de transmission de données sur le même support physique qu'est la fibre optique. Cette opération permet de partager la bande passante de la fibre entre les différents utilisateurs des systèmes. Un démultiplexage adéquat permet de séparer les canaux.

La nécessité du multiplexage vient du fait que dans la plupart des applications, il est beaucoup plus économique de transmettre des données à des débits élevés sur une seule fibre que de les transmettre à des débits relativement faibles sur plusieurs fibres optiques.

On distingue les techniques de multiplexage dans le domaine radiofréquence (FDMA, TDMA et CDMA) et celles appliquées aux systèmes optiques (WDMA, OTDMA, OCDMA).

### 1. Techniques de multiplexage en optique

Dans les systèmes de transmission optique ; trois principales techniques d'accès multiples sont utilisées : **TDMA**, **WDM** et **OCDMA**.

#### 1.1. Le multiplexage dans le domaine temporel

Le TDMA consiste à partager les ressources de la fibre optique en les allouant de façon temporaire à chaque utilisateur. Les utilisateurs ne peuvent pas accéder aux ressources simultanément, mais uniquement durant les intervalles temporels définissant le canal qui leur est alloué. A la réception, un démultiplexage temporel est effectué permettant de récupérer les données de chaque utilisateur suivant les intervalles temporels du canal correspondant.

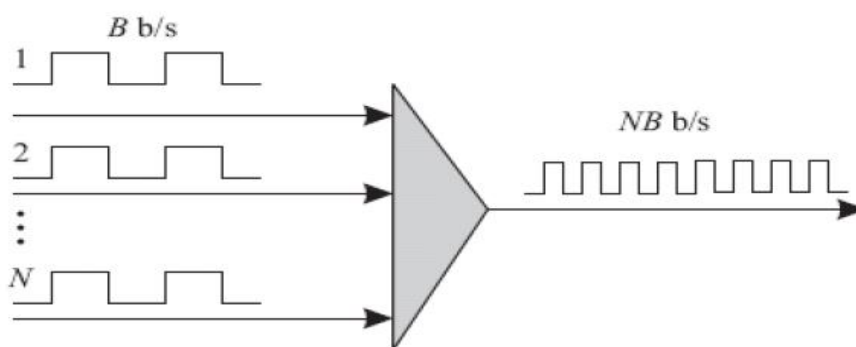


Figure -18- Technique TDM.

Cette fonction est généralement réalisée de manière électronique (ETDM), mais le domaine électrique atteignait rapidement ses limites dès que l'on s'approchait des débits de l'ordre de 10 Gbps à cause des composants électroniques. Par conséquent, cette fonction de multiplexage est réalisée de manière optique (OTDM), ce qui a permis de dépasser les limites de l'électronique et d'atteindre des débits avoisinant le Tbps.

La différence entre l'ETDM et l'OTDM réside dans le fait que, dans l'ETDM le modulateur optique doit fonctionner non pas au débit des données transmises mais à celui du signal sortant du multiplexeur. [13]

Le multiplexage optique temporel peut être aussi utilisé comme technique d'accès dans les réseaux locaux ; il suffit de partager le temps entre les différents utilisateurs, autrement dit ; chaque utilisateur dispose d'une tranche temporelle pour émettre. Par la suite, les différents signaux sont assemblés pour être transmis sur une porteuse optique unique. [14]

## 1.2. Le multiplexage en longueurs d'onde

Le **WDM** (Wavelength Division Multiplexing) constitue en optique l'équivalent du multiplexage par répartition de fréquence dans le domaine des radiofréquences.

Grâce au multiplexage en longueurs d'onde, plusieurs longueurs d'onde distinctes peuvent emprunter la même fibre optique pour transporter à un très haut débit ; différents flux de données sans interférences. Chaque client se voit attribué une longueur d'onde spécifique qui distingue les données le concernant.

Comme le montre la figure ci-dessous ; le multiplexage en longueurs d'onde consiste à utiliser plusieurs sources de lumière opérant sur des longueurs d'ondes légèrement différentes pour transmettre différents flux d'informations simultanément sur la même fibre optique. A l'extrémité de la fibre, il suffit de séparer ces longueurs d'onde et de les envoyer sur autant de détecteurs différents pour retrouver les signaux électriques initiaux.

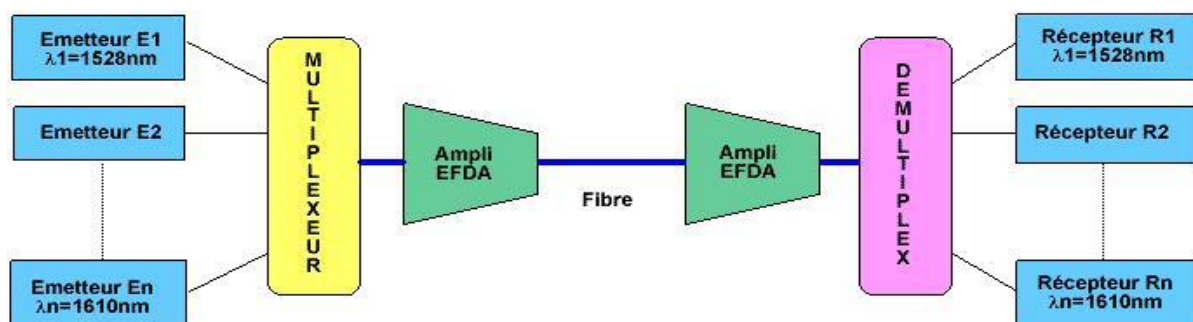


Figure -19- Concept de base du WDM.

Le démultiplexage des canaux WDM est réalisé en fin de liaison, avant la détection des données qui doit être effectuée sur chaque canal indépendamment. Les techniques de démultiplexage utilisent des composants similaires à ceux utilisés en multiplexage permettant une séparation de N canaux sur N fibres optiques différentes. Ces démultiplexeurs optiques appliquent au signal des fonctions de filtrage qui jouent un rôle important quant à la qualité du signal fourni au récepteur. Ces fonctions de filtrage ont pour rôle de réduire le bruit ASE généré par les amplificateurs de ligne. [10]

Pour avoir une bonne qualité de transmission du multiplex dans la fibre, il faut respecter l'espacement minimum entre les longueurs d'onde émises par chacune des sources. Plusieurs facteurs ont un impact sur cette grandeur ; soit la qualité de la fibre, la qualité des multiplexeurs/ démultiplexeurs, la longueur de transmission, la qualité des sources, le débit de données de chaque source...

Un système WDM est caractérisé par la quantité d'information transportée dans une bande spectrale, appelée densité spectrale d'information (Information Spectral Density) ou efficacité spectrale (Spectral Efficiency). Ce paramètre est sans dimension, mais il est souvent exprimé en bit/s/Hz et parfois en pourcentage. Il est généralement déterminé par le rapport de débit total du système prenant en compte tous les canaux sur la largeur spectrale totale.

Aujourd'hui, les réseaux utilisent une combinaison de TDM et WDM. En effet, avec WDM plusieurs canaux TDM peuvent être envoyés simultanément sur une fibre. Chaque canal TDM occupe une longueur d'onde sur la grille de l'UIT séparés d'un espacement canal de 100 GHz par exemple.

Les recherches et le développement des réseaux optiques WDM ont considérablement mûri au cours de la dernière décennie. Ils sont de plus en plus déployés par les opérateurs des réseaux de télécom du monde entier.

Il est possible d'augmenter la capacité totale d'un système WDM soit en jouant sur le débit transporté par canal soit sur le nombre des canaux soit sur les deux facteurs en même temps.

#### - **Augmentation du nombre des canaux**

Une tendance de la mise en œuvre de la WDM ; est la quête interminable pour utiliser des longueurs d'onde de plus en plus rapprochées dans une bande passante étroite, autrement dit, utiliser des espacements (entre les longueurs d'onde) de plus en plus petits. Ce qui a conduit à ce qu'on appelle la **DWDM** (Dense Wavelength Division Multiplexing). Dans ce cas ; l'espacement utilisé est inférieur ou égal à 0.8 nm (100 GHz) ce qui autorise 40 longueurs d'onde dans la bande C.

Le multiplexage **DWDM** permet d'atteindre des capacités énormes (plus de 10 Tbps) sur les réseaux et liaisons longue distance.

**UDWDM (Ultra Dense WDM)** est utilisé pour désigner des espacements encore plus petits (de 25 GHz et 12.5 GHz). C'est une anticipation à l'augmentation de l'efficacité spectrale offerte par les formats de modulations avancées et l'adaptation du multiplexage WDM aux réseaux d'accès où un grand nombre de canaux est souhaitable compte tenu du grand nombre des utilisateurs.

Pour réduire le coût du multiplexage WDM, un cas particulier a été mis au point avec **CWDM (Coarse WDM)**. Ça consiste à élargir les espacements entre les longueurs d'onde. Cette solution réduit énormément le coût des composants optiques mais diminue également le nombre de longueurs d'onde à moins d'une vingtaine, ce qui est largement suffisant dans les environnements métropolitains.

### **1.3. Le multiplexage par répartition de code**

Le **CDMA** est une technique permettant la transmission des données des utilisateurs sur la même bande de fréquence et en même temps. A la réception, les différents signaux sont distingués grâce à des codes distincts associés à chacun des utilisateurs. Le CDM permet d'étaler spectralement le signal transmis sur une bande  $N$  fois plus large que celle du signal initial,  $N$  étant la longueur du code.

Elle a été utilisée initialement dans le domaine de la radiofréquence, l'adaptation du CDMA à l'optique OCDMA a été étudiée à partir de 1986. [17] L'implémentation du CDMA optique est totalement différente du CDMA radio. Cette différence est due principalement à la différence entre les deux milieux de propagation.

Le multiplexage OCDMA a pour avantage de permettre un accès multiple asynchrone ainsi qu'un partage de ressources flexible sans gestion de temps ni de fréquence. Cette technique peut être réalisée tout-optiquement grâce à des dispositifs de codage/décodage optiques.

On distingue deux types de CDM : CDMA directe et CDMA hybride.



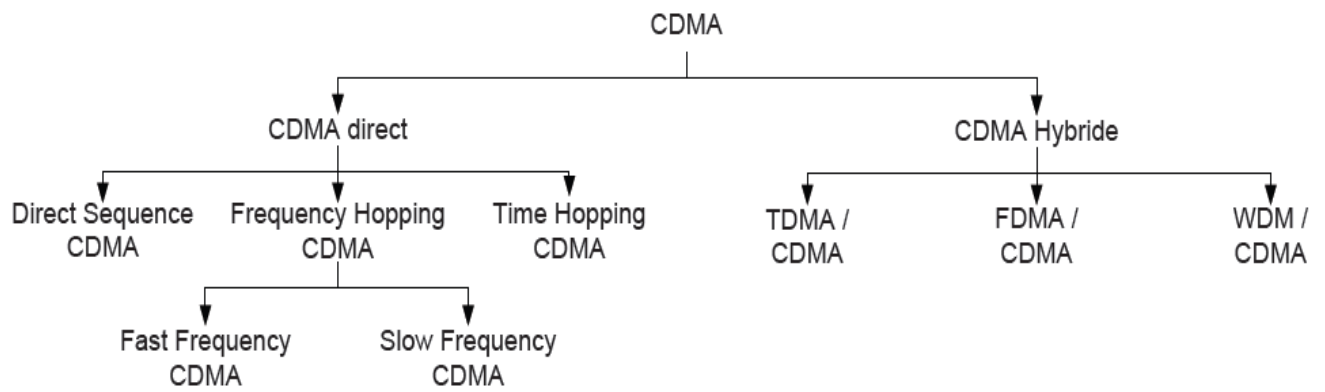


Figure -20- différentes techniques CDMA.

## Conclusion

Comme nous l'avons vu, l'utilité de transmettre l'information de manière optique, est d'obtenir des débits de transmission très importants et ceci sur les plus grandes distances possibles. Multiples avantages d'utilisation telles que la bande passante très importante, la faible sensibilité aux facteurs extérieurs, l'immunité électromagnétique...font de la fibre optique un support de transmission de premier choix.

L'utilisation de la fibre optique comme support de transmission nous ramène à ce qu'on appelle les systèmes de transmission optique ; qui comme tout autre système de transmission se composent d'un bloc d'émission, une ligne de transmission et un bloc de réception. Avant de décrire les différents composants de ces systèmes, nous avons évoqué les principaux effets de propagation qui limitent leurs débits de transmission et dégradent leurs performances.

Les systèmes de transmission optique ont permis d'accroître les débits grâce à des techniques de multiplexage en longueur d'onde WDM, en code CDM ou encore temporel TDM.

Le multiplexage temporel a été développé industriellement pour les systèmes sans fil GSM. L'adaptation de cette technique de multiplexage à l'optique a permis à l'OTDM de voir le jour au niveau expérimental, et les records dépassant des débits de 400 Gbps ont été obtenus dans des laboratoires japonais. [18]

Le multiplexage en longueur d'onde qui consiste à transmettre dans une même fibre optique un ensemble de signaux lumineux modulés autour de longueurs d'onde porteuses différentes ; a permis une grande avancée de la capacité transportée par les fibres optiques comme nous l'avons vu dans la dernière partie de ce chapitre.

## Références chapitre 2

- [1] Biswanath Mukherjee- Optical WDM networks- 2006.
- [2] GERD KEISER- Optical Communications Essentials- 2003.
- [3] FARHAOUI Fatima, ZAIDI Fatima- Etude et simulation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique haut débit- Mémoire de Master-Université de Saida-2017.
- [4] TOGNICLO CAROLLE THON-ADJALIN – étude d'un système de transmission sur fibre optique plastique à saut d'indice- Université LAVAL- 2011.
- [5] Hamidreza KHALEGHI- Influence des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sur la transmission cohérente de signaux optiques à format de modulation multi-porteuses (CO-OFDM)- Thèse de Doctorat- Université de Bretagne Occidentale- 2012.
- [6] Stéphanie LEPARMENTIER- Développement et caractérisation des fibres optiques multimatériaux verre/silice ou verre/air/silice réalisées par un procédé basé sur l'utilisation de poudre de verre- Thèse de Doctorat- Université de Limoges- 2010.
- [7] Mathieu Lefrançois- étude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40gbps- Thèse de Doctorat- 2007.
- [8] Anne LEGRAND- étude des amplificateurs paramétriques à fibre optique pour leur utilisation dans les systèmes de transmissions optiques haut débit multiplexées en longueur d'onde- Thèse de Doctorat- Université de Limoges- 2005.
- [9] Fadila MEDJDOUB- Optimisation par la simulation système d'une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit- Mémoire de Magister- Université ABOU BEKR BELKAID Tlemcen- 2010.
- [10] Yann FRIGNAC- Contribution à l'ingénierie des systèmes de transmission terrestres sur fibres optiques utilisant le multiplexage en longueur d'onde de canaux modulés au débit de 40gbps- Thèse de Doctorat- 2003.
- [11] Mathilde GAY- étude théorique et expérimentale de l'impact de la régénération 2R dans un système de transmission optique haut débit- thèse de Doctorat- Rennes- 2006.
- [12] THANH NAM NGUYEN- étude de composants optiques à base de fibres optiques non-linéaires- Thèse de Doctorat- Université de Rennes I- 2008.
- [13] Nassima BOUDRIOUA- étude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD- Thèse de Doctorat- Université de Paul Verlaine- 2007.
- [14] Jean-Louis VERNEUIL- Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40gbps- Thèse de Doctorat- Université de Limoges- 2003.
- [15] Houda BRAHIMI- étude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences. Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence- thèse de Doctorat- Université de Toulouse- 2010.

[16] Samia AIB- Modélisation d'un photodétecteur dans une chaîne de transmission par fibre optique. Application aux composants optohyperfréquences- Mémoire de Magister- Université Mentouri Constantine.

[17] Dafa SEYNABOU- Transmission radio haut débit multiservices sur fibres optiques. Thèse de Doctorat- Université Valenciennes- 2012.

[18] Khalil MERZOUK- étude d'un système bas coût de transmission optique par multiplexage temporel- Thèse de Doctorat- Université Grenoble- 2009.

# Chapitre3

## **Le Haut Débit : du réseau d'accès au réseau cœur.**

## Introduction

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse s'inscrivent dans le contexte des télécommunications optiques à très haut débit. Les recherches dans ce domaine sont motivées par une demande croissante en débit de la part des opérateurs de télécommunications. Les termes haut débit et très haut débit n'ont pas réellement de définition technique ; ce sont des notions relatives qui varient considérablement en fonction de l'état des technologies à un moment donné, dans un pays donné.

L'intérêt pour les opérateurs d'avoir des réseaux tout optiques passe incontestablement à terme par une harmonisation des réseaux basée sur une transparence au format et au débit. Les réseaux deviendraient plus simples, plus flexibles, tout en conservant leurs performances.

Dans la première partie de ce chapitre ; nous présenterons la structure globale d'un réseau optique. Ainsi nous déclinons les différentes strates du réseau pour converger vers le dernier niveau, à savoir le réseau d'accès.

Le réseau d'accès à base de fibre optique a longuement évolué pendant ces trente dernières années. Sa maturité a conduit à des solutions permettant aujourd'hui d'amener la fibre jusqu'au domicile de l'abonné et lui offrir le haut débit à moindre coût. Intégrer la division de longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing) dans un PON est la réponse à une augmentation des débits et du taux de partage dans le réseau d'accès, où chaque client va attribuer une longueur d'onde spécifique.

La deuxième partie de ce chapitre, permettra au lecteur d'avoir une idée sur les différents critères permettant d'évaluer une chaîne de transmission optique.

## I. Les systèmes de transmissions optiques

La propagation d'un signal optique à travers une série de fibres optiques est le point commun des systèmes de transmission optique, mais ces derniers peuvent présenter des disparités assez fortes les un par rapport aux autres suivant l'environnement dans lequel ils sont déployés et l'application pour laquelle ils sont destinés. Un réseau de télécommunication traditionnel suit une structure hiérarchique et peut être divisé en 3 parties : accès, métro et cœur. Les systèmes de transmissions optiques ont été principalement utilisés dans les réseaux de transport pour les transmissions longues distances. Cependant ; cette technologie commence à être appliquée aux réseaux d'accès pour les utilisateurs. L'utilisation de la fibre optique dans la partie accès est une solution très prometteuse qui peut offrir d'une manière significative ; une bande passante très élevée et sur de longues distances.

Ci dessous sont présentés les principaux types et structures des systèmes de transmissions optiques.

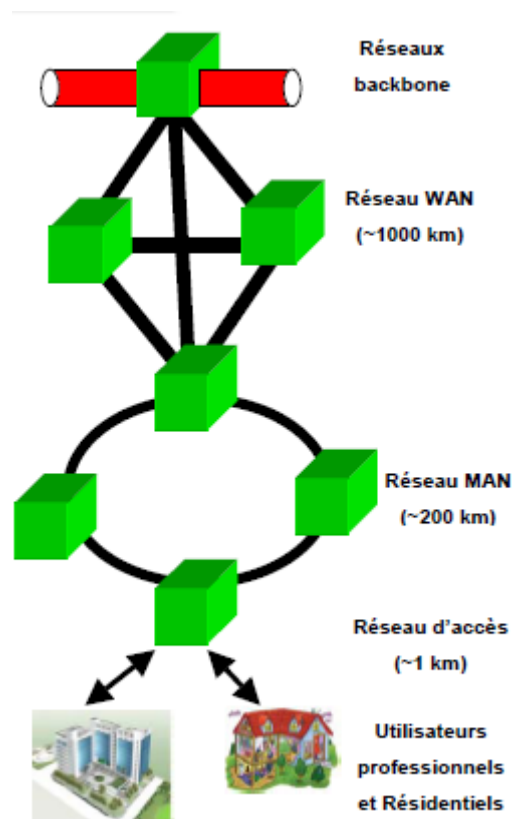


Figure -1- Types des systèmes de transmissions optiques.

## **1. Les réseaux dorsaux (Backbone)**

Les réseaux dorsaux mondiaux couvrent des zones géographiques à l'échelle de la planète et des continents. Ils sont constitués par toutes les artères majeures de transmission au niveau mondial et supportent donc les échanges internationaux et intercontinentaux. [1] On distingue :

- Les systèmes de transmissions optiques sur longue distance (Long Haul) appelés aussi les systèmes de transmissions optiques terrestres sont conçus pour transmettre des signaux optiques à l'intérieur d'un même continent.
- Les réseaux optiques sur de très longue distance (Ultra Long Haul) appelés aussi systèmes très longue distance sous marins ou encore réseaux continentaux sont conçus pour relier par des câbles optiques deux continents. Ces réseaux peuvent atteindre plusieurs milliers de Km.

Les liaisons longue et très longue distances sont généralement de type point à point ; c'est-à-dire qu'ils sont destinés à relier un point à un autre uniquement.

## **2. Les réseaux WAN**

Les réseaux WAN désignent les réseaux à couverture régionale ou nationale. Ils couvrent des zones d'un diamètre de quelques centaines à quelques milliers de Km. Ce sont généralement des réseaux maillés où le débit de transmission par artère peut varier entre 10 à 40 Gbps. [1]

## **3. Les réseaux métropolitains MAN**

Appelés aussi réseaux intermédiaires, ils se situent à l'échelle d'une ville permettant de relier les réseaux d'accès aux réseaux longue distance.

Les réseaux métropolitains introduisent une infrastructure optique à très haut degrés de connectivité. La complexité de ces réseaux ne se traduit pas seulement par le haut degré de connectivité, ces derniers doivent prendre en charge des formats, des protocoles et des débits de transmission très divers, mêlant les trafics de la hiérarchie numérique synchrone (SDH) ou du réseau optique synchrone (SONET) ou autres encore. [2] Le multiplexage WDM et les amplificateurs optiques sont très essentiels pour les applications des réseaux métropolitains structurants.

On peut distinguer les réseaux métropolitains structurants qui sont généralement constitués d'anneaux de 80 à 150 Km de circonférence avec six à huit nœuds et les réseaux métropolitains d'accès ; qui sont des anneaux de 10 à 40 Km de circonférence dotés de trois ou quatre nœuds avec des embranchements vers des sites distants. [3]



#### **4. Les réseaux LAN ( d'accès)**

Un réseau d'accès regroupe l'ensemble des moyens servant à relier des terminaux de télécommunication entre un commutateur du réseau de transport et un utilisateur final. Sa longueur varie de 2 à 50 Km et sa capacité est au plus du même ordre de grandeur que celle du réseau métropolitain.

La fibre optique est largement utilisée par les réseaux longue distance (terrestre, marins) et apparaît ces dernières années dans le réseau d'accès optique -on parle de FTTx- permettant aux abonnés haut débit de profiter des performances de ce support qui est beaucoup meilleur que les autres supports tels que les câbles en cuivre, le wifi ou encore les liaisons satellitaires.

L'utilisation de la paire de cuivre dans les réseaux d'accès permet d'atteindre un débit maximal (théorique) de 200 Mbps sur une portée de 200m. Par contre ; l'utilisation de la fibre optique permet de transmettre des données facilement à un débit de 10 Gbps sur une distance de 60 Km.

Vu le grand nombre des clients et le faible partage de l'infrastructure ces réseaux ont généralement un coût prépondérant.

##### **4.1. Description des réseaux d'accès**

Les boucles locales utilisant la fibre optique pour les connexions d'accès sont appelées systèmes d'accès à fibre optique ou bien systèmes FTTx. Les réseaux de type FTTx consistent à tirer la fibre optique jusqu'à un point géographique donné : nœud (node), trottoir (curb), immeuble (building), domicile (home), bureau (office). Puis à partir de ce point de basculer vers un autre type de support de transmission. On peut alors apporter un média de transport haut débit au plus près de l'abonné et ainsi lui offrir une plus grande bande passante et donc des services multimédias plus riches en contenus. [10]

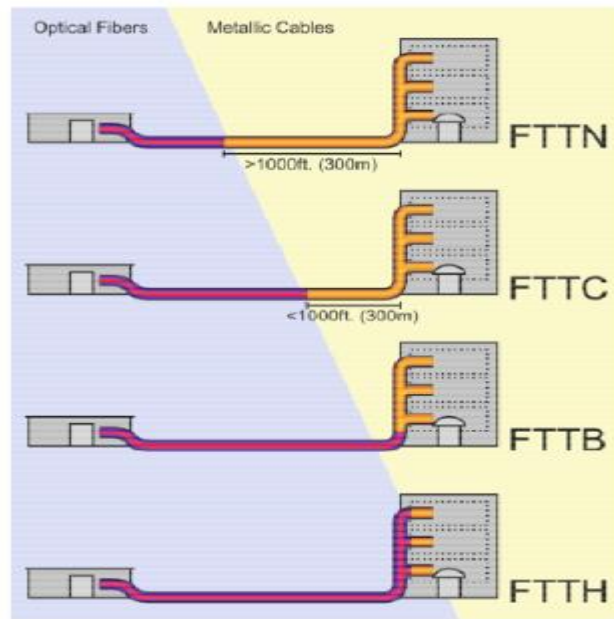


Figure -2- Les différentes technologies FTTx.

Les technologies FTTx apporte la capacité des réseaux optiques plus près de l'utilisateur final. Ces systèmes semblent être les meilleurs candidats pour les réseaux d'accès de nouvelle génération en raison des avantages inhérents qu'offre la fibre optique.

Etant donné que les fibres optiques sont largement utilisées dans les réseaux de transport et métropolitains, la mise en œuvre du FTTx dans les réseaux d'accès complétera la révolution des réseaux tout-optiques.

#### 4.2. Architecture des réseaux d'accès

Comme le montre la figure ci-dessous ; l'architecture d'un réseau d'accès comporte trois parties : le central, le point d'éclatement et le client.

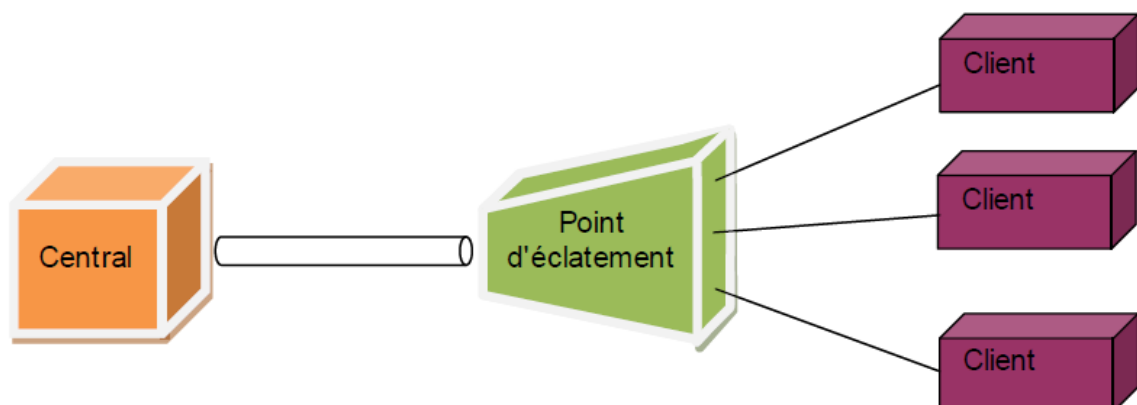


Figure-3- Architecture d'un réseau d'accès.

Central office ou le central optique est doté de l'équipement d'émission-réception de l'opérateur appelé **OLT** (Optical Line Termination). La partie client est généralement appelée **ONU** (Optical Network Unit) si elle est partagée entre plusieurs clients ou **ONT** (Optical Network Termination) si elle est mono client. [4]

En effet ; les composants actifs sont situés aux deux extrémités (**ONU** et **OLT**). [4]

L'OLT est un équipement actif, son module est composé d'un laser DBF, un filtre WDM et une photodiode APD.

L'ONU/ONT c'est des équipements actifs, installés chez les utilisateurs finals du réseau, qui assurent la connexion avec les terminaux de l'utilisateur sur les interfaces spécifiques de ces derniers.

On appelle **ODN** (Optical Distribution Network) la partie entre l'**OLT** et L'**ONU**. Il s'agit de l'infrastructure passive du réseau. On trouve ce qu'on appelle le « splitter » ou le coupleur optique, son rôle est de partager le signal optique pour la voie dite descendante (de l'OLT vers les ONUs) et de recomposer le signal à partir des multiples signaux remontants dans l'autre sens (des ONUs vers l'OLT).[14]

Les coupleurs optiques compacts et de très faibles dimensions, sont très accessibles et se déclinent en différents proportions allant de 1x2 à 1x32 jusqu'à 1x64 , pour répondre à la croissance du nombre d'utilisateurs et à l'augmentation de la consommation de services et donc de bande passante sur une zone. [14]

Deux types de topologies physiques permettent d'acheminer la fibre jusqu'au client final :

- Architecture point à point ; dite active.
- Architecture point à multipoint ; dite passive.

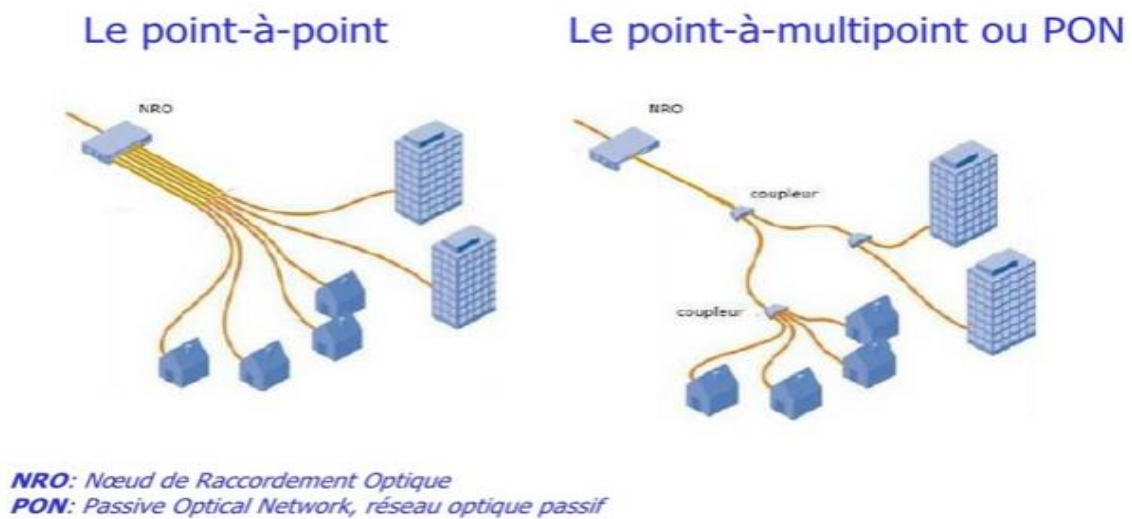


Figure -4- Topologies des réseaux d'accès.

Plusieurs critères influencent sur le choix du type l'architecture ; citant :

- Le type des services devant être fournis.
- Le coût de l'infrastructure.
- L'infrastructure actuelle.
- Les plans futurs de migration vers les nouvelles technologies.

#### 4.2.1. L'architecture point à point

La façon la plus simple de déployer un réseau d'accès optique est l'utilisation d'une architecture point à point. Elle consiste à relier directement l'abonné au central téléphonique (Central Office) en utilisant un lien physique en fibre optique.

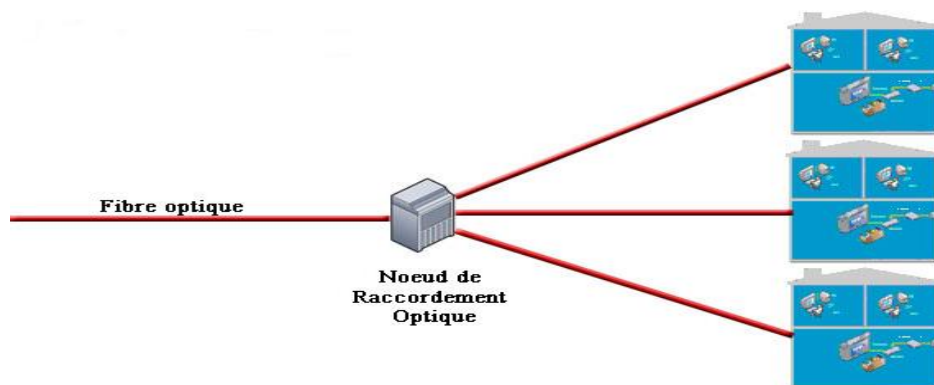


Figure -5- Architecture P2P.

Bien que cette méthode soit simple et ait l'avantage de permettre de fournir à l'utilisateur final un débit garanti; mais dans la majorité des cas elle n'est pas rentable parce qu'elle est très coûteuse pour les opérateurs.

#### 4.2.2. Point-Multipoint passif

Contrairement à un réseau de type FTTH-P2P, le réseau optique passif permet de mutualiser une partie du réseau entre différents usagers. On obtient ainsi une structure arborescente appelée aussi point à multipoint (P2mP). L'architecture point à multipoint passive ou PON se caractérise par l'absence d'équipements actifs entre le central et les habitations desservies, et par un partage de la fibre entre plusieurs utilisateurs dans la partie amont du réseau de desserte.

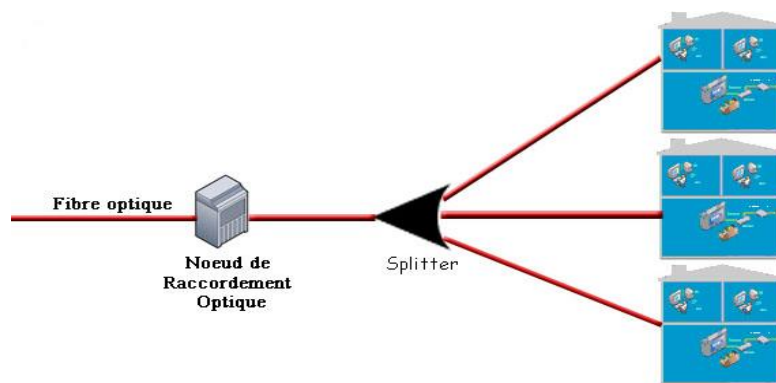


Figure -6- Architecture P2MP.

Grâce à des coupleurs passifs ou splitters formant une topologie en arbre, éventuellement à plusieurs niveaux, 32 ou 64 abonnés se partagent la même fibre optique monomode et un débit global qui se compte en quelques Gbps.

#### 4.3. Les réseaux optiques passifs

Les technologies PON constituent aujourd'hui une référence en matière de réseaux d'accès très haut débit avec très forte capacité de transport et un minimum d'infrastructure en fibres. Ces technologies utilisent comme infrastructure sous-jacente des fibres optiques passives, car les équipements de la partie intermédiaire de ces réseaux sont inactifs : ils ne sont pas alimentés en électricité et n'embarquent aucune électronique. Ces réseaux permettent un service d'acheminement de flux bidirectionnels et multimédia à très haut débit, jusqu'à l'utilisateur final, entreprise ou particulier.

La figure ci-dessous illustre un exemple de réseau PON, incluant les terminologies avec les différentes solutions FTTx pouvant être proposées à l'heure actuelle. [5]

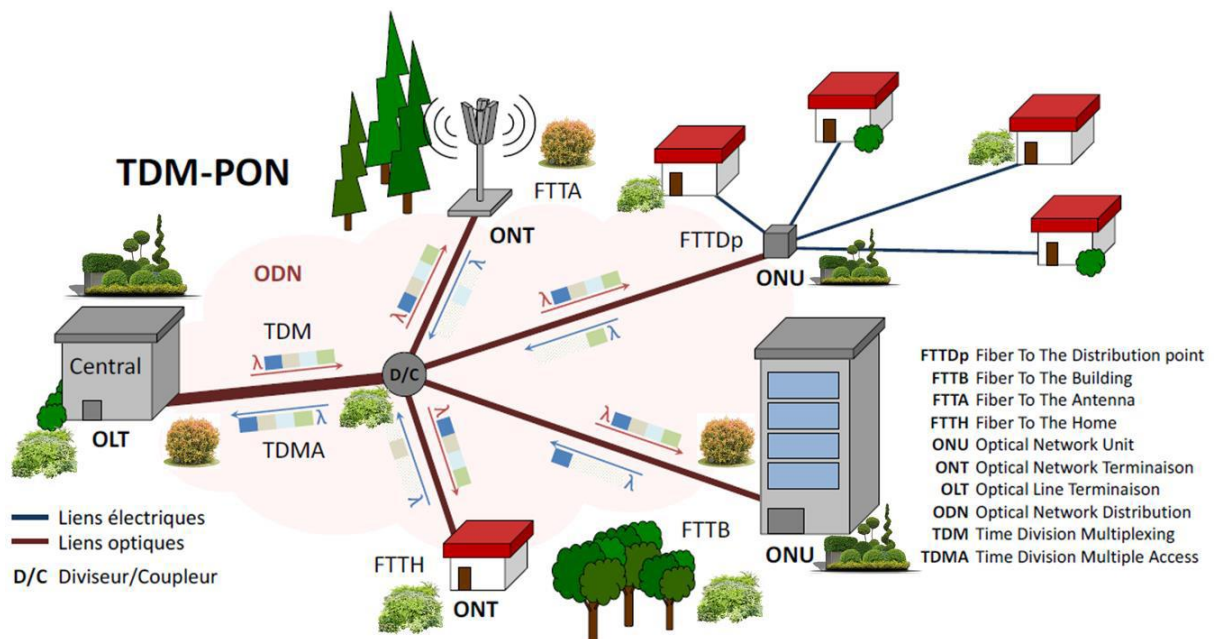


Figure -7- Exemple d'un réseau PON.

Les réseaux PON ont classiquement une portée de 20Km, quels que soient les flux transportés, ce qui permet en réalité de couvrir une superficie de 20 Km de rayon sans aucun répéteur. [13]

#### 4.3.1. Les classes des PONs

Depuis les années 1990 ; quatre technologies PON ont été normalisées :

- **L'A-PON (ATM PON)** ; issu des techniques PON associés à l'ATM. Complexe et coûteuse, le débit est limité, la récupération d'horloge peut poser des difficultés ainsi qu'elle ne peut pas offrir de service vidéo.
- **Le B-PON (Broadband PON)** ; une évolution de la norme APON en vu de fournir d'autre services tels que l'Ethernet et la diffusion de la vidéo.
- **Le E-PON (Ethernet PON)** ; utilise un protocole Ethernet avec accès CSMA/CD. cette norme supporte le service Triple Play qui amène à la fois les communications voix et visiophonie, l'accès Interne haut débit et la vidéo à l'utilisateur.
- **Le G-PON (Gigabit PON)** ;

A l'heure actuelle les réseaux optiques passifs déployés sont basés soit sur le standard G-PON appuyé par l'instance de normalisation l'ITU-T et FSAN soit sur les normes EPON, appuyé par le groupe d'Ethernet IEEE. La figure ci-dessous présente le calendrier de standardisation de ces normes. [4]

L'approche architecturale présente la principale différence entre les deux normes : l'EPON est basé sur l'IP pour transporter les données, la voix et la vidéo tandis que le G-PON utilise l'ATM pour le transport de la voix, l'Ethernet pour les données et une encapsulation propriétaire pour d'autres services. [4]

Dans le contexte général de l'accès optique actuel, les possibilités d'évolution de l'architecture du réseau sont limitées par les performances du réseau G-PON (Gigabit Passive Optical Network) qui offre un débit de **1.25 Gbit/s** pour la voie montante et **2.5 Gbit/s** pour la voie descendante pour 64 jusqu'à 128 abonnés utilisant la technique de multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing).

Malgré les avantages qu'offrent les technologies PON, mais ces dernières doivent être gracieusement mises à niveau. De ce fait, Pour remplacer le GPON et par souci de réduire les coûts de déploiement de l'accès FTTH, le groupe FSAN et l'ITU-T ont projeté le lancement de la Nouvelle Génération de réseau PON (NG-PON, Next Generation of Passive Optical Network) dans ses versions NG-PON1 et NG-PON2.

Une première étape dite **NG-PON1** intègrent les solutions permettant une montée en débit jusqu'à **10 Gbps** et qui nécessitent une compatibilité avec une infrastructure existante. Dans ce cadre, l'ITU-T propose deux variantes du **NG-PON1** : le **XG-PON1** et le **XG-PON2**.

Une deuxième étape dite **NG-PON2** permettra de poursuivre la montée en débit mais cette fois l'opérateur s'autorise des reprises majeures de son infrastructure. Cette solution se concentre sur des technologies bas-coûts et évolutives offrant des débits allant jusqu'à **40 Gbps** comme par exemple des PON-TDM très haut débits, des PON-WDM, des solutions hybride de PON WDM-TDM, ou encore des solutions de multiplexage fréquentiel OFDM.

Le tableau suivant donne une idée plus claire sur les différences entre ces différentes technologies. [5]

Norme	<b>APON (1995)</b>	<b>BPON (2001)</b>	<b>EPON (2004) 10 GEAPON (2010)</b>	<b>GPON (2004)</b>	<b>NGPON (XGPON) (2012)</b>
Normes de recommandation	<b>ITU-T G.983</b>	<b>ITU-T G983</b>	<b>IEEE.802.3ah IEEE.802.3av</b>	<b>G.984 (FSAN)</b>	<b>ITU-T G.987</b>
Protocoles	<b>ATM</b>	<b>ATM</b>	<b>Ethernet avec CSMA/CD</b>	<b>GEM (ATM, Ethernet, TDM)</b>	<b>XGEM</b>
Longueur d'ondes (descendant/montant)	<b>1490/1310 nm</b>	<b>1490/1310 nm</b>	<b>1490/1310 nm</b>	<b>1490/1310 nm</b>	<b>1575 et 1580/1260 et 1280 nm.</b>
Débit descendant	<b>155 ou 622 Mbps</b>	<b>155 ou 622 Mbps</b>	<b>1,25 ou 10 Gbps</b>	<b>2,5 Gbps</b>	<b>10 Gbps</b>
Débit montant	<b>155 Mbps</b>	<b>155 ou 622 Mbps</b>	<b>1,25 ou 10 Gbps</b>	<b>1,25 Gbps</b>	<b>2,5 Gbps (XG-PON1) 10 Gbps (XG- PON2)</b>
Taux de partage	<b>16, 32</b>	<b>16, 32</b>	<b>16,32, 64</b>	<b>16,32, 64, jusqu'à 128</b>	<b>32,64, jusqu'à 128</b>
Distance OLT-ONT	<b>10 ou 20Km</b>	<b>10 ou 20Km</b>	<b>20Km</b>	<b>20Km</b>	<b>20Km</b>

Pour 2020 ; les réseaux **NG-PON** doivent : [5]

- Atteindre une capacité de **80 Gbps** à **160 Gbps** ou plus.
- Supporter jusqu'à 256 abonnés voire 1024.
- Atteindre environ 20 à 60 Km de distance de transmission.
- Avoir une faible consommation d'énergie.
- Etre pas chers à réaliser et évolutifs.
- Faciliter une coexistence avec le G-PON.

#### **4.3.2. Les technologies pour le NG-PON**

La transmission dans un réseau passif notamment pour les nouvelles architectures de réseau d'accès est assurée via des techniques de multiplexage. Le nombre d'utilisateurs, le débit par utilisateur, la distance de fonctionnement et le coût de l'architecture influencent sur la technique de multiplexage utilisée pour concevoir les



futurs réseaux d'accès optiques. Dans ce qui suit, on va présenter les différentes solutions permettant un accès à très haut débit.

#### 4.3.2.1. TDM-PON

Le concept de déploiement de l'architecture du réseau PON repose dans la majorité des opérations sur le partage temporel d'une seule longueur d'ondes entre différents utilisateurs. Il est techniquement possible d'atteindre un débit de 10Gbps dans le sens descendant à savoir de l'OLT vers l'ONU.

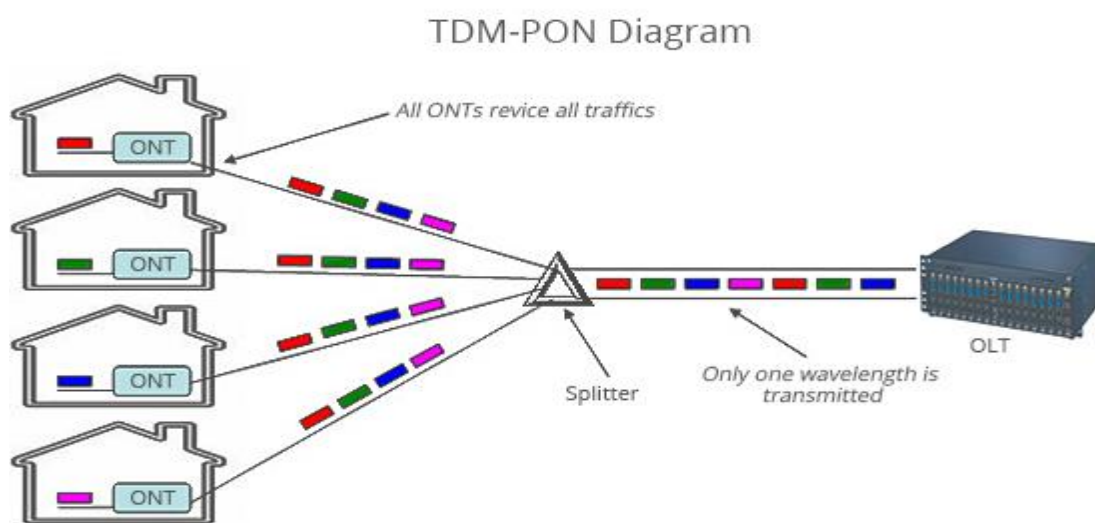


Figure -8- Architecture PON basé sur le multiplexage temporel.

Cette technique présente plusieurs avantages ; néanmoins, dès qu'on souhaite travailler à des débits élevés le TDM-PON révèle ses limites. De ce fait, le TDM-PON pourrait être considéré comme une solution attractive uniquement pour un débit inférieur ou égale à 10Gbps. Par conséquent ; l'utilisation de la longueur d'onde est envisagée pour un débit agrégé de 40Gbps dans l'accès. [4]

#### 4.3.2.2. PON avec multiplexage WDM

La limite en débit imposé par le TDM peut être dépassée en introduisant le WDM et en affectant une longueur d'onde par utilisateur. Cette technologie est possiblement la prochaine génération de solution pour les réseaux d'accès.

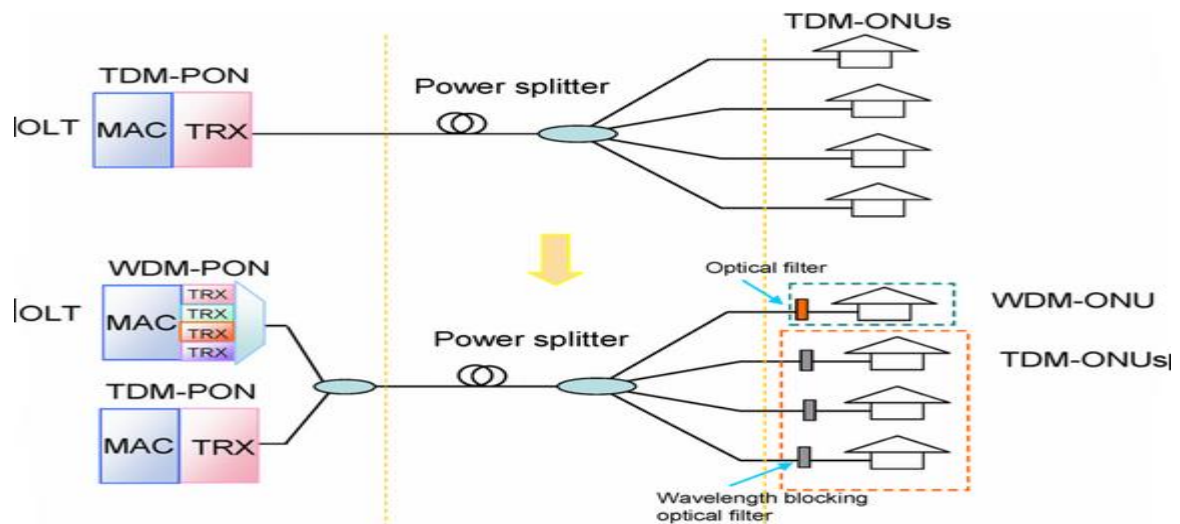


Figure -9- Migration du TDM-PON vers le WDM-PON.

La technologie WDM a été largement utilisée dans les réseaux à haut débit car elle est la plus pratique pour la transmission de grande capacité à l'heure actuelle. Présentant plusieurs avantages, cette technologie sera la solution principale des futurs réseaux à très haut débit. Cependant ; il existe certaines limitations inévitables de WDM. De ce fait, il est plus que nécessaire de combiner la technologie WDM avec l'OTDM. L'OTDM est une méthode très efficace de multiplexage optique. Cette technologie peut utiliser pleinement la ressource spectrale et supprimer certaines restrictions d'effets non linéaires dans le système WDM.

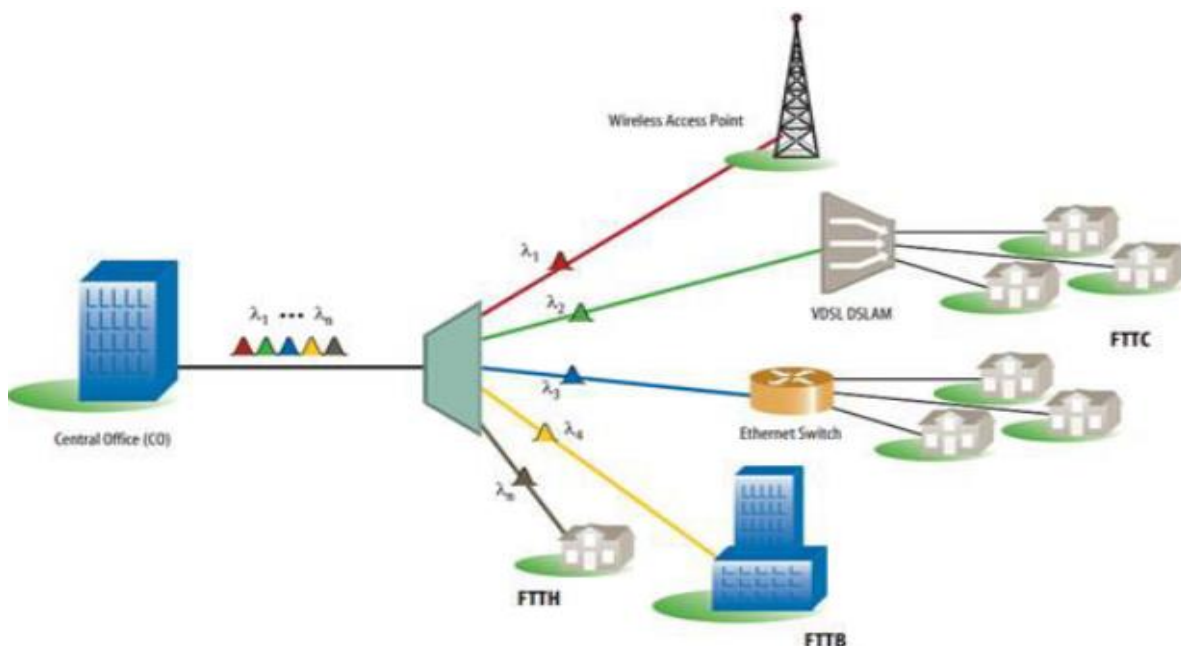


Figure-10- Principe de l'accès multiple en WDM.

Plusieurs architectures sont possibles en utilisant la technique WDM, il existe des nuances et des variantes, cela dépend du composant de répartition qui peut être un coupleur ou un multiplexeur. De ce fait, trois différentes architectures peuvent être utilisées.

- Architecture broadcast and select.
- Architecture à démultiplexage spatial.
- Architecture hybride.

#### a. PON WDM Broadcast and select

Le principe de cette architecture consiste à diffuser toutes les longueurs d'ondes émises par le central à tous les clients « Broadcast ». Ensuite ; chaque ONU fera le filtrage pour ne recevoir que les données qui lui sont destinées « Select ».

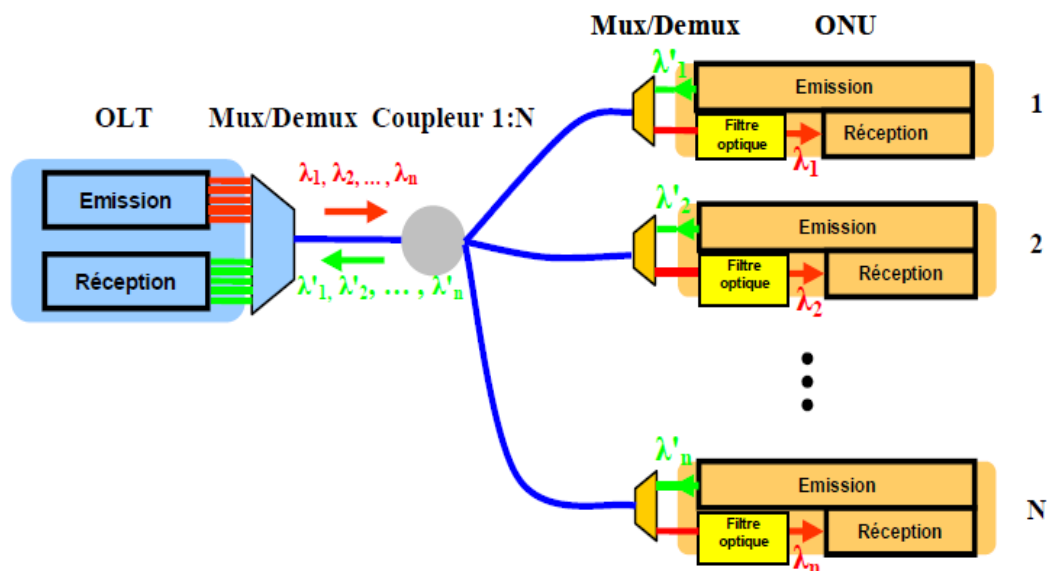


Figure -11- WDM-PON Broadcast and Select.

Cette architecture avec un ODN à base de coupleur présente des points forts:[4]

- Comparé à un multiplexeur, le coupleur est un composant passif peu cher ce qui favorise son utilisation dans les réseaux WDM.
- L'architecture est très flexible et favorable à la reconfiguration.
- L'intérêt de réutiliser la même infrastructure pour les flux montants et descendants se comprend par l'économie réalisée en termes de composants et de fibres.

### b. Architecture à démultiplexage spatial

Dans cette technique ; les longueurs d'ondes descendantes à l'OLT sont tous d'abord multiplexées. Par la suite, elles vont se propager sur la fibre de distribution jusqu'au sous répartiteur. Dans ce dernier, un démultiplexeur sépare les longueurs d'ondes et envoie chacune d'elles vers le client correspondant. [4]

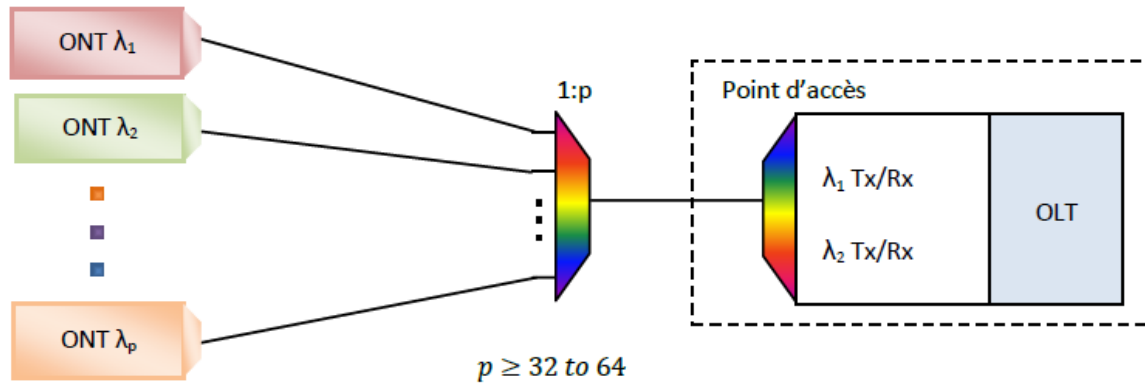


Figure -12- PON avec ODN utilisant un répartiteur en WDM.

Cette architecture est limitée principalement par le nombre de longueurs d'ondes disponibles ; contrairement à l'architecture « Broadcast and Select », où l'atténuation du coupleur est la principale limite physique.

### c. Architecture hybride

Cette solution combine entre le partage temporel et le partage en longueur d'onde dans une seule architecture, on parle alors d'un WDM-TDM-PON. Elle consiste à mettre en parallèle plusieurs PON-TDM sur plusieurs longueurs d'ondes.

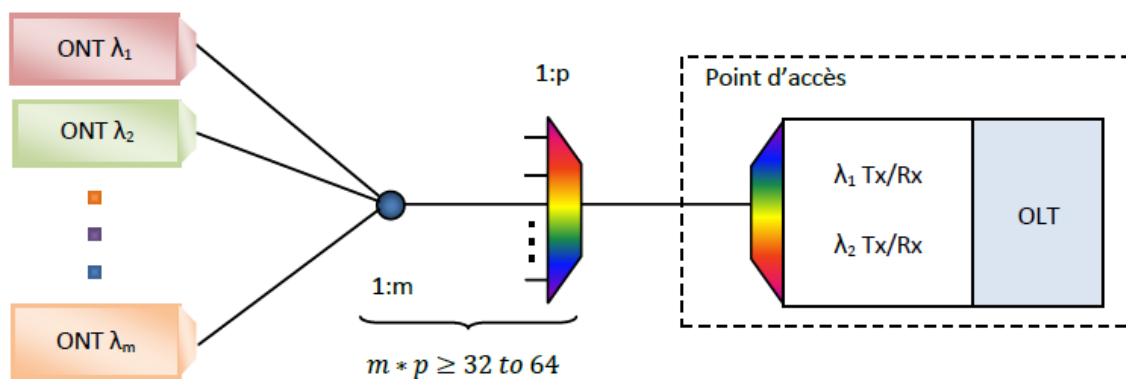


Figure -13- WDM-TDM-PON.

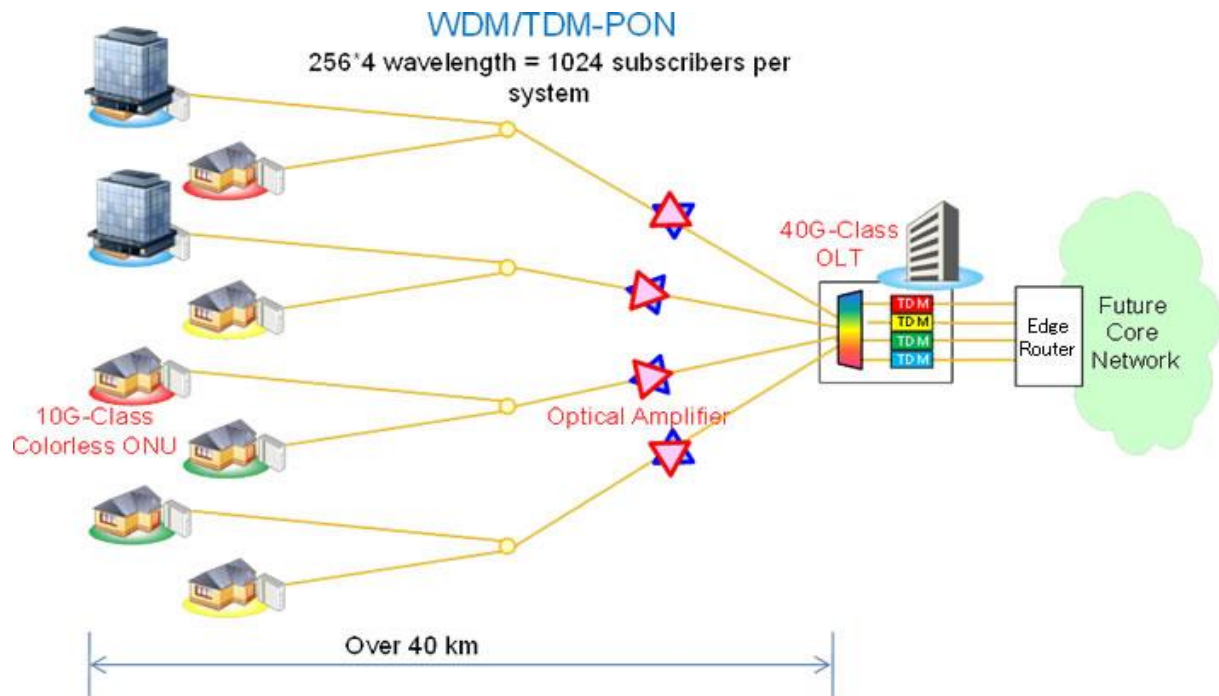


Figure -14- Exemple d'un réseau avec une architecture hybride.

#### 4.3.2.3. OFDM-PON

Cette technologie est considérée comme une solution prometteuse pour les futurs systèmes PON à ultra-haut débit (40/100 Gbps). Son principe consiste à répartir le signal numérique que l'on veut transmettre sur un grand nombre de sous-porteuses indépendantes à faible débit. Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'informations sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux.[13]

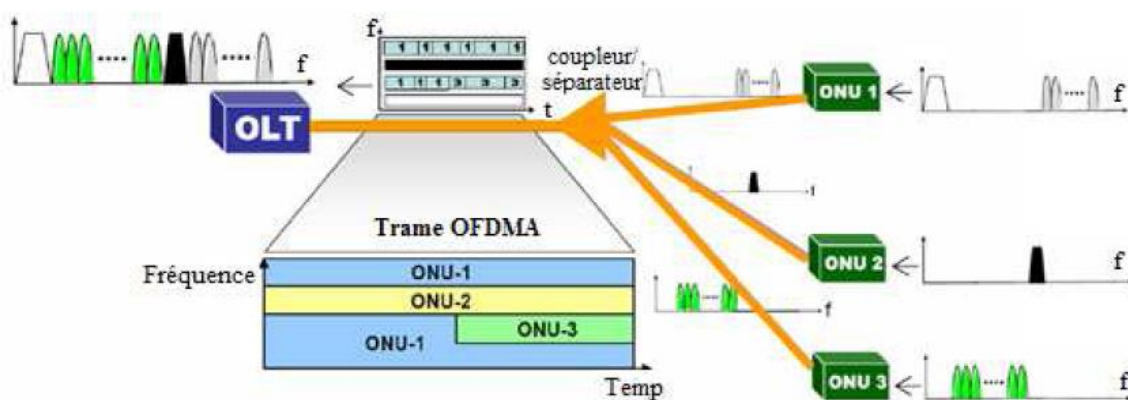


Figure -15- OFDMA-PON.

Pour la voie descendante, l'OLT procède avec l'ensemble des porteuses et les ONU extraient les sous-porteuses qui leur sont destinées en fréquence et dans le temps.

Pour la voie montante, chaque abonné émet son trafic sur une gamme de fréquence et de temps.

Les stratégies du déploiement progressif du très haut débit jusqu'à l'abonné amènent les opérateurs à étendre leurs infrastructures par étapes, du cœur du réseau jusqu'au derniers mètres de la boucle locale. La disponibilité du très haut débit est par ailleurs un facteur d'innovation : l'augmentation des débits disponibles permet la création de nouveaux services, inconcevables avec une connexion limitée à quelques méga bits par seconde.

## II. Critères de qualité d'une transmission par fibre optique

La qualité est une notion importante pour les réseaux informatiques d'aujourd'hui par le fait qu'ils sont utilisés sur une échelle de plus en plus large par une gamme toujours plus grande de personnes. Les gens s'intéressent à la qualité de toutes les choses essentielles à leur vie. Les réseaux informatiques sont de plus en plus utilisés ; le temps est donc venu de se pencher véritablement sur la question de la qualité dans les réseaux informatiques.

L'étude de la qualité des réseaux est très essentielle pour pouvoir juger de l'utilité et de la valeur de ces réseaux et des services qu'ils fournissent.

La qualité en général porte sur l'adéquation entre les attentes d'un sujet par rapport aux propriétés d'un objet. Dans les réseaux informatiques ; elle comporte deux aspects : la qualité de service (QoS) et la qualité perçue par les utilisateurs (UPQ).

- La qualité de service traite l'adéquation mentionnée en termes de paramètres de performance du réseau : débit, délai et perte de paquets.
- La qualité perçue fournie est un point de vue plus élevé que la QoS, celui des utilisateurs, et concerne leurs attentes en terme de performance des applications.

Pour connaître les performances d'une liaison de télécommunications par fibre optique ; il existe plusieurs méthodes d'évaluation. Mais selon les projets ; selon les systèmes à mesurer, certaines sont plus adaptées que d'autres. [2]

Pour le terme performance nous entendons la capacité du système de transmission à transmettre le plus fidèlement possible l'information.

La transmission réelle d'un message diffère de la transmission idéale, cela revient aux défauts des modules d'extrémités et des perturbations introduites par le canal de transmission. [2]

Le critère de qualité le plus communément utilisé est le taux d'erreur binaire. Cependant, il est aussi possible de mesurer les performances des transmissions avec le facteur Q. Une autre approche, plus qualitative, consiste à tracer le diagramme de l'œil du signal. Ci-dessous nous allons décrire ces trois critères de qualité.

### 1. Le diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil permet de visualiser la qualité d'un signal dans le domaine temporel en superposant un grand nombre de séquences en temps réel au moyen d'un oscilloscope rapide synchronisé sur le signal d'horloge du signal de données.

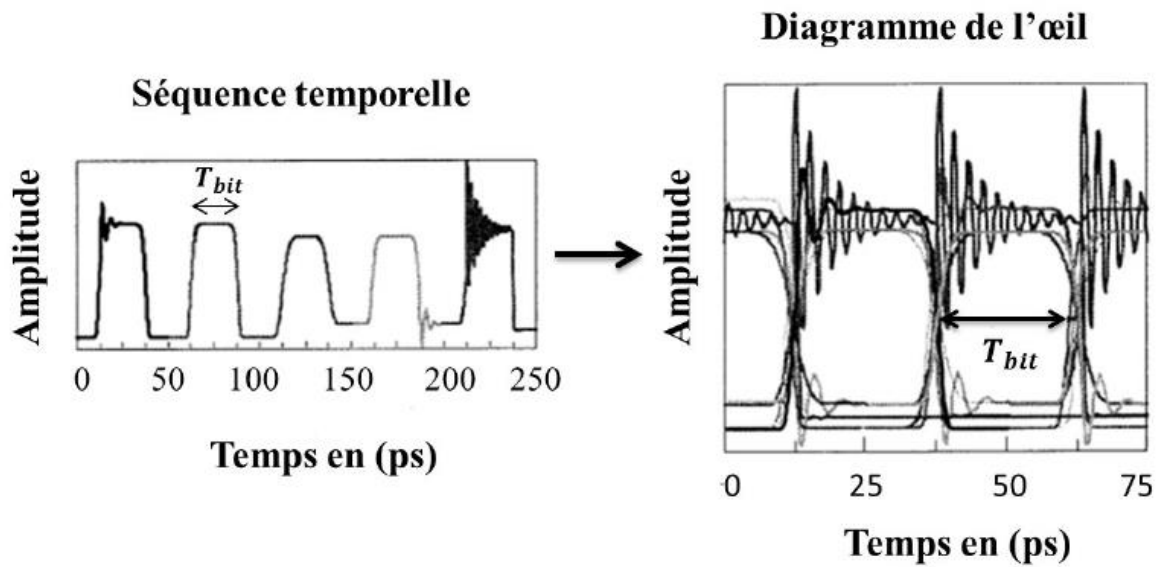


Figure -16- construction du diagramme de l'œil.

A partir du diagramme de l'œil ; la qualité du signal peut être facilement constatée. Nous dirons que l'œil est ouvert dans le cas où les niveaux des symboles « 1 » sont bien distincts des niveaux des symboles « 0 ». par contre ; nous parlerons d'un œil fermé (horizontalement ou verticalement) si la dégradation est de telle sorte que nous ne pouvons pas distinguer les deux niveaux. Un exemple est illustré dans la figure ci-dessous.

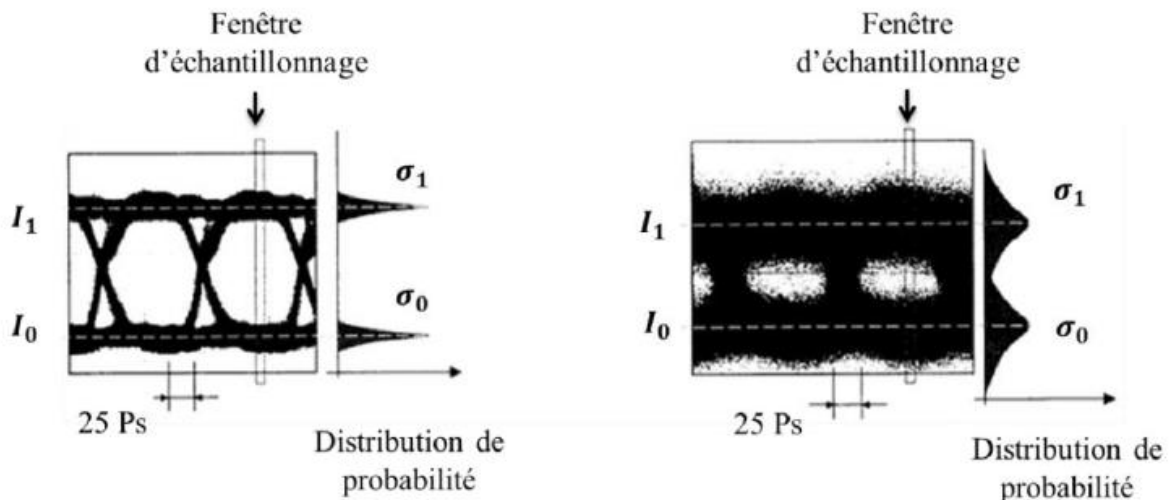


Figure -17- diagramme de l'œil d'un signal a- de bonne qualité – b- bruité.

## 2. Le taux d'erreur binaire TEB (BER Bit Error Rate)

C'est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits émis. Une méthode directe de mesurer du TEB consiste à compter les erreurs de transmission.



Cette technique est beaucoup appliquée aux systèmes radio ou filaires (présentant un taux d'erreur assez élevé de l'ordre d'un bit erroné sur un million de bits transmis ou  $10^{-6}$ ) ; ce qui n'est pas le cas pour les systèmes de transmission par fibre optique (présentant des erreurs beaucoup moins fréquentes de l'ordre d'un bit erroné sur mille millions de bits transmis). Ces derniers font appel à des techniques d'estimation du TEB sans passer par les techniques de comptage.

### **3. Facteur de qualité Q**

Le facteur de qualité est un paramètre qui permet l'estimation du taux d'erreur binaire sans avoir à compter les erreurs. Il représente le rapport signal sur bruit électrique en entrée du circuit de décision du récepteur. Sachant que le rapport signal sur bruit du récepteur d'un système de transmission par fibre optique a un impact direct sur les performances de ce système.

Le facteur de qualité est souvent utilisé plutôt que le taux d'erreur binaire dès lors que ce dernier est trop faible pour être mesuré.

## Conclusion

Le très haut débit est une innovation technologiquement attractive, la plupart des intervenants dans le monde des télécommunications avance aujourd'hui la notion de réseau à très haut débit. Cette offre est définie comme étant la mise à la disposition des utilisateurs d'un réseau d'accès supportant des débits supérieurs à 100Mbps du réseau vers l'abonné et supérieurs à 10Mbps de l'abonné vers le réseau.

Les systèmes de transmission à haut débit sont des structures relativement complexes faisant appel, pour leur conception, à plusieurs domaines de la physique, allant du traitement de l'information en passant par les hyperfréquences, pour finalement exploiter l'optique dans le cas des structures les plus performantes en termes de débit.

La première partie de chapitre aura permis au lecteur d'avoir un aperçu sur la structure globale des réseaux optiques, avec un intérêt particulier pour le réseau optique passif.

Dans la deuxième partie nous avons survolé les différents critères d'évaluation d'une transmission par fibre optique à savoir le diagramme de l'œil, le taux d'erreur binaire et le facteur de qualité.

### Références chapitre 3

- [1] Carlos Eduardo PEREZ VALENZUELA- Formats de modulation pour les télécommunications optiques- Thèse de Doctorat- Ecole nationale supérieure des télécommunications de Bretagne- 2006.
- [2]Jean-Louis VERNEUIL – Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbps- Thèses de Doctorat – Université de Limoges-2003.
- [3] Sarah BANAMEUR – La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable – Thèse de Doctorat- Université de Sidi bel abbès- 2015.
- [4] Fabia RAHARIMANITRA- Le multiplexage en temps et en longueur d'onde dans le réseau d'accès, permettant la migration vers la nouvelle génération de PON (NG-PON) à 10 Gbps- Thèse de Doctorat – Université européenne de Bretagne- 2012.
- [5]Max Fréjus O SANYA – Déploiement de réseaux optiques d'accès NG PON dans les métropoles de pays en développement- Thèse de Doctorat – Université de Limoges- 2015.
- [6]Khalil KECHAOU – Modélisation et caractérisation de sources optiques pour les réseaux d'accès et métropolitains- Thèse de Doctorat- Télécom Paris Tech-2012.
- [7]Fabienne SALIOU – Etude des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée- Thèse de Doctorat- Télécom Paris Tech- 2010.
- [8]TOGNICLO CAROLLE THON-ADJALIN – Etude d'un système de transmission sur fibre optique plastique à saut d'indice – Université Laval- 2011.
- [9]Biswanath MUKHERJEE – Optical WDM Networks- Springer.
- [10] Mounir SARNI, Benoit HILT, Nicolas CLEMENTZ, Pascal LORENZ – Expérimentation de service triple play sur un réseau optique passif- 2010.
- [11] GERD KEISER – Optical Communications Essentials – 2003
- [12] Joanna TOMASIK – Garantie de la qualité de service et évaluation de performance de réseaux de télécommunications- Université Paris sud- 2012.
- [13]Hassan TEIMOORI- Commutation de paquets dans les réseaux optiques transparents à partir de fonctions logiques tout optiques-Thèse de Doctorat- Télécom ParisTech- 2007
- [14]NAIT ZERRAD Warda, NEBBACHE Siham – Etude des performances d'un système WDM-PON reposant sur la re-modulation NRZ-DQPSK – Mémoire de Master- Université de Tlemcen- 2015.

# **Chapitre 4**

## **Les Semi- Conducteurs du Type III-Nitrures.**

## Introduction

La recherche de nouveaux matériaux aux propriétés physiques et/ou chimiques spécifiques est un enjeu majeure de l'industrie actuelle, et ce quels que soient les domaines d'application considérés.

Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les semi-conducteurs interviennent dans presque tous les équipements électroniques et optiques

Le silicium est actuellement le matériau semi-conducteur le plus utilisé pour la fabrication de composants électroniques. En électronique, et en optoélectronique les propriétés de ce matériau sont insuffisantes (mobilité des porteurs relativement petite, transitions électroniques indirectes ...). Ce type de semi conducteur présente la fâcheuse caractéristique d'avoir un gap d'énergie indirect, ainsi qu'un indice de réfraction assez élevé. [1] Ce qui entraîne un échauffement du composant, cet échauffement devient excessif lorsqu'on travaille avec des fréquences importantes.

Contrairement aux semi conducteurs à gap indirect, ceux à gap direct ne s'échauffent que très peu. La recherche dans ses matériaux a été déclenchée en observant particulièrement certaines de leurs propriétés. Assez récemment, un très grand intérêt a été apporté aux éléments de la colonne III combinés à l'azote (élément de la colonne V) afin de former des semi-conducteurs du type III-V, appelés communément les nitrides. Le gap direct des nitrides-III a la particularité de couvrir un très large domaine électromagnétique, allant de l'ultraviolet à l'infrarouge, incluant toutes les combinaisons possibles.

De ce fait ; il nous est apparu plus judicieux de décrire les semi-conducteurs que nous allons utiliser dans cette étude. Ce chapitre résume quelques propriétés des semi-conducteurs du type III-Nitrides. Dans un premier temps on va parler des structures cristallines dans lesquelles ces matériaux peuvent se présenter, les différentes propriétés structurales plus particulièrement les paramètres de maille. Par la suite ; on va s'intéresser aux propriétés électriques et électroniques. Finalement, les différentes caractéristiques optoélectroniques sont présentées.

Nous exposons aussi les principales méthodes de croissance des semi-conducteurs de type III-nitrides ainsi que les différents substrats utilisés. Notons que la première méthode de croissance épitaxiale fut l'HVPE (Hybrid Vapor-Phase Epitaxial). Puis l'usage de la MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) comme processus de fabrication devint la plus usitée pour la croissance de couches minces. Cependant la croissance des semi-conducteurs du type III-V par la MBE (Molecular Beam Epitaxy) est la technologie la plus utilisée pour la production des cristaux en couches minces de bonne qualité. [1]

Nous faisons un petit passage sur les différentes hétérostructures en mode hexagonale ; soit les boîtes, fils et puits quantiques. L'objectif est de montrer l'intérêt d'utiliser ses nanostructures dans les dispositifs optoélectroniques.

Et pour finir, nous présentons les principales applications des nitrides-III dans le domaine de l'optoélectronique.

## I. Paramètres fondamentaux des Nitrides-III

Parmi les semi-conducteurs de type III-Nitrides, le GaN est le composant qu'on trouve le plus dans la littérature. Le premier rapport de synthèse des nitrides-III était en 1938 pour des cristaux de GaN et InN. Puis 30 ans plus tard, Maruska et al. élaborent des couches de GaN sur saphir en utilisant la méthode de dépôt en phase vapeur et mesurent son gap (3.39 eV). Des couches épitaxiées ont été aussi reportées à la fin des années 1960 en utilisant la méthode HVPE. En 1971, Pankove et al. Rapportent la première diode bleue à base de GaN.

Les recherches sur cette famille de semi-conducteurs ont progressé dans les années 1990 ; quand Nakamura et al. annoncent la conception de la première diode électroluminescente émettant dans le bleu ; à base de GaN et  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . Après ce progrès, la fabrication des dispositifs à base de nitrides-III s'est accélérée.

Dans ce qui suit nous présentons les caractéristiques principales de ces semi-conducteurs.

### 1. Propriétés structurales

Les nitrides d'éléments III sont des semi-conducteurs III-V à gap direct, formés d'atomes d'azote et d'éléments de la colonne 13 de la classification périodique de Mendeleïev : il s'agit des composés GaN, AlN, InN et leurs alliages.

Ces semi-conducteurs se présentent essentiellement sous deux structures différentes (polytypes) : la structure **wurtzite** (hexagonale) et la structure **zinc-blende** (cubique), toutes deux représentées sur la figure ci-dessous. Il existe théoriquement une troisième structure « **Rocksalt** ou **NaCl** » mais son apparition ne se fait qu'à des pressions extrêmement hautes.

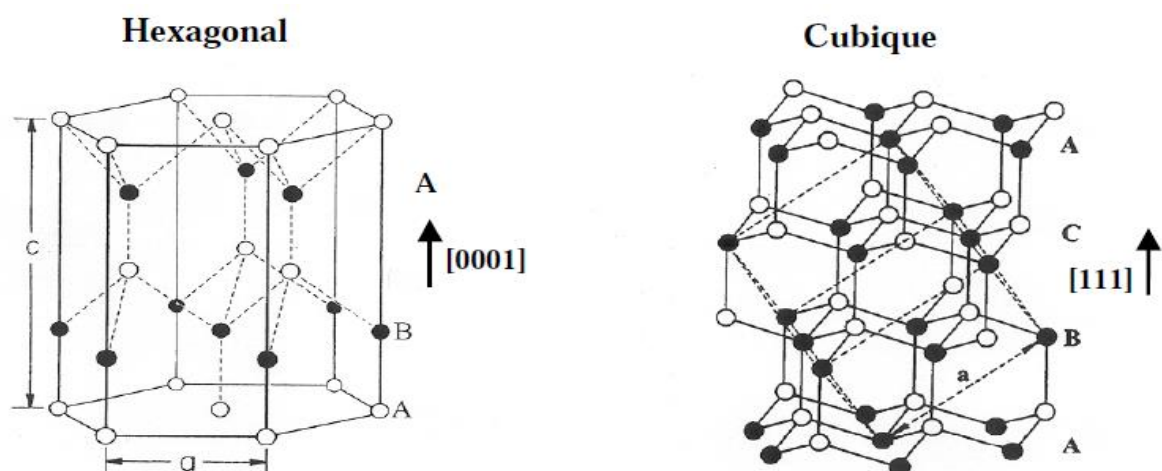


Figure -1- Paramètres de maille dans les structures hexagonale et cubique.

La majeure partie des études réalisées sur cette famille de semi conducteurs a été menée sur la structure **wurtzite**. Cette structure, thermodynamiquement stable ; correspond à deux réseaux hexagonaux, l'un occupé par les atomes des éléments de la colonne III de la classification périodique (Ga, Al et In) et l'autre occupé par les atomes d'azote (N).

Cette structure est définie par trois paramètres, la largeur d'un coté hexagonal **a**, la hauteur de la maille élémentaire **c** et le paramètre interne **u** décrivant le décalage des deux sous réseaux selon l'axe c qui est égal à **0.375** pour un cristal wurtzite idéal.

Dans une structure wurtzite idéale, le rapport **c/a** vaut  $\sqrt{\frac{8}{3}} \approx 1.633$ . Dans les structures réelles, ce rapport permet d'obtenir une indication de l'écart par rapport à la structure wurtzite idéale.

Le tableau ci-dessous regroupe les paramètres structuraux **a**, **c** et **u** des composés binaires GaN, AlN et InN.

	<b>a</b> (Å)	<b>c</b> (Å)	<b>c/a</b>	<b>u</b>
<b>GaN</b>	3.189	5.186	1.626	0.377
<b>AlN</b>	3.112	4.982	1.6	0.380
<b>InN</b>	3.533	5.693	1.611	0.378

**Tableau -1- Paramètres de maille des SC-III-Nitrides.**

**Remarque :** ces valeurs sont celles des matériaux massifs et elles peuvent différer pour des couches épitaxiées à cause des contraintes, des défauts et d'impuretés.

## 2. Les propriétés électriques

**2.1. La polarité :** dans la structure wurtzite comme les directions [0001] et [000-1] ne sont pas équivalentes, on définit une polarité métal et une polarité azote pour différencier les deux orientations. Par convention, l'axe [0001] est orienté du métal vers l'azote. Les structures faites selon l'orientation [0001] sont dites à polarité métal (Ga, In...) et celles faites selon [000-1] à polarité azote. La polarité d'une couche ne nous renseigne pas sur la nature des atomes en surface.



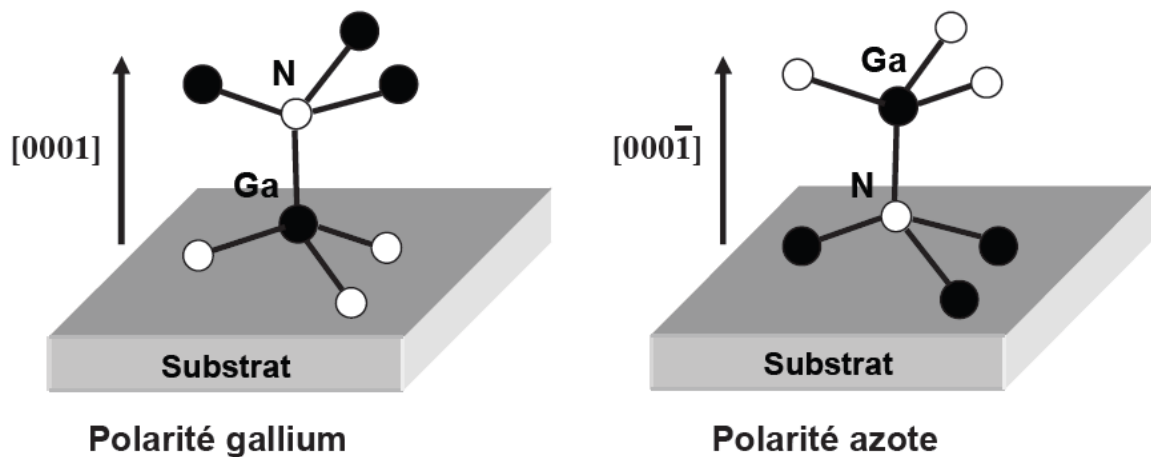


Figure-2- Polarité du GaN.

**2.2. La polarisation spontanée :** dans leur état d'équilibre, les matériaux GaN, AlN, InN et leurs alliages possèdent une polarisation spontanée. Elle résulte de la non coïncidence des barycentres des charges positives (liées aux atomes du métal) et négatives (liées aux atomes d'azote). Il se forme alors dans chaque maille un dipôle ; ces dipôles s'ajoutent alors à travers la structure pour donner lieu à une polarisation macroscopique orientée suivant l'axe de croissance  $c$  [0001].

**2.3. La polarisation piézoélectrique :** la piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique. L'effet inverse existe également, à savoir la création de déformations mécaniques lorsqu'on applique un champ électrique. Ce caractère piézoélectrique est dû au manque de symétrie dans la structure cristalline, à la nature fortement ionique des liaisons chimiques et aux déformations présentes dans le cristal. [2]

Ainsi en absence de polarisation externe, la polarisation des matériaux à structure wurtzite  $\mathbf{P}$ , possède deux composantes ; la polarisation spontanée  $\mathbf{P}_{sp}$  et la polarisation piézoélectrique  $\mathbf{P}_{piezo}$ .

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{sp} + \mathbf{P}_{piezo}$$

**2.4. Le champ de claquage :** la tension maximale de fonctionnement du composant est dépendante du champ de claquage ; ce paramètre qui est très important lorsque l'on s'intéresse à l'électronique de puissance.

Le champ de claquage appelé aussi champ critique et la largeur de bande interdite sont liés : plus le gap est important ; plus le champ de claquage théorique sera élevé. Cela signifie aussi que ce dernier diminue quand la température augmente.

### 3. Propriétés électroniques

Les propriétés électroniques des nitrides-III sont directement reliées à la concentration des porteurs libres (électrons-trous) dans le semi conducteur, à leur mobilité et aux défauts structuraux présents dans le matériau.

#### 3.1. Concentration des porteurs libres

Les bandes de valence et de conduction sont composées de niveaux énergétiques continus qui représentent les états énergétiques. Vu qu'il existe différents niveaux électroniques dans les atomes, alors le nombre des états énergétiques n'est pas constant ; on parle alors de **densité d'état**.

La concentration des porteurs libres, dans les meilleurs des cas est fixée par le dopage intentionnel dans la couche. Cependant, il existe, dans le cas des nitrides-III un dopage résiduel non intentionnel lié à la présence d'impuretés et de défauts structuraux, difficile à contrôler. [3]

Les mesures électriques sur les nitrides (GaN, InN, InGaN) montrent une forte concentration d'électrons, généralement de l'ordre de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  leur donnant un caractère intrinsèquement de type N. Cette forte densité d'électrons peut avoir plusieurs origines : les défauts structuraux spécialement les lacunes d'azote, les impuretés, ... etc. Elle peut également interférer dans la détermination du gap d'énergie.

La fabrication des dispositifs micro et optoélectroniques à base de nitrides-III nécessite le contrôle de la concentration d'impuretés résiduelles dans le matériau ainsi que la maîtrise de l'incorporation d'impuretés spécifiques pour le dopage N et P.

#### 3.2. Dopage des nitrides

Le dopage est une technique qui permet d'augmenter la quantité de trous ou d'électrons d'un matériau en substituant une très faible quantité de ses atomes par des atomes d'une autre nature. On parle de dopage de type P lorsqu'on ajoute des atomes possédant un ou plusieurs trous de plus (un ou plus électrons de moins). Dans ce cas, la conduction électrique se fera principalement par les trous. Inversement ; on parle de dopage de type N lorsqu'on ajoute des atomes ayant un ou plusieurs électrons de plus ; dans ce cas on favorise la conduction du courant par les électrons.

**3.2.1. Dopage de type N :** les nitrides sont intrinsèquement de type N, avec un excès d'électrons. Augmenter le caractère N des nitrides est donc relativement facile. Divers éléments peuvent être utilisés pour le dopage de type N mais le plus courant est le silicium (Si).

**3.2.2. Dopage de type p :** puisque les nitrides sont intrinsèquement de type n, il est difficile d'obtenir un dopage p. Aujourd'hui le Magnésium (Mg) est le dopant le plus utilisé pour les nitrides.

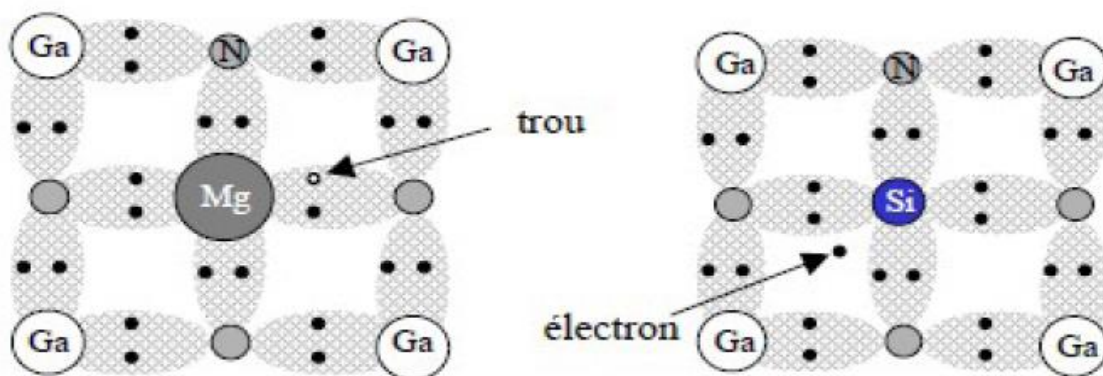


Figure -3- Dopage des nitrides-III.

Le contrôle de dopage de type N du GaN est facile à réaliser mais le dopage de type P est difficile. Dans le cas d' AlN, il est difficile de contrôler les deux types de dopage, le dopage de type P particulièrement. En outre, l'InN qui dispose d'une bande interdite d'environ 0.64 eV, peut être facilement dopé de type N en introduisant des défauts structuraux, cependant des difficultés sont attendues pour la réalisation du dopage de type P.

La fabrication des dispositifs optoélectroniques telle que les diodes électroluminescentes nécessite l'obtention des couches dopées de type n et p. l'obtention des deux types de dopage de GaN offrent aussi la possibilité de fabriquer des dispositifs électroniques de haute puissance et opérant aux fréquences de grande résistance thermique et pouvant résister à des environnements hostiles. [4]

**3.3. La mobilité :** c'est un facteur déterminant pour les dispositifs, ce qui explique l'importance de cette caractéristique dans le domaine de l'optoélectronique et des télécommunications. Elle représente la capacité des porteurs à se déplacer dans le matériau sous l'effet d'un champ. Or, toute modification dans ce réseau, comme l'élévation de la température ou le dopage, va modifier la mobilité des porteurs notée généralement  $\mu$ . Les recherches ont montrés que plus le dopage du matériau

est élevé, plus la mobilité va chuter, ce qui est le cas de tous les semi-conducteurs. Aussi, l'impact de la température sur la mobilité des porteurs est fort à faible concentration.

### 3.3.1. GaN

Les figures ci-dessous montrent l'effet de la concentration d'électrons et de la température sur la mobilité des porteurs libres de GaN.

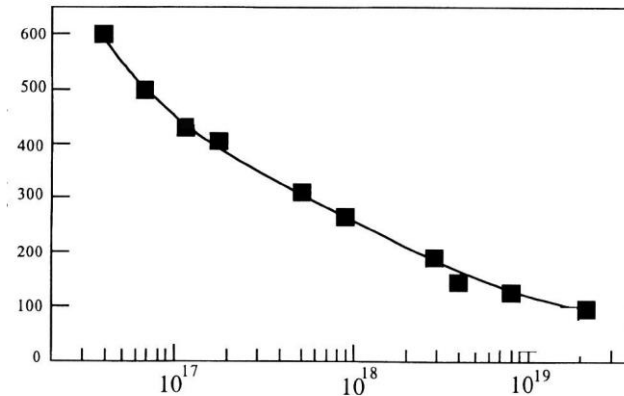


Figure -4- La mobilité des porteurs de GaN en fonction de la concentration d'électrons à  $T= 300$  K.

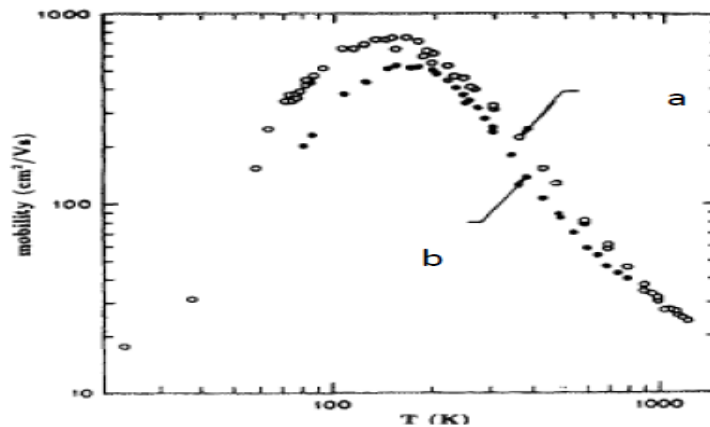


Figure -5- La mobilité en fonction de la température pour des concentrations de GaN  
a-  $n= 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; b-  $n= 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Dans le GaN, à une température de 300K ; la densité des porteurs intrinsèques est de l'ordre de  $2.10^{-10} \text{ cm}^{-3}$ , la vitesse de saturation des électrons est voisine  $2,5 .10^7 \text{ cm/s}$ , le champ de claquage est de l'ordre de  $5.10^6 \text{ V/cm}$ . Le coefficient de conductivité thermique est comparable à celui du silicium, il est de  $1,5 \text{ W/cmK}$ . Enfin, les coefficients de dilatation thermique sont de l'ordre de  $5,6$  et  $7,7 .10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . [5]

### 3.3.2. AlN

La figure ci-dessous montre la mobilité des électrons de l'AlN-WZ et l'AlN-ZB en fonction de la température. On remarque que la mobilité diminue avec l'augmentation de la température.

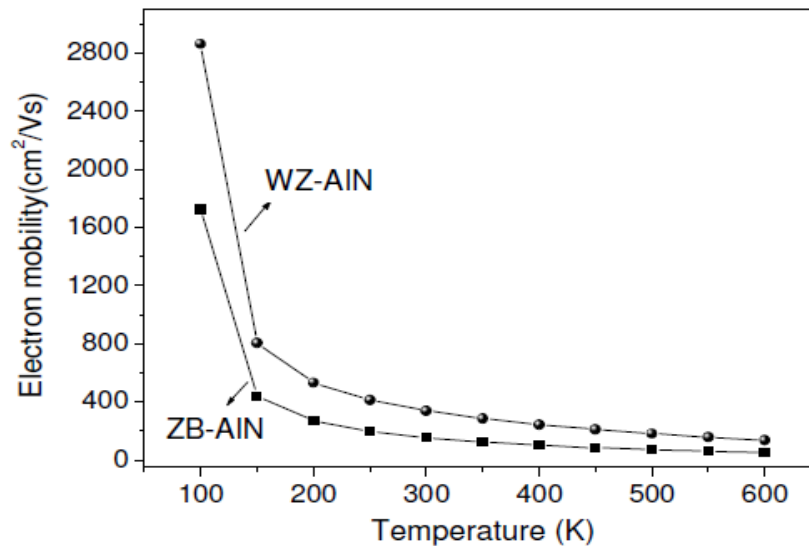


Figure-6- La mobilité de l'AlN en fonction de la température.

Et de même pour la courbe de la mobilité des électrons en fonction de la concentration présentée dans la figure ci-dessous ; on voit que plus la concentration augmente, plus la mobilité des électrons diminue que ce soit pour l'AlN-WZ ou l'AlN-ZB.

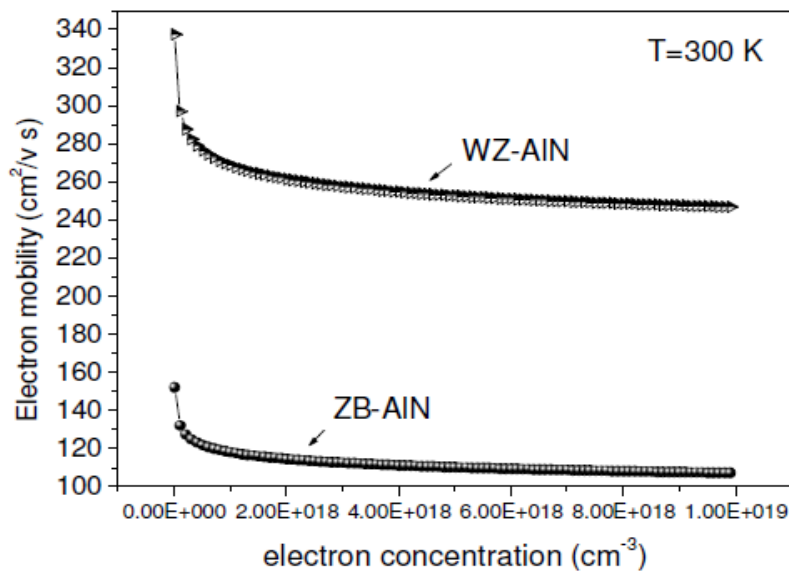


Figure-7- La mobilité de l'AlN en fonction de la concentration des électrons à la température T= 300 K.

### 3.3.3. InN

A la température ambiante, la concentration des porteurs dans l'InN est de  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , qui diminue à un minimum de  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à **150K**. La mobilité des porteurs dans InN est inversement proportionnelle à la concentration des électrons libres présents dans le matériau ; à la température ambiante elle est de l'ordre de **2700  $\text{cm}^2/\text{V.s}$**  et elle atteint une valeur maximale de **5000  $\text{cm}^2/\text{V.s}$**  à **150K**. [6]

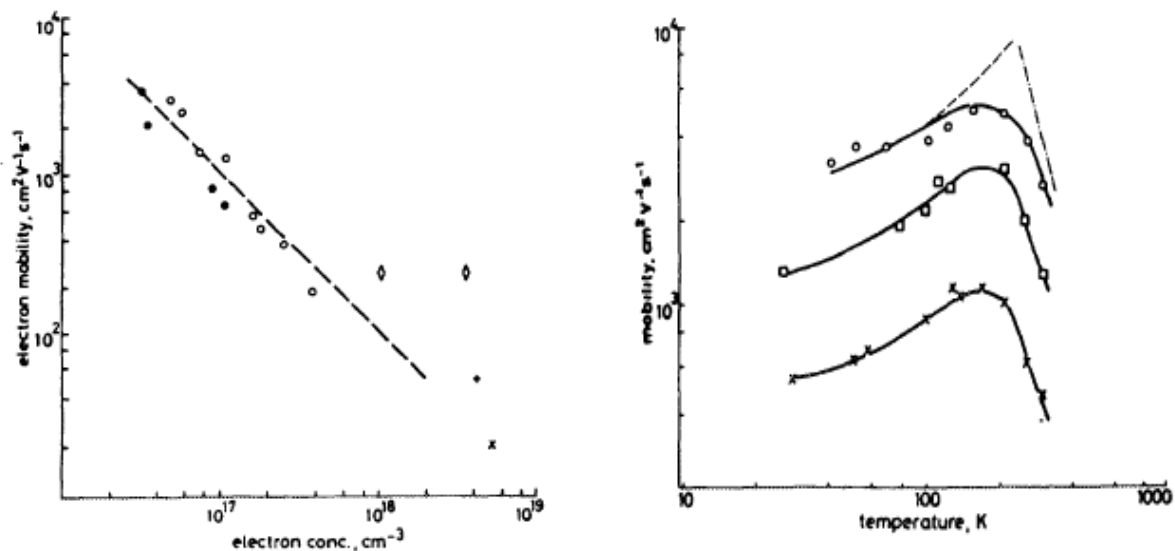


Figure-8- La mobilité en fonction de la concentration et de la température (InN).

### 3.4. Les défauts structuraux

Il existe plusieurs types de défauts structuraux dans un cristal. Ils peuvent être classés en deux catégories : les défauts ponctuels et les défauts étendus.

**3.4.1. Les défauts ponctuels :** il s'agit essentiellement de lacunes, celles-ci apparaissent lorsque les conditions expérimentales défavorisent la concentration de l'un des éléments dans l'enceinte de dépôt. Ces vides dans la structure vont générer ce que l'on appelle un dopage résiduel de type N dans le cas de lacunes d'azote et de type P pour les lacunes de gallium, aluminium ou indium.

On trouve aussi ce qu'on appelle les anti-sites, les impuretés par substitution et les défauts interstitiels.

**3.4.2. Les défauts étendus :** le désaccord de maille entre le substrat et la couche épitaxiée étant très important, l'épaisseur critique d'épitaxie est atteinte dès les premières couches déposées. Les contraintes se relaxent alors pendant le processus de croissance, donnant naissance à des **dislocations** ou à des **défauts d'empilement**. [8] Donc ; les dislocations se forment afin de relâcher les contraintes emmagasinés dans le matériau et donc de réduire l'énergie totale du système. Les dislocations sont des défauts néfastes pour les couches actives des dispositifs optoélectroniques car elles jouent le rôle de centre de recombinaisons non radiatives. Il en existe 3 types coin (edge dislocations), vis (screw dislocations) et mixte. [8]

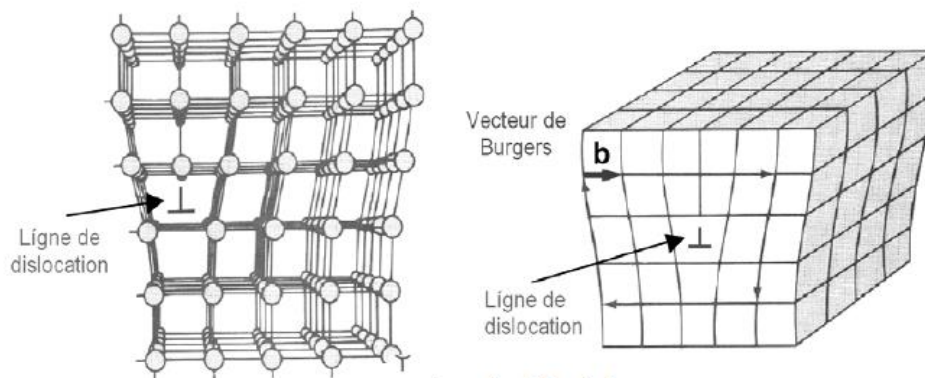


Figure -9- Représentation d'une dislocation coin.

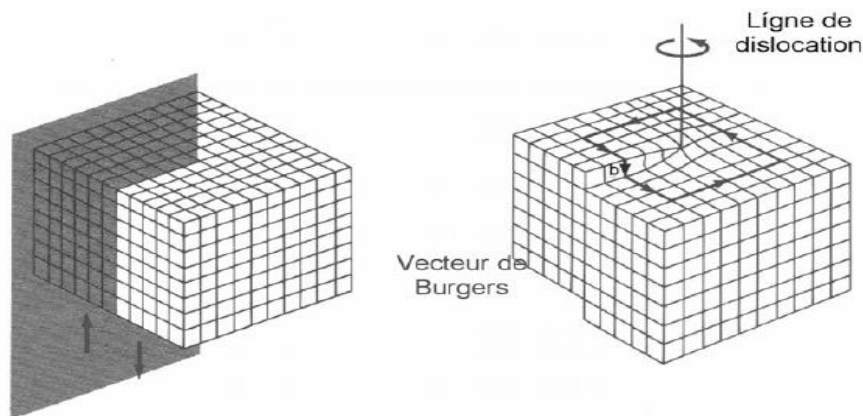


Figure -10- Représentation d'une dislocation vis.

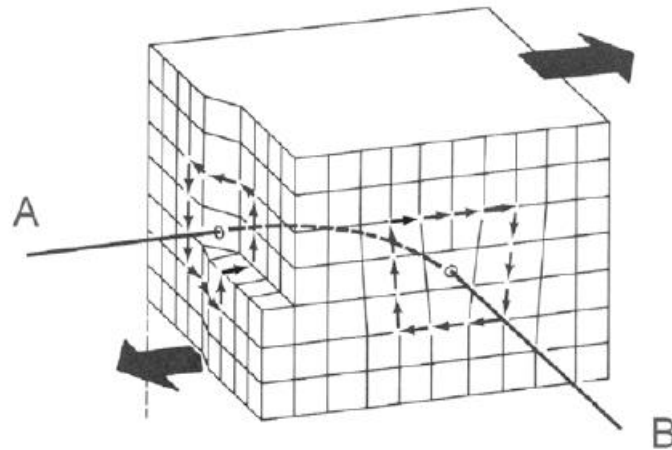


Figure -11- Représentation d'une dislocation mixte.

Les fautes d'empilement correspondent à une erreur dans la séquence d'empilement des atomes dans le matériau. L'erreur est ensuite conservée et répercutée sur les couches suivantes. Leur densité est en général importante au voisinage de l'interface substrat-nitride. [8]

Une autre façon permettant de relaxer plastiquement les contraintes est la formation de fissures. C'est un mode de relaxation intermédiaire.

En plus des dislocations et des défauts d'empilement ; on trouve les inclusions et les joints de grain.

## 4. Les propriétés thermiques

**4.1. Conductivité thermique :** représente la capacité du matériau à transférer une quantité de chaleur par unité de temps et par unité de surface sous un gradient de température. Idéalement, il faut que cette valeur soit la plus élevée possible pour les applications d'électronique de puissance, car la chaleur non dissipée va entraîner une élévation de la température du composant qui va se traduire par une diminution de la mobilité et donc des performances électriques des composants. [8]

**4.2. Coefficient de dilatation thermique :** la dilatation thermique se définit comme étant la déformation du matériau causée par le changement de température. Il est important de tenir compte de ce phénomène lorsque l'on étudie les propriétés des semi conducteurs à des températures différentes mais aussi lors de la croissance des matériaux car celle-ci se fait à haute température.

Les coefficients de dilatation thermique permettent d'évaluer la déformation de la maille cristalline en fonction de la température.



Le coefficient de dilatation thermique appelé aussi coefficient d'expansion thermique est donné par :

$$\alpha = \frac{1}{a} \frac{da}{dT} \quad \text{Où } a \text{ est le paramètre de maille du matériau.}$$

**4.3. La température de fusion :** La température de fusion d'un corps représente la température à une pression donnée, à laquelle un élément pur ou un composé chimique passe de l'état solide à l'état liquide.

Le tableau ci-dessous regroupe les différentes propriétés thermiques des éléments binaires.

		GaN	AlN	InN
<b>Conductivité thermique</b>	W.cm <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	1.3	1.47	0.2
<b>Dilatation thermique (K<sup>-1</sup>)</b>	$\alpha_a$	$5.6 \times 10^{-6}$	$4.2 \times 10^{-6}$	$3.8 \times 10^{-6}$
	$\alpha_c$	$3.2 \times 10^{-6}$	$5.3 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-6}$
<b>Température de fusion</b>	°C	2500	2750	950

## 5. Les propriétés optoélectroniques

Les propriétés optoélectroniques sont celles qui sont prises en compte pour l'utilisation d'un matériau dans la partie active des composants électroniques émettant ou interagissant avec la lumière.

**5.1. Structure de bande :** La connaissance de la structure de bande d'un semi conducteur est le paramètre essentiel pour la réalisation de dispositifs. Un des points importants de la structure de bande est le gap. Il représente la valeur d'énergie séparant le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction ; lorsque les deux extremums sont situés en centre de zone, on dit que le semi conducteur est à **gap direct**.

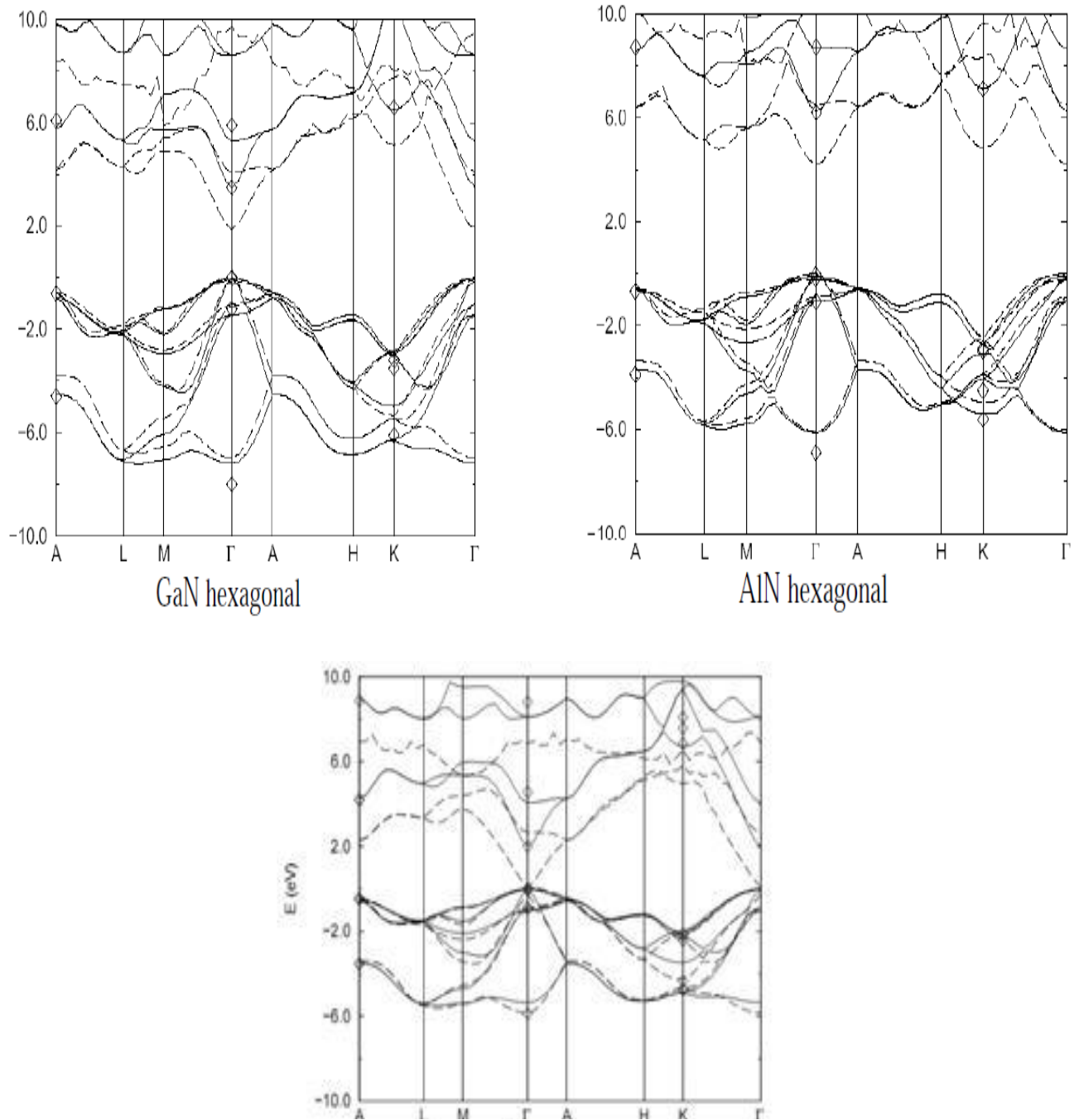


Figure -12- Diagramme de bandes de GaN, AlN et InN en phase hexagonale.

**5.2. Bande interdite (gap) :** les premières mesures de la bande interdite du GaN datent de 1970 ; elles ont donné une valeur de l'ordre de 3.5eV à basse température. A température ambiante la bande interdite est égale à 3.39eV environ ; ce qui correspond aux longueurs d'ondes dans l'ultraviolet proche.

Pour l'AlN, le gap est de l'ordre de 6.2eV à 300K et de 6.28 à basse température. Il est donc situé dans l'ultra violet lointain.

Si les valeurs du gap de GaN et AlN ont été déterminées rapidement, l'estimation de celui de InN a évolué au cours du temps, passant de 1.9eV (à 300K) en 1999 à 1.1eV, 0.7eV puis finalement 0.64eV (0.69eV à 0K).

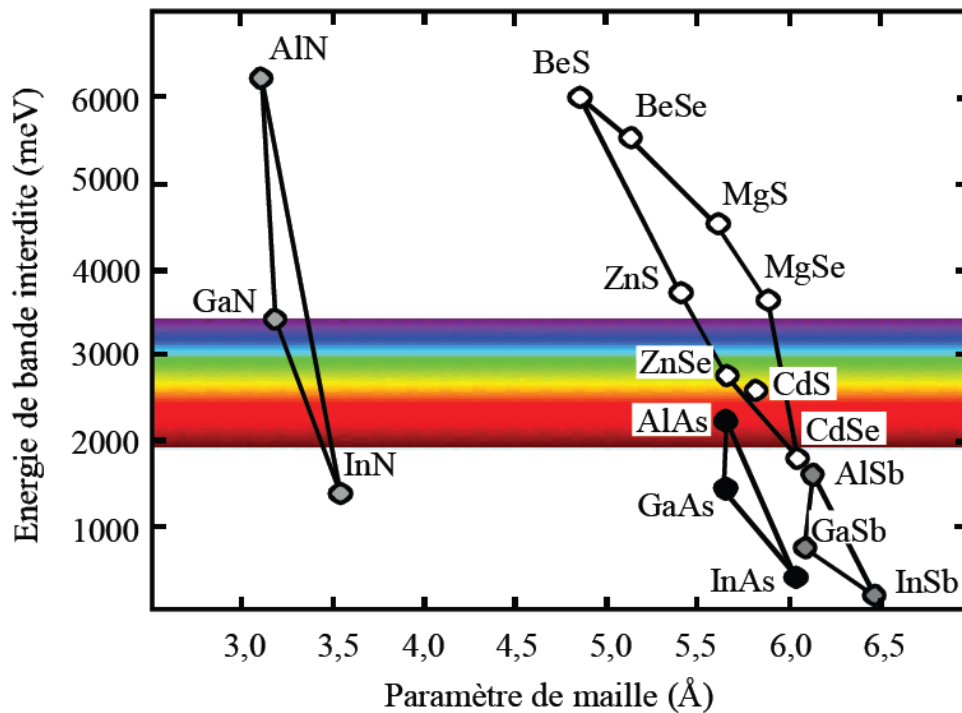


Figure -13- représentation du gap des semi-conducteurs en fonction de leurs paramètres de maille.

Historiquement, l'optoélectronique suit une évolution assez simple à décrire : que ce soit pour l'émission ou la détection de la lumière, on progresse petit à petit vers des longueurs d'onde de plus en plus faibles. C'est cette tendance qui donne lieu à un engouement de la recherche pour les nitrides-III. Leurs gaps permettent d'envisager la conception de dispositifs optoélectroniques pouvant émettre dans l'UV proche et lointain.

**5.2.1. Variation du gap en fonction de la température :** les expérimentations ont montré que l'énergie de la bande interdite diminue lorsque la température augmente. Ceci est dû à deux phénomènes : la dilatation thermique et l'interaction électron-phonon.

La variation de l'énergie de la bande interdite  $E_g(T)$  en fonction de la température est décrite par la formule de Varshni :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

Avec  $E_g(0)$  : le gap du matériau à 0K [eV]

$\alpha$  et  $\beta$  : Constantes pour un cristal donné

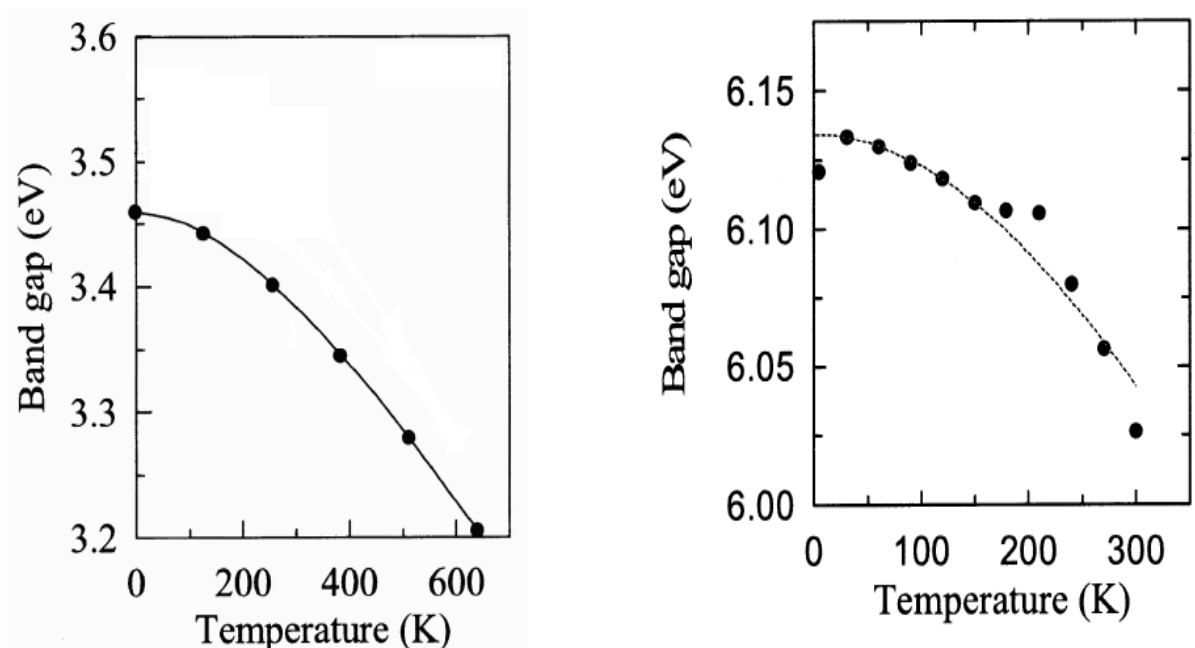


Figure -14- Largeur de la bande interdite en fonction de la température

### 5.3. Les masses effectives

L'étude du transport des porteurs de charge, autrement dit, les électrons et les trous est possible grâce à la notion de la masse effective.

Au lieu de décrire des électrons de masse fixée évoluant dans un potentiel donné, on les décrit comme des électrons libres dont la masse effective varie. Cette valeur rend ainsi compte des interactions entre l'électron et son environnement. [10]

Les masses effectives dans un semi conducteur sont directement reliées à la structure de bande de celui-ci. Elles sont proportionnelles à l'inverse de la courbure de la structure de bande respectivement au voisinage du minimum et du maximum des bandes de conduction et de valence.

L'approximation de la masse effective dans les semi-conducteurs permet de tenir compte des interactions entre les différentes bandes d'énergie du matériau. Plus sa valeur sera faible, moins la transition d'un électron d'un niveau d'énergie à un autre nécessitera d'énergie. [10]

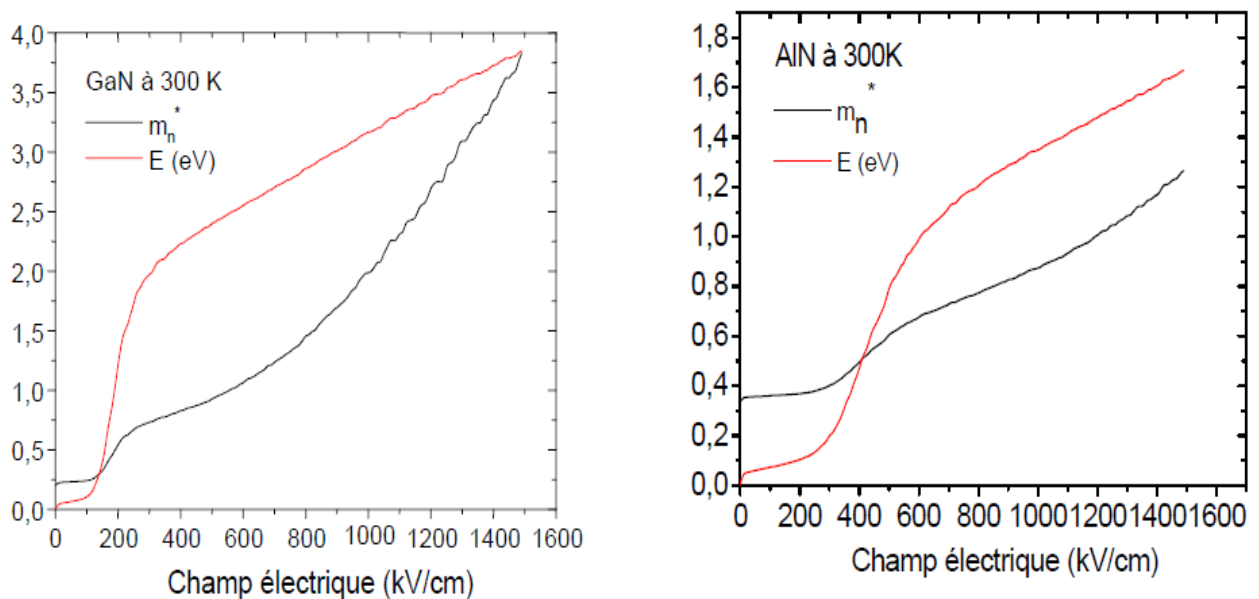


Figure -15- Variation de la masse effective et de l'énergie des électrons dans GaN et AlN en fonction du champ électrique.

## 6. Propriétés optiques

Les propriétés optiques d'un matériau recourent principalement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces constantes optiques sont très utiles pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant.

### 6.1. Constante diélectrique et indice de réfraction

La connaissance de l'indice de réfraction d'un matériau et particulièrement d'un semi conducteur est indispensable pour la modélisation des propriétés optiques des dispositifs émetteurs de lumière. Grâce à la détermination exacte de cet indice, le comportement d'une onde électromagnétique, se propageant dans ce matériau peut facilement être défini, et même correctement prédit. [1]

L'indice de réfraction d'un matériau est défini par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide  $c$ , sur sa vitesse dans le matériau  $v$  ; ce qui fait que cet indice ne peut en aucun cas être inférieur à 1.

$$n = c/v$$

L'indice de réfraction d'un semi conducteur est totalement dépendant de la valeur de sa bande interdite. C'est une relation inversement proportionnelle. Ce qui explique le fait que lorsque l'indice de réfraction d'un matériau augmente ; son gap d'énergie diminue dans une même proportion, et vice versa.

Pour un film cristallin de GaN de bonne qualité ; l'indice de réfraction varie de 2.1 (à une épaisseur de 1900 nm) à 2.5 (à une épaisseur de 480 nm). [11]

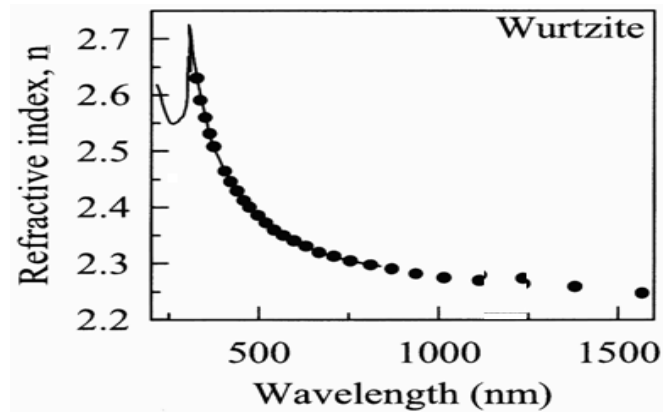


Figure -16- Variation de l'indice de réfraction du GaN en fonction de la longueur d'onde.

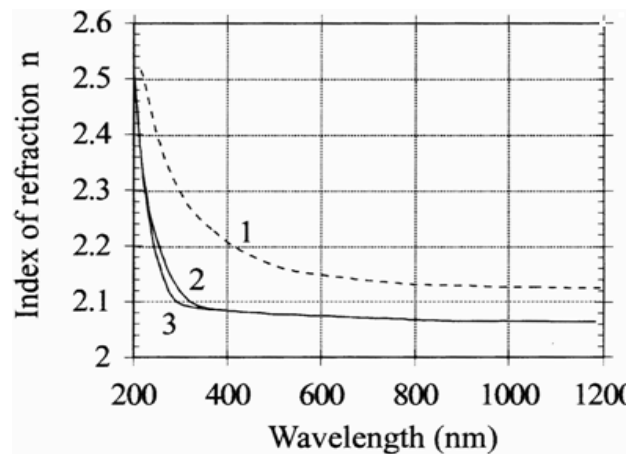


Figure -17- Variation de l'indice de réfraction du AlN en fonction de la longueur d'onde  
1- Geidur et Yaskov (1980)  
2-3- Demiryont et al. (1986)

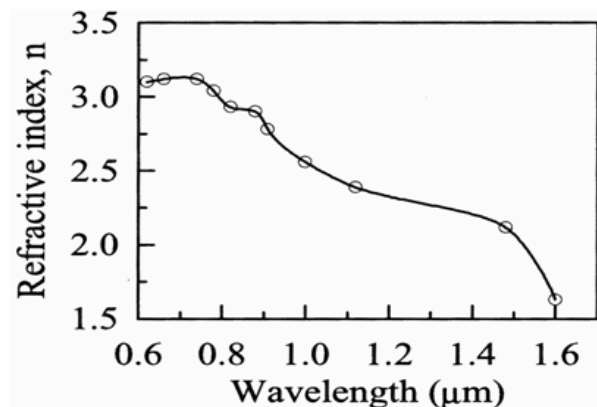


Figure -18- Variation de l'indice de réfraction du InN en fonction de la longueur d'onde.

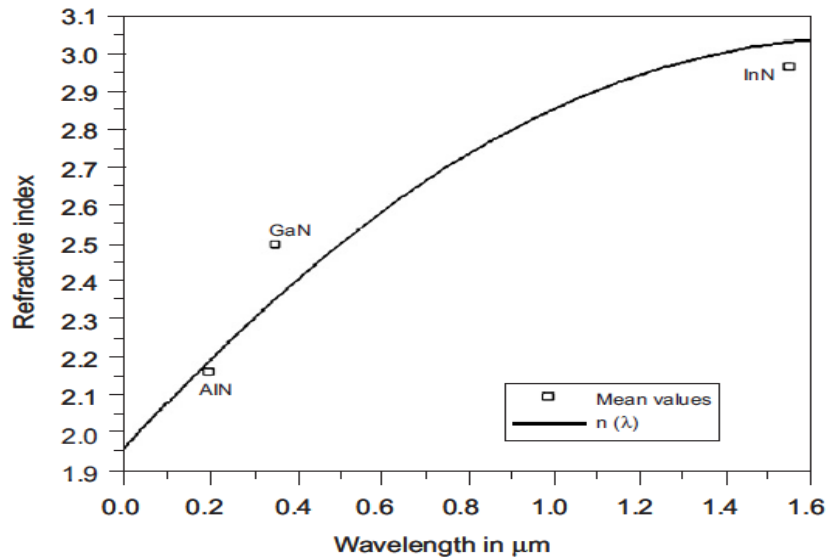


Figure -19- Indices de réfraction du GaN, InN et AlN.

Anani et al. Estimerent la variation de l'indice de réfraction des alliages et relièrent la formule de l'indice de réfraction  $n$  à l'énergie  $E_g$  d'un photon absorbé par un matériau :

$$E_g = hc/\lambda$$

## 6.2. Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption permet de déterminer la profondeur de pénétration d'un rayonnement d'une longueur d'onde particulière dans un matériau avant qu'il soit absorbé ainsi que l'épaisseur du matériau nécessaire. Dans un matériau avec un faible coefficient d'absorption, la lumière est faiblement absorbée et si le matériau a une épaisseur suffisamment petite, il apparaîtra transparent pour cette longueur d'onde.

L'indice de réfraction a une composante complexe et est défini par :

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda)$$

Où  $n$  est l'indice de réfraction réel traduisant la dispersion et  $k$  est le coefficient d'extinction (appelé aussi coefficient d'atténuation) traduisant la perte d'énergie dans le matériau.

Le coefficient d'absorption est défini par :

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda}$$

Il représente le taux d'énergie dissipée par unité de longueur dans le matériau.

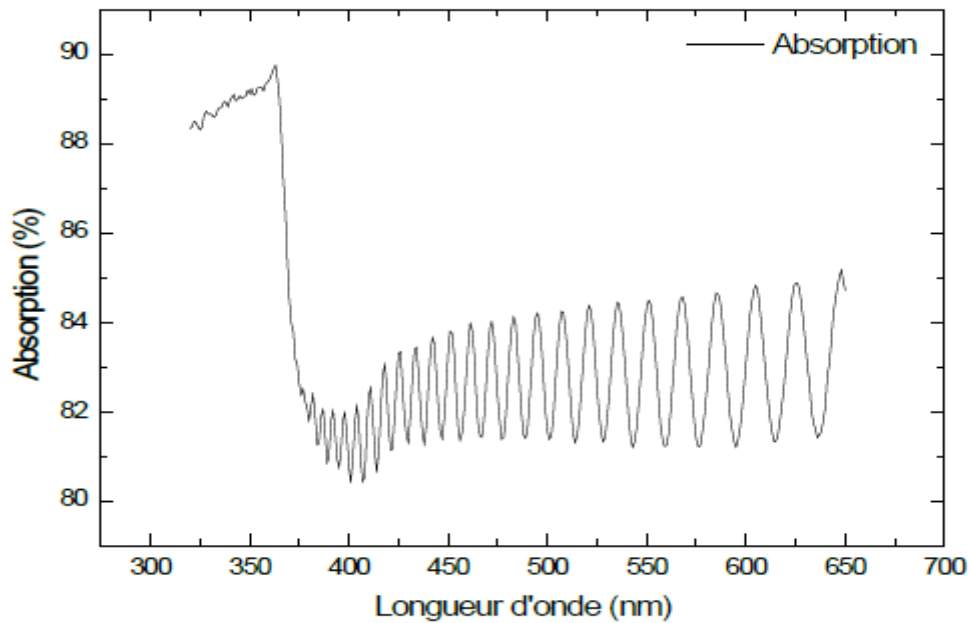


Figure -20- Courbe d'absorption du GaN en fonction de la longueur d'onde.

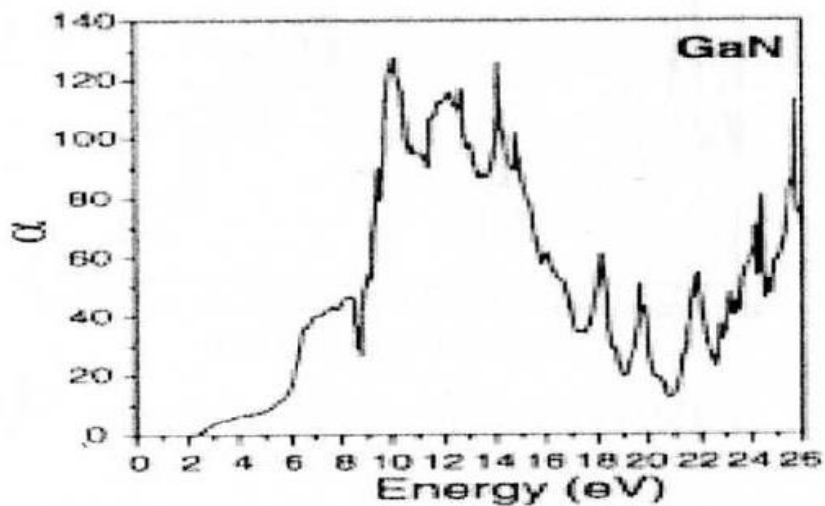


Figure -21- Coefficient d'absorption du GaN en fonction du gap.

Le GaN serait exploitable en optique intégrée pour des longueurs d'onde inférieures à 354 nm vu que ce matériau devient absorbant juste après avoir dépassé sa bande interdite.



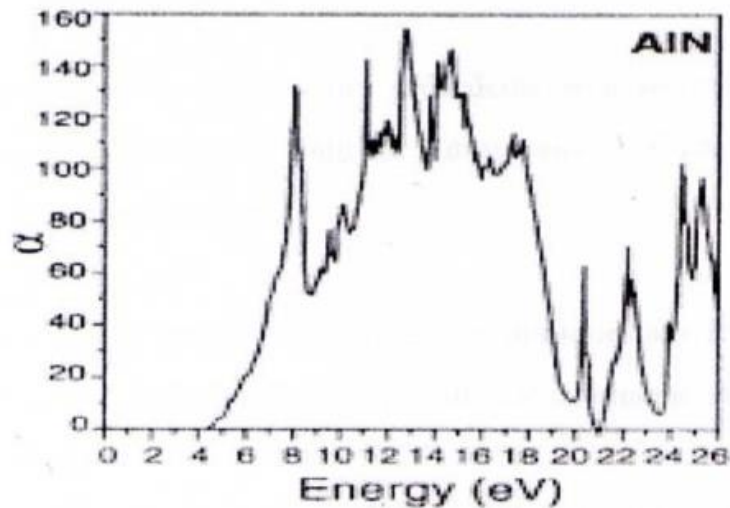


Figure -22- Coefficient d'absorption du AlN.

En ce qui concerne l'AlN, ce serait plutôt les longueurs d'ondes inférieures à 197 nm qui seraient utilisées. Ce qui place l'AlN comme un bon concurrent pour les isolants comme guides d'ondes électromagnétiques.

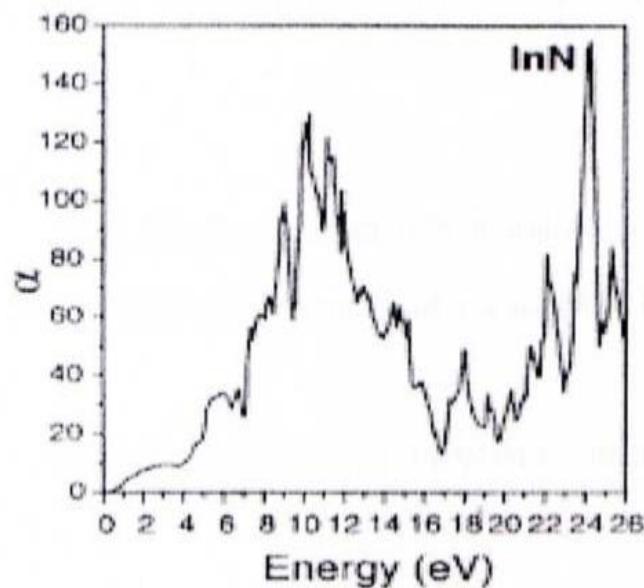


Figure -23- Coefficient d'absorption du InN.

Pour ce qui est de l'InN, l'absorption est presque continue sur tout l'axe des énergies, son utilisation en tant que guide d'onde optique n'est donc pas avantageuse que lorsqu'il formerait des alliages avec le GaN.

On peut voir clairement que la tendance de la courbe d'absorption est à la croissance, lorsque l'énergie de l'onde électromagnétique augmente. Ce qui signifie que le

phénomène d'absorption est directement proportionnel au gap d'un matériau considéré. [1]

Il nous est apparu que la courbe d'absorption présentait un bon paramètre permettant d'évaluer les performances d'un guide. Ce dernier serait mieux conducteur de la lumière lorsque l'absorption serait faible, par conséquent ; l'intégrité du signal serait conservée au bout du guide concerné.

Pour ce qui nous intéresse, les guides optiques à base de composés III-N, dont les gaps d'énergies varient entre 0.8 eV et 6.3eV ; il est tout à fait évident que le gap le plus élevé offre une meilleure conductivité optique.

## II. Théorie des Alliages

Les améliorations les plus spectaculaires sont venues de l'association de ces semi-conducteurs pour former des hétérojonctions sous forme de puits quantiques ou de super-réseaux d'alliages à base de nitrides, dans lesquels on peut faire varier, à volonté, la largeur de la bande interdite. [1]

Un alliage de semi-conducteur est tout simplement un mélange homogène de deux ou de plusieurs matériaux. On distingue les alliages binaires, ternaires et quaternaires.

La réalisation de structures ternaires du type AlGaN est relativement aisée. La structure InGaN est plus difficile à obtenir tandis que la structure AlInN est quasiment impossible à croître, ceci étant du au très large écart entre les structures initiales. [1]

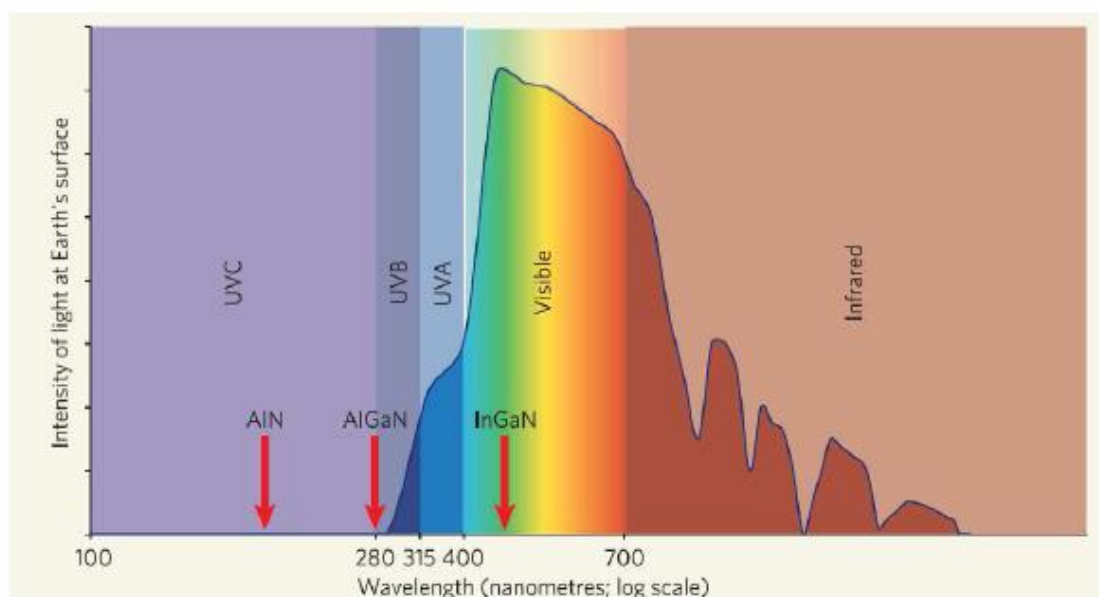


Figure-24- évolution des alliages utilisés pour les dispositifs optoélectroniques en fonction de la longueur d'onde ciblée.

## 1. Propriétés des ternaires AlGaN et InGaN

La connaissance des propriétés des alliages et la maîtrise de leur croissance sont des objectifs impératifs pour le développement de nouveaux dispositifs, précisément dans le domaine de l'UV lointain.

L'alliage  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  sert souvent de barrière de confinement dans les structures optoélectroniques à base de nitrides. Pour développer de nouveaux dispositifs, il faut connaître les propriétés de cet alliage et maîtriser sa croissance.

Vu que la mobilité des atomes d'Al en surface est plus faible que celle des atomes de Ga, la croissance de l'alliage d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  est relativement complexe.

L'alliage  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  est essentiel pour reconstituer la lumière bleue dans les diodes lasers et électroluminescentes.

Certaines propriétés  $P$  comme le paramètre de maille, la polarisation et les constantes piézoélectriques, peuvent être déduites par interpolation linéaire suivant la loi de Vegard.

Pour le ternaire InGaN:  $\mathbf{P}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x \mathbf{P}(\text{In}) + (1-x) \mathbf{P}(\text{Ga})$

Et respectivement pour AlGaN :  $\mathbf{P}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x \mathbf{P}(\text{Al}) + (1-x) \mathbf{P}(\text{Ga})$

### 1.3. Evolution du gap d'énergie

A partir des valeurs des bandes interdites des composés binaires GaN, AlN et InN, il est possible de déterminer la valeur du gap des ternaires AlGaN et InGaN en utilisant la loi de Vegard.

$$\mathbf{Eg}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x \mathbf{Eg}(\text{AlN}) + (1-x) \mathbf{Eg}(\text{GaN}) - x(1-x)\mathbf{C}$$

Où  $\mathbf{C}$  est le paramètre d'inclinaison plus connu sous le nom de bowing parameter. Il représente la non linéarité de l'énergie du gap en fonction de la composition.

AlGaN a reçu le plus d'attention des alliages de la famille des nitrides-III, en raison de son potentiel d'applications en hétérostructure AlGaN/GaN. [12]

### 1.1.1. Variation du gap d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de x

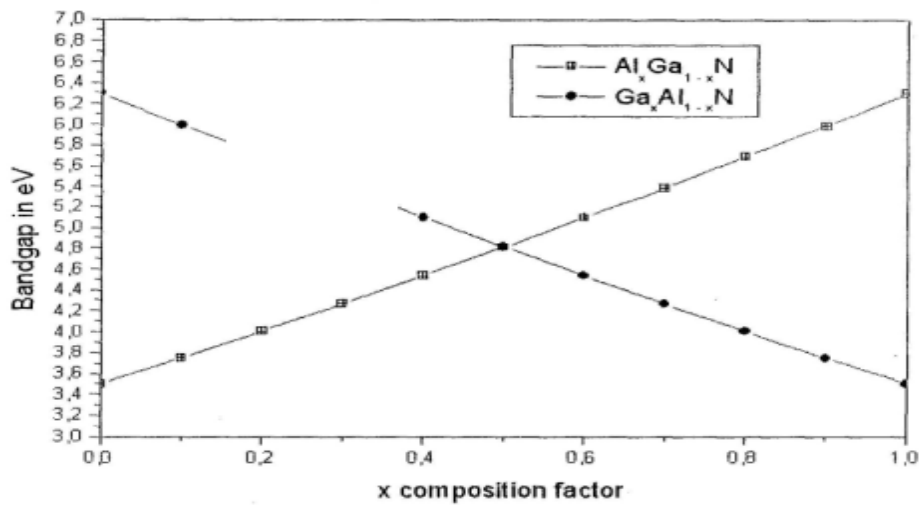


Figure -25- Gap d'énergie des structures  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  et  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  en fonction de X.

### 1.1.2. Variation du gap d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de la fraction de mole In

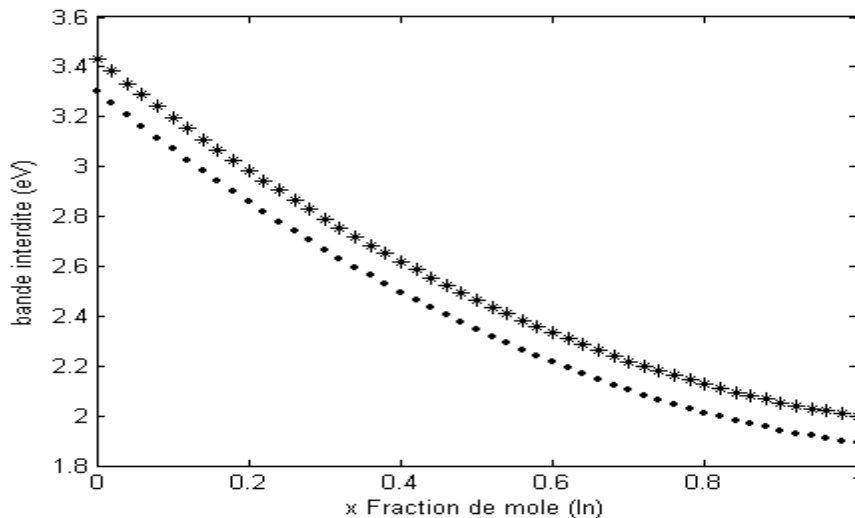


Figure -26- Variations du gap d'énergie d'une structure hexagonale  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  en fonction de X.

Les composés ternaires permettent d'obtenir une large gamme énergétique de gaps avec une faible variation des paramètres de maille. Ainsi le contrôle de la composition x de ces composés permet de construire des hétérostructures, puits quantiques voire des super réseaux donnant naissance à des propriétés électro-optiques intéressantes pour les composants optoélectronique. [13]

## 1.2. Concentration d'électrons en fonction de la température dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$

On observe que la concentration d'électrons augmente avec la fraction de Ga dans  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ , cependant cette concentration est très peu dépendante de la température entre 77 à 300 K.

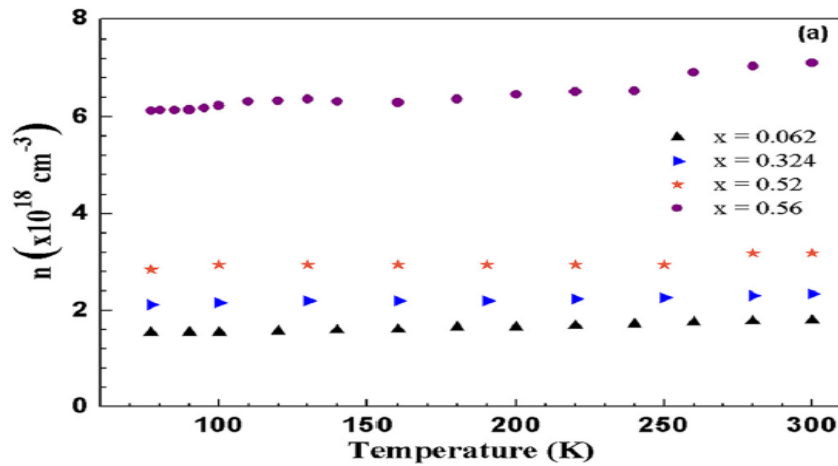


Figure -27- Concentration des électrons dans une structure  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  en fonction de la température.

## 1.3. Vitesse de saturation des alliages

Comme le montre la figure ci-dessous ; la vitesse de saturation de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  augmente -indépendamment de la température- avec l'augmentation de la fraction de mole Al.

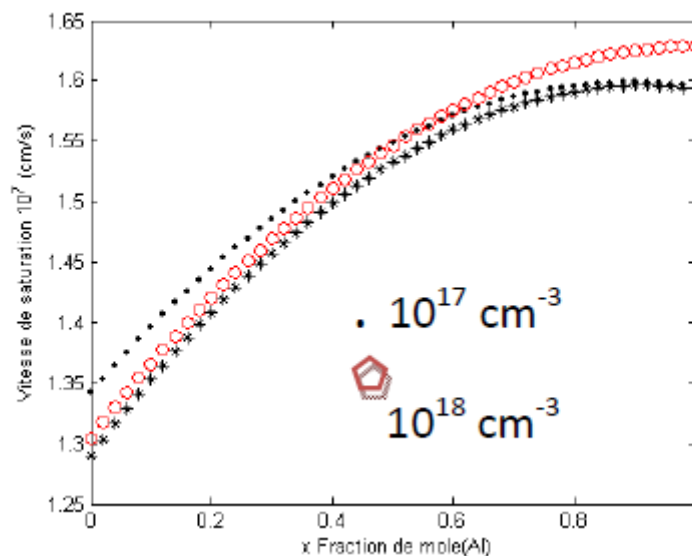


Figure -28- vitesse de saturation des électrons dans  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  en fonction de la fraction de mole Al.

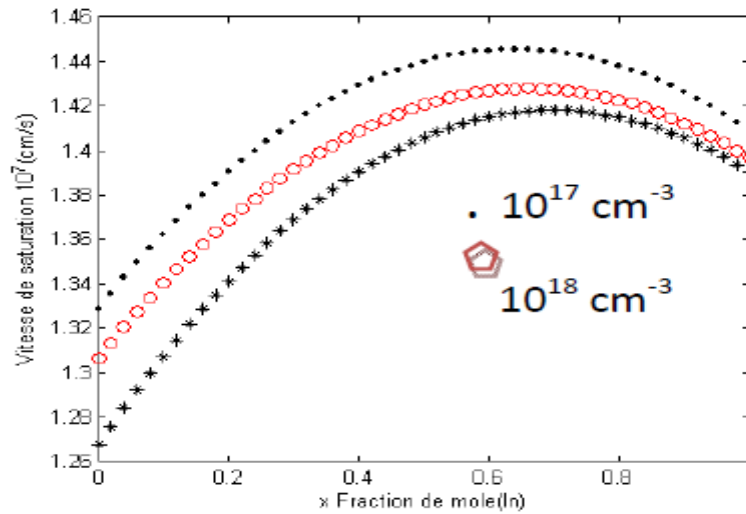


Figure -29- Vitesse de saturation des électrons dans  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , en fonction de la fraction de mole In.

De même pour l'InGaN, la figure nous montre que la concentration de dopage influe peu sur la vitesse de saturation.

#### 1.4. Mobilité

En augmentant la concentration d'Al dans  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  la mobilité des électrons chute comme le montre la figure ci-dessous.

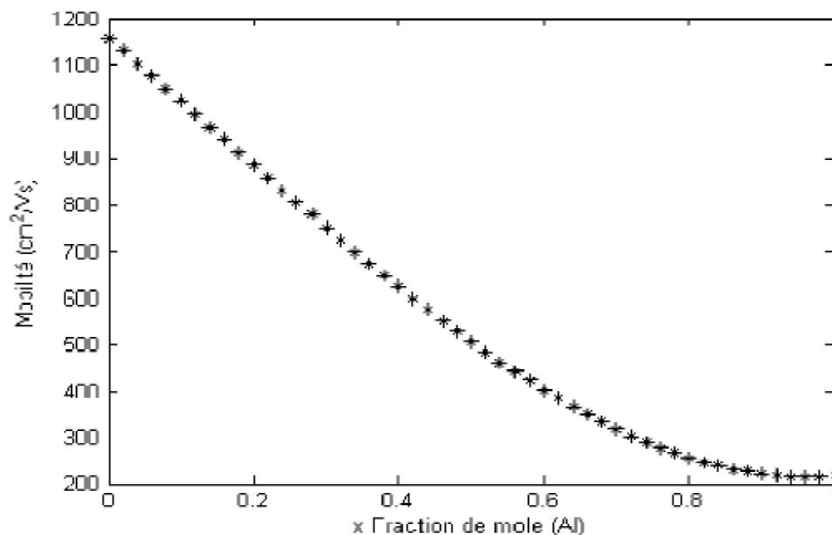


Figure -30- mobilité des électrons dans  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  en fonction de la fraction de mole Al.

La mobilité des porteurs libres dans l'  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  est présentée dans la figure ci-dessous avec  $x$  la concentration du Ga. On observe que la mobilité diminue avec la concentration du Ga. Ce ci est dû à deux facteurs :

- L'augmentation de la masse effective des électrons avec l'augmentation de la concentration du GaN dans l'  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ .
- L'augmentation du phénomène de diffusion des porteurs à cause de l'alliage et des défauts qui augmentent avec la concentration du GaN dans l'  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ .

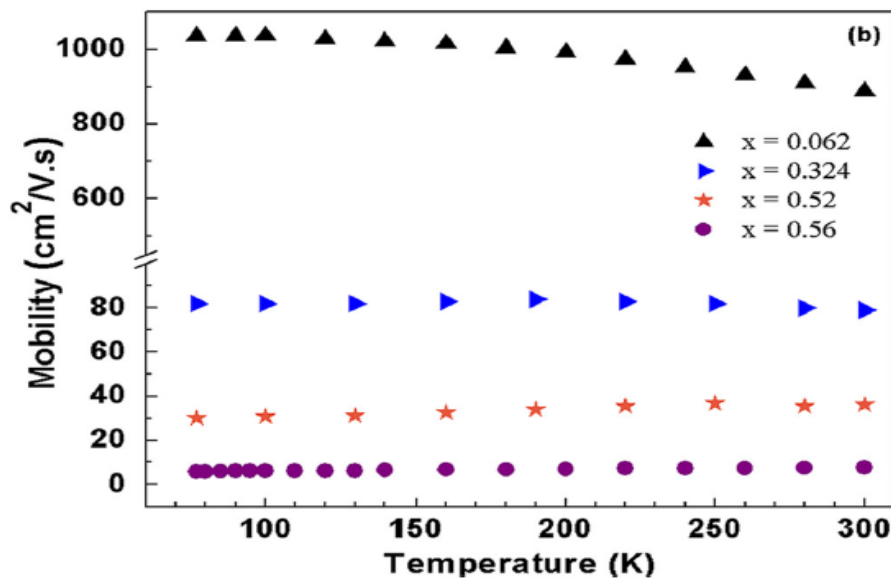


Figure -31-Mobilité des porteurs libres dans  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  en fonction de la température.

On observe également que la mobilité est totalement indépendante de la température.

### 1.5. Indice de réfraction

Les mesures des indices de réfraction des ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  et  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  sont importants pour la conception des diodes électroluminescentes et lasers.

Les 3 figures ci-dessous représentent respectivement les variations des indices de réfraction des structures  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ;  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  et  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$  en fonction de  $x$ .

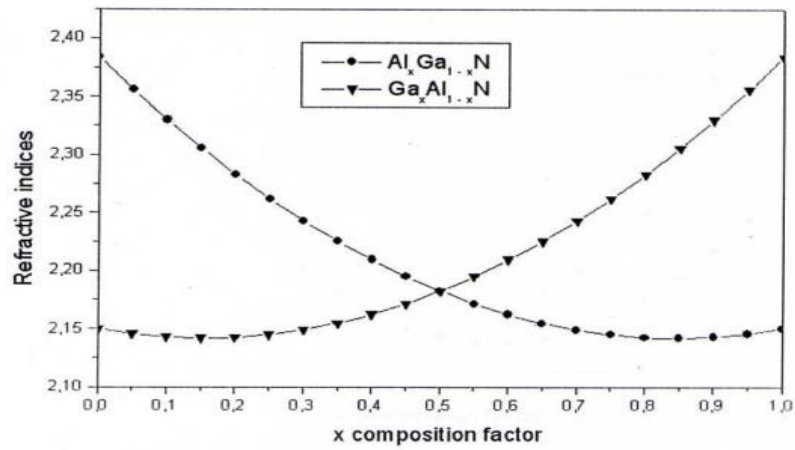


Figure -32- Indices de réfraction des structures  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .

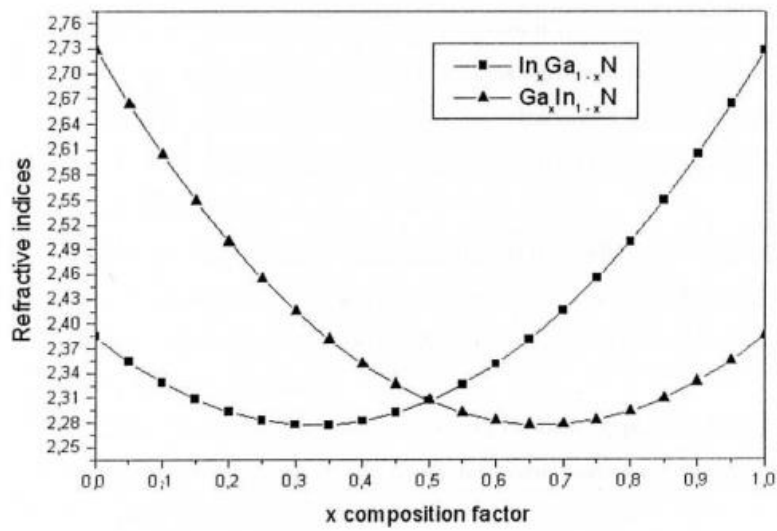


Figure -33- indices de réfraction des structures  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .

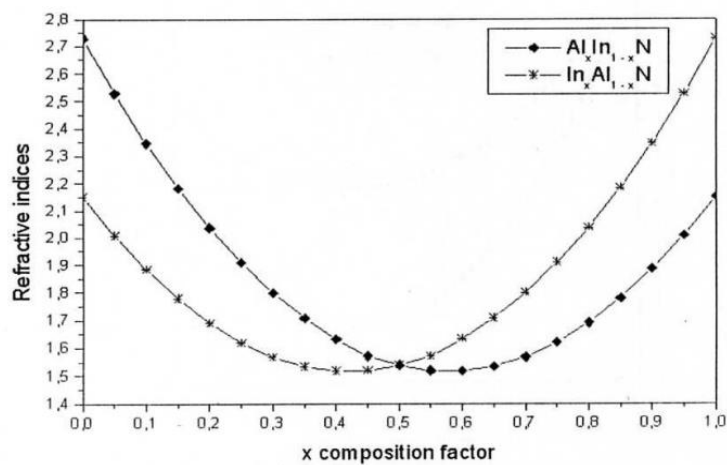


Figure -34- Indices de réfraction des structures  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$ .



### 1.6. Variation de la longueur d'onde émise par $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de $x$

$\text{InGaN}$  est beaucoup étudié pour la fabrication de dispositifs optiques telles que les diodes lasers et les diodes électroluminescentes pouvant émettre la lumière verte et bleue.

Comme le montre la figure ci-dessous ; la longueur d'onde augmente avec la fraction de mole  $\text{In}$ . Elle est de 380 nm pour  $x=0$  et de 660 nm pour  $x=1$ . Elle est inversement proportionnelle à la variation du gap.

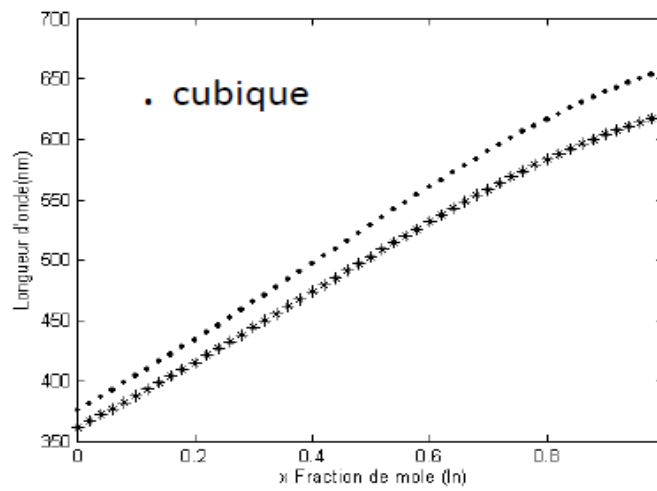


Figure -35- Variations de la longueur d'onde émise par  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  en fonction de  $x$ .

## 2. Hétérostructures en phase hexagonale

En plus du développement des semi-conducteurs massifs, la physique des hétérostructures s'est progressée elle aussi ; permettant de mettre en contact deux semi-conducteurs différents, ce qui génère une discontinuité de potentiel à la fois au niveau de la bande de conduction et de valence. Cette discontinuité est due à l'écart d'énergie de bande interdite.

Lorsque les extrema des bandes de valence et de conduction se situent dans le même matériau c'est-à-dire dans la même région de l'espace, dans ce cas on parle d'hétérostructure de type I. quand les extrema sont spatialement séparés ; l'hétérostructure est dite de type II.

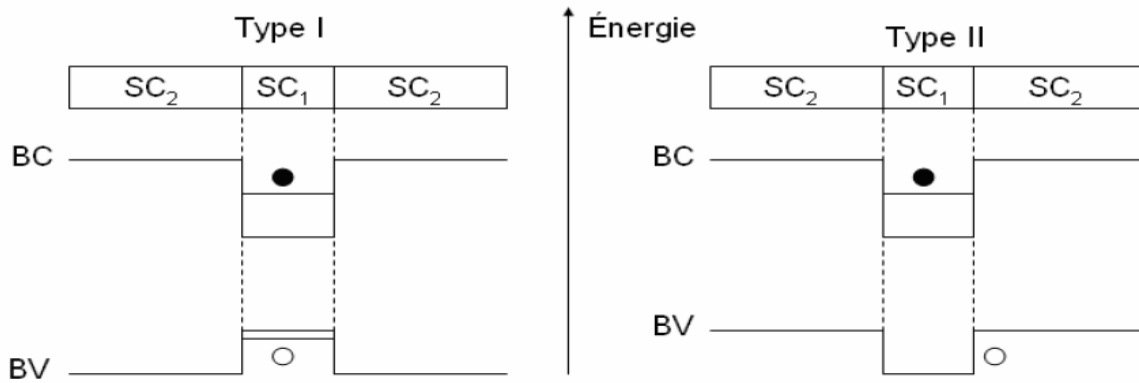


Figure -36- Configuration des bandes de conduction et de valence dans une hétérostructure de type I et de type II.

Ces deux types d'hétérostructure ont des propriétés différentes, dans le cas d'une hétérostructure de type I, les électrons et les trous sont piégés dans le même matériau ; ils sont confinés dans la bande de conduction et de valence du matériau de petit gap, par contre dans une hétérostructure de type II, les électrons et les trous sont spatialement séparés. Dans le premier cas, leurs recombinaisons seront importantes, dans le deuxième cas ces recombinaisons seront moins probables. [5]

Il est possible de réaliser des nanostructures dont une ou plusieurs directions de l'espace sont de taille nanométrique ; on parle de puits quantique (Quantum Wells), de fils quantique (Nanowires) et de boîte quantique (Quantum Dots).

- **Les puits quantiques** (nanostructures 2D): ce type de structure confine les porteurs de charge en une seule dimension. On distingue plusieurs structures de puits quantiques : le simple puits quantique, le double puits quantique, le multi-puits quantique et le super réseau.
- **Les fils quantiques** (nanostructures 1D) : le confinement des porteurs de charge se fait dans deux dimensions.
- **Les boîtes quantiques** (nanostructure 0D): appelées aussi îlots 3D ; ces structures confinent les porteurs de charge dans les trois dimensions de l'espace ; la densité d'états prend la forme d'une série de pics de Dirac.

La réduction des dimensions des semi-conducteurs dans une, deux ou trois directions permet de réduire le nombre de degrés de liberté offerts aux électrons et permet aussi de modifier des paramètres essentiels comme la densité d'états et la bande interdite.

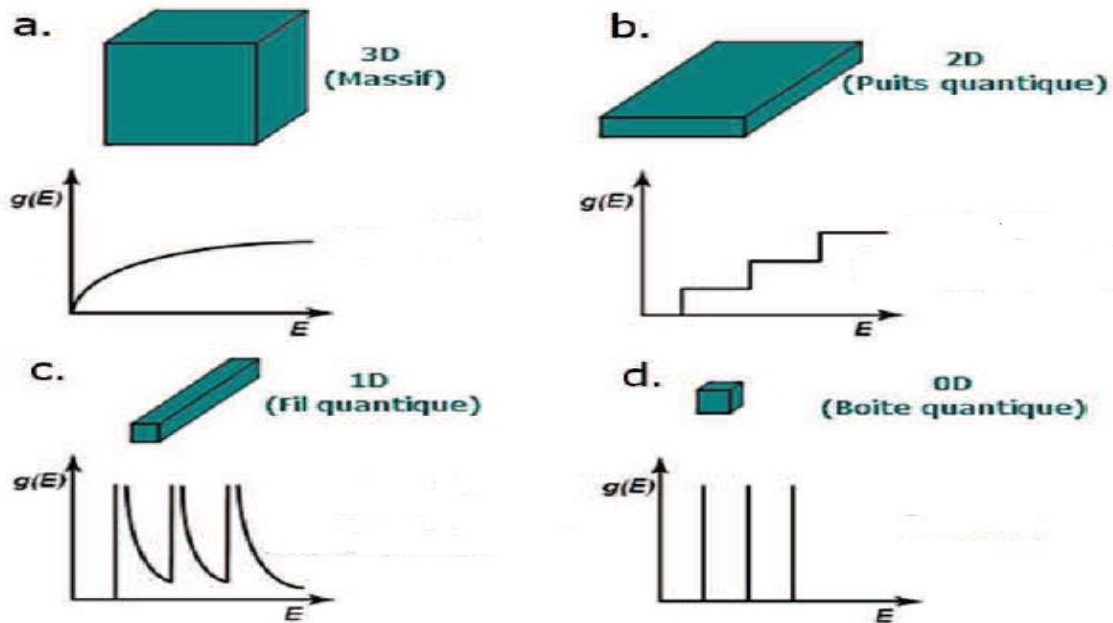


Figure -37- Densité d'états dans différentes configurations de confinement.

Pour qu'une hétérostructure présente de bonnes qualités optiques ; il faut limiter au maximum la formation de dislocations.

La diminution de la taille des nanostructures peut mener à un élargissement de la bande interdite, ce qui conduit à une diminution de la longueur d'onde d'émission des semi conducteurs concernés. [10]

Aujourd'hui, les hétérostructures à base de nitrides permettent la fabrication de nombreux dispositifs tels que les émetteurs de lumière dans le visible et l'ultra-violet et les photodétecteurs ultra-violet aveugle à la lumière visible.

### III. Elaboration des nitrides-III

La fabrication des dispositifs électroniques et optoélectroniques à base de nitrides-III nécessite l'élaboration de couches minces de bonne qualité, pour cela des techniques d'épitaxie bien précises sont utilisées.

- ✓ L'épitaxie est une étape technologique qui consiste à faire croître une couche mince cristalline sur un substrat cristallin utilisé comme germe de croissance.
- ✓ Lorsque deux matériaux épitaxiés ont des paramètres de maille qui ne s'accordent pas, des défauts sont créés à l'interface des deux réseaux, couramment appelés « défauts de misfit », ou encore « mismatch ». [1]

Les deux méthodes de croissance les plus utilisées pour les nitrides-III sont l'épitaxie par jets moléculaire (MBE) et le dépôt en phase vapeur par précurseurs organométalliques (MOCVD). Cette dernière est la plus fréquemment utilisée dans les applications industrielles c'est-à-dire pour la production des composants optoélectroniques destinés à la commercialisation.

L'épitaxie par jets moléculaires présente divers avantages ce qui fait d'elle une technique parfaitement adaptée à la croissance de couches minces. Par exemple ; cette technique assure un meilleur contrôle de la synthèse de nanostructures (puits quantiques ou boîtes quantiques) et permet de réduire au minimum leurs dimensions.

Les substrats les plus utilisés pour l'hétéroépitaxie des nitrides sont le saphir (désaccord de maille avec GaN de 14%), le carbure de silicium (désaccord de maille de 3.4 %) et le silicium (désaccord de maille de -17%).

- **Le saphir** : c'est le substrat le plus répandu pour l'épitaxie des nitrides en orientation [0001] pour la croissance des diodes électroluminescentes (LED). Ses inconvénients majeurs sont sa faible conductivité thermique et son caractère isolant.
- **Carbure de silicium** : en ce qui concerne le SiC, les conditions d'épitaxie sont plus favorables. Le désaccord de maille n'est que 3.5 % avec le GaN, et inférieur à 1% avec l'AlN.
- **Le silicium** : malgré un désaccord de paramètre de maille important, le silicium est un substrat pour l'épitaxie des nitrides sur lequel on fonde beaucoup d'espoirs en raison de ses avantages parmi lesquels : sa disponibilité, sa grande surface, sa haute qualité cristalline et son faible coût.

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques des substrats utilisés pour l'élaboration des nitrides-III.

Paramètres à 300 K	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	Si
▪ Paramètre de maille (Å)	4.765	4.359	5.431
▪ Densité du matériau (g.cm <sup>-3</sup> )	3.98	3.2	2.329
▪ T fusion (°C)	2030	2793	1410
▪ Conductivité thermique (w.cm <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0.23	3.7	1.56
▪ Indice de réfraction n	1.75	2.7	3.42
▪ Le gap E <sub>g</sub> (eV)	8.1 à 8.6	2.36	1.12
▪ La transmittance T (%)	85 à 90	85 à 90	50 à 55
▪ Domaine de transmission (µm)	0.2 à 5	0.4 à 0.8	1.5 à 6
▪ Résistivité électrique (Ω.cm)	> 10 <sup>11</sup>	10 <sup>2</sup> à 10 <sup>3</sup>	>50. 10 <sup>3</sup>

## IV. Applications

Dans les dernières années ; les recherches sur les nitrides-III ont attiré une attention remarquable et acquis une position importante dans la science et la technologie des composants à base de semi-conducteurs en raison de la variété d'application de ces matériaux. Ces matériaux sont désormais couramment utilisés dans les diodes électroluminescentes vertes, bleues et ultraviolettes ainsi que dans les diodes laser et les détecteurs ultraviolets. En parlant des diodes laser ; des enjeux importants que ce soit du côté économique ou scientifique ont entraîné une compétition pour obtenir une longueur d'onde toujours plus courte et des seuils sans cesse plus bas. Mais la difficulté du dopage des alliages à forte teneur en aluminium (qui sont indispensables pour l'UV lointain) constitue un verrou technologique complexe.

Les principales applications des nitrides d'éléments III dans le domaine de l'optoélectronique sont :

- **Les diodes électroluminescentes émettant dans le violet, le bleu, le vert, l'ambre et l'ultraviolet :**

Les diodes électroluminescentes représentent l'une des applications majeures du point de vue commercial pour cette famille de semi-conducteur.

Les DEL à base de nitrides-III sont des dispositifs non toxiques présentant des caractéristiques améliorées ; ces dernières sont plus robustes, ont une durée de vie plus longue, présentent une capacité énergétique plus importante et diffusent moins de chaleur.

L'utilisation des semi conducteur du type III-nitrides pour la fabrication des LEDs permet d'atteindre les domaines de courtes longueurs d'onde pour l'émission de lumière bleue, violette et ultra-violette qui étaient inaccessible jusqu'à présent aux autres semi conducteurs. [14]

Le tableau ci-dessous compare les caractéristiques des DELs à base de nitrides-III avec les DELs conventionnelles.

DEL	Matériau	Pic d'émission (nm)	Intensité lumineuse (mCd)	Puissance ( $\mu$ W)	Rendement Quantique (%)
Rouge	GaAlAs	660	1790	4855	12,83
Verte	GaP	555	63	30	0,07
Verte	InGaN	500	2000	1000	2,01
Bleue	SiC	470	9	11	0,02
Bleue	InGaN	450	1000	1200	2,16
Bleue	InGaN	450	2500	3000	5,45

La réalisation des DELs UV s'est faite vers les basses longueurs d'onde depuis les DELs à base d'InGaN/GaN en passant par les structures GaN/AlGaN, puis AlGaN/AlGaN jusqu'aux diodes ne comprenant plus que de l'AlN. Il est ainsi possible d'émettre sur toute la gamme de longueurs d'onde entre 400 nm ( $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ ) jusqu'à 210 nm (AlN). [15]

Les premières LED bleues ont été réalisées sur la base de doubles hétérojonctions de type InGaN/ AlGaN.

La figure ci-dessous représente la base de la structure type qui a été utilisée pour réaliser des diodes électroluminescentes bleues, vertes et jaunes à simple puits quantique de InGaN. En ce qui concerne la diode verte, la couche active est un puits de  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$  non dopée de 30 Å d'épaisseur, en sandwich entre une barrière de  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  de 1000 Å d'épaisseur dopée p au magnésium et une barrière de GaN de 4  $\mu\text{m}$  dopée n au silicium. La diode est épitaxiée sur un substrat de saphir à travers une couche tampon de GaN de 300 Å d'épaisseur.

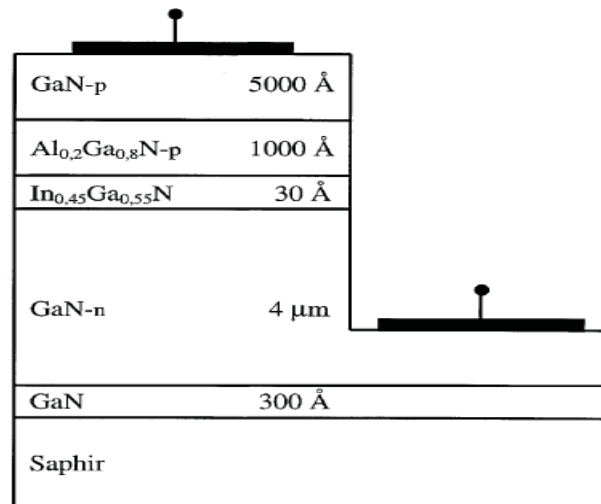


Figure-38- Structure type d'une LED.

### - Les lasers bleus

Comme pour les DELs, la première démonstration des diodes lasers (DL) à base de nitrides a été donnée en 1996 par le groupe de NAKAMURA. Ces diodes ont été réalisées sur la base de structures à multi-puits quantiques, sur substrat saphir, en utilisant l'alliage InGaN comme couche active. (Voir figure ci-dessous).

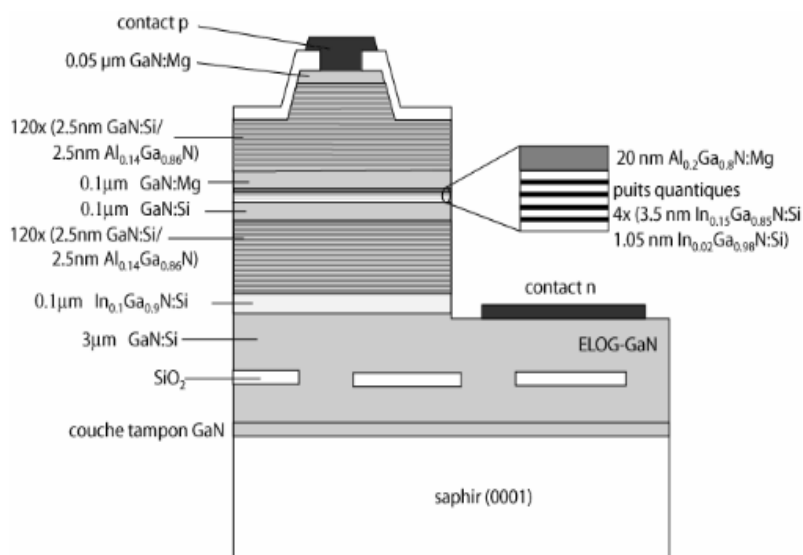


Figure -39- Structure du laser bleu à multi-puits quantiques de InGaN.

Les composants à base de GaN, particulièrement ceux réalisés par la société Nichia ( Japon ) ; sont actuellement les plus performants dans le domaine des diodes émettrices de lumière. [3]

Bien que les nitrides permettent d'émettre de l'ultraviolet extrême au proche infrarouge, seuls les LEDs et diodes lasers dont la zone active est constituée d'InGaN à faible teneur en InN –correspondant à une émission dans la gamme 350-500 nm – ont actuellement un rendement dépassant les quelques pourcents. [16]

#### - Les photodétecteurs dans l'ultraviolet

La photodiode est un composant qui va transformer un rayonnement lumineux en un signal électrique.

La large bande interdite, la bonne stabilité chimique, la résistance aux effets des radiations et la bonne conductivité thermique des nitrides présentent un grand intérêt pour la réalisation de dispositifs de détection dans l'UV. [10]

En effet, pour réaliser des photodétecteurs ultraviolets insensibles à la lumière visible et du proche UV, les alliages  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , dont le gap direct est dans la gamme 3.42 eV ( $x=0$ ) – 6.2 eV ( $x=1$ ), sont bien adaptés, ce qui ouvre la voie à de nombreuses applications industrielles.

Des photodiodes PIN à GaN ont été réalisées par épitaxie sur saphir. La structure de la photodiode et sa réponse spectrale sont représentées sur la figure ci-dessous.

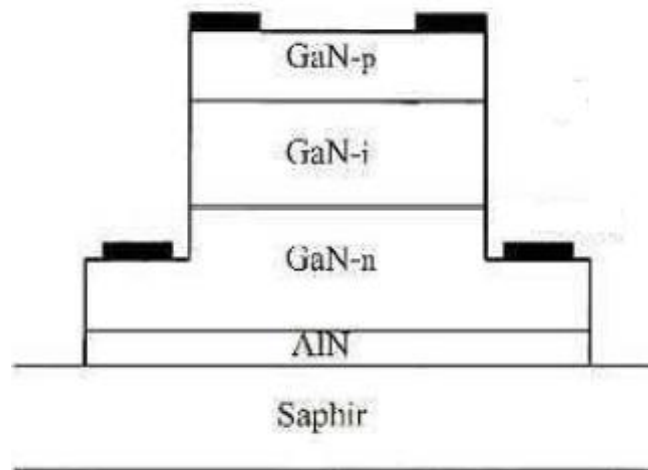


Figure -40- Structure d'une photodiode PIN à base de GaN.



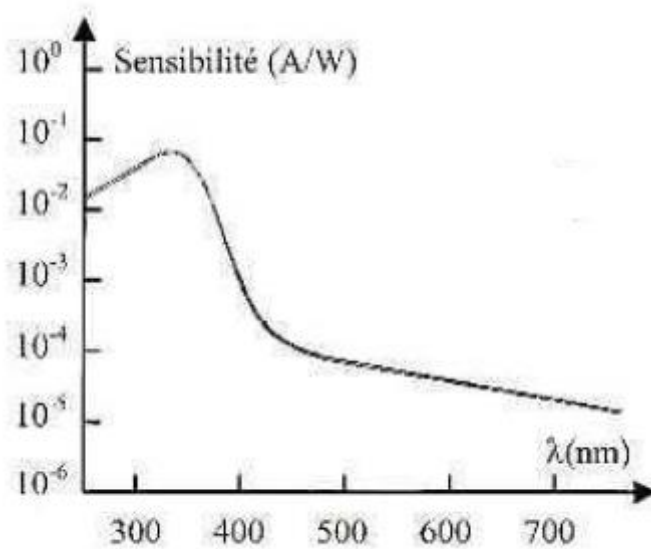


Figure -41- Réponse spectrale d'une photodiode PIN à base de GaN.

## Conclusion

Des perspectives très prometteuses s'offrent aux semi-conducteurs de type III-Nitrides en raison de leurs propriétés remarquables. Ces derniers sont des composés robustes mécaniquement, et presque inertes chimiquement, ce qui les rend particulièrement stables à haute température et dans des environnements hostiles. En contre partie ; cette stabilité complique d'une part leurs dopages et d'autres part les différentes étapes des processus d'élaboration des composants.

Au cours de ce chapitre nous avons rappelé les principales propriétés des alliages binaires soit le GaN, AlN et InN ainsi que les ternaires AlGaN et InGaN. Nous avons ainsi mis en évidence leur énorme potentiel dans le domaine de l'optoélectronique pour la réalisation de dispositifs utilisés en conditions difficiles.

Nous avons ensuite évoqué les différentes méthodes permettant l'élaboration de ces semi-conducteurs ainsi que les différents substrats utilisés.

Et pour terminer ; nous avons cité les principales applications des nitrides-III spécialement dans le domaine de l'optoélectronique. Les progrès récents dans la croissance et la compréhension de la physique de ces semi-conducteurs a permis de les utiliser pour la fabrication des diodes électroluminescentes, des diodes lasers ainsi que les photodétecteurs.

## Références chapitre 4

- [1] Macho ANANI- Etude de conception d'un guide onde à base de semi-conducteur de type III-nitrides- Thèse de Doctorat- Université Djilali Liabés- 2007
- [2] Vanessa GORGE- caractérisations des matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrides des éléments III-V- Thèse de Doctorat- Université Paris-sud 11- 2012.
- [3] Tewfik BAGHDADLI- Etude des propriétés structurales et électroniques de nouveaux matériaux à base d'alliages III-N pour l'optoélectronique- Thèse de Doctorat- 2009.
- [4] Zohra BENZART- Qualification des nitrides de Gallium pour les dispositifs optoélectroniques : Application aux diodes électroluminescentes bleues- Thèse de Doctorat- Université Tunis- 2006.
- [5] Henry Mathieu, Hervé Fanet- Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques- Dunod- 2009.
- [6] B.N.Pantha, Sedhain, J.Li, J.Y.Lin, H.X.Jiang- Electrical and optical properties of p-type InGaN- Texas Tech university-2009.
- [7] Stéphane FANGET- Matériaux et hétérostructures à base de nitrides d'éléments III en phase cubique et hexagonale pour l'optoélectronique- Thèse de Doctorat- Université de Lyon- 2002.
- [8] Olivier MENARD- Développement de briques technologiques pour la réalisation de diodes schottky sur nitride de Gallium- Thèse de Doctorat- Université de Tours- 2010.
- [9] Fabien GUILLOT- Développement de nanostructures à base de semi-conducteurs III-nitrides pour l'optoélectronique infra-rouge- Thèse de Doctorat- Université de Grenoble- 2007.
- [10] Zakaria BOUCHKOUR- Croissance et caractérisation de nanostructures de nitrides d'aluminium par PECVD- Thèse de Doctorat- Université de Limoges- 2013.
- [11] Ihsen Yasser TALEB- Etude des propriétés de quelques nitrides : application aux photodiodes- Mémoire de Magister- Université de Tlemcen- 2012.
- [12] Nadia BACHIR DAHMANI- Etude des composés ternaires à base de nitrides en utilisant la méthode de simulation de Monte Carlo- Thèse de Doctorat- Université de Tlemcen- 2010.
- [13] Raphael BAILLOT- Méthodologie d'analyse de défaillance pour l'évaluation de la fiabilité de diodes électroluminescentes GAN- Thèse de Doctorat- Université de Bordeaux- 2011.
- [14] Franck OMNES- Couches minces de nitrides d'éléments III et de diamant : de la croissance par CVD des semi-conducteurs de grand gap aux applications- Mémoire d'habilitation des recherches- Université de Grenoble- 2010.
- [15] Vincent FELLMANN- Croissance et caractérisations structurales et optiques d'hétérostructures de nitrides d'éléments III émettant dans l'UV- Thèse de Doctorat- Université de Grenoble- 2012.
- [16] Gabriel TOURBOT- Croissance par épitaxie par jets moléculaires et détermination des propriétés structurales et optiques de nanofils InGaN/GaN- Thèse de Doctorat- Université de Grenoble-2012.
- [17] Fazia BOUARABA- Etude d'une LED à base d'InGaN pour l'émission de la lumière blanche- Mémoire de Magister- Université de Tizi Ouzou- 2012.

- [18] Laurent NEVOU- Emission et modulation intersousbande dans les nanostructures de nitrides- Thèse de Doctorat- Université Paris-sud11- 2008.
- [19] Georges RAKOTONANAHARY- Spectroscopie des transitions excitoniques dans des puits quantiques GaN/AlGaN- Université Blaise Pascal-Clermont II- 2012.
- [20] Aurélien GAUTHIER-BRUN – Growth and Characterization of nitride-based semiconductor materials application to high speed photodiodes- Thèse de Doctorat- Université de Lille- 2012.
- [21] Fabrice ENJALBERT- Etude des hétérostructures semi-conductrices III-nitrides et application au laser UV pompé par cathode à micropointes- Thèse de Doctorat- Université de Grenoble- 2004.
- [22] Kaled BENATMANE- Etude de lasers à base de semi-conducteurs III-V- Mémoire de Magister- Université de Batna- 2011.
- [23] Salam SAKR- Dispositifs intersousbandes à base de nitrides d'éléments III du proche infrarouge au THz- Thèse de Doctorat- Université Paris-sud- 2012.
- [24] Claire PINQUIER- étude RAMAN de semi-conducteurs nitrides couches minces et nanostructures- Thèse de Doctorat- Université de Toulouse- 2007.
- [25] Arantxa VILALTA-CLEMENTE- Structure des couches D'InN et d'alliages (In,Al)N- Thèse de Doctorat- Université de CAEN BASSE-NORMANDIE- 2012.
- [26] Colin-Nadeau Brosseau- Dynamique de recombinaison dans les puits quantiques InGaN/GaN- Thèse de Doctorat- Université de Montréal- 2009.
- [27] Mostefa TEMOUM- Etude et conception d'une chaîne de transmission optique à base de semi conducteur de type III-nitrides- Thèse de magister-UDL-2012.

# Chapitre 5

## Calcul des indices effectifs.

## Introduction

Dans une structure guidante, l'énergie lumineuse reste piégée à l'intérieur de la couche guidante (film), obéissant à une condition très importante. Cette condition énonce le fait que pour qu'un rayon lumineux puisse se propager dans le film il faut que les réflexions de ce rayon soit totales sur les parois du film. (voir chapitre 1)

Nous obtenons ainsi une relation prenant en considération tous les paramètres influençant la propagation de cette onde dans un milieu particulier, c'est la relation de dispersion. La résolution de cette équation nous donne **l'indice effectif**.

**L'indice effectif** est un indice de réfraction qui ne dépend pas seulement de la longueur d'onde mais aussi du mode dans lequel se propage la lumière. Il dépend de la structure du guide d'onde, principalement de ses dimensions physiques qui restreignent la propagation de la lumière en introduisant le confinement optique.

Pour cette raison, une méthode spécifique a été développée pour évaluer l'indice effectif des guides d'ondes à base de semi-conducteur de type III-nitrides plus précisément à base de  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , dans le but de connaître le comportement de la lumière à travers ces derniers.

Ces semi-conducteurs, tel que nous l'avons dit possèdent des gaps d'énergie à transition directe, ce qui les rend très utiles en optoélectronique. Les gaps d'énergie de ces composants couvrent une très grande plage de longueurs d'ondes, allant de l'ultraviolet à l'infrarouge.

## 1. Principe de la méthode de l'indice effectif

Notre travail consiste à examiner un guide plan rectangulaire afin d'étudier ses caractéristiques physiques. C'est une structure guidante d'indice de réfraction  $n_1$  enterrée dans un substrat d'indice de réfraction  $n_2$  plus petit que  $n_1$  pour assurer la condition de la propagation de la lumière.

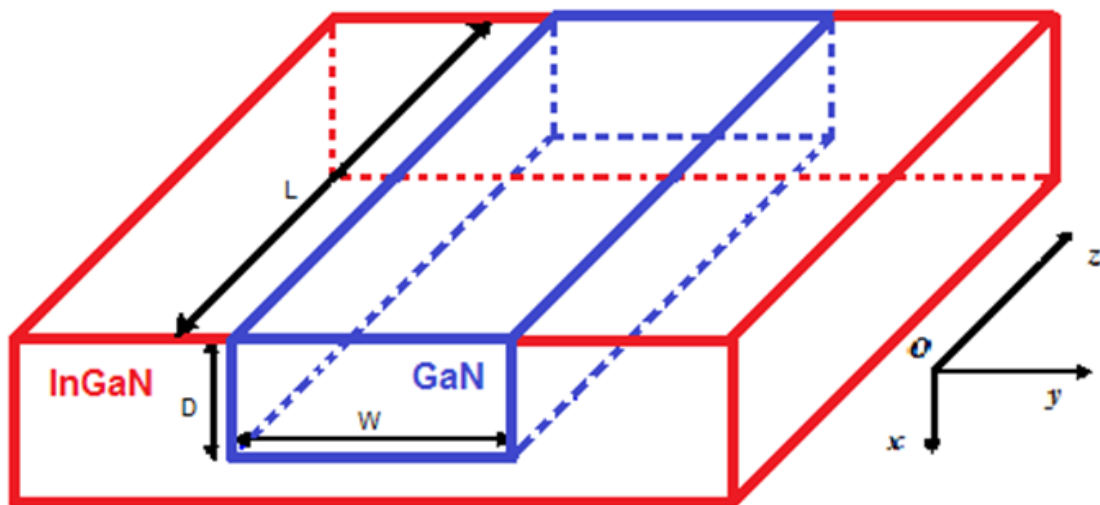


Figure -1 -Microguide optique GaN sur InGaN.

Notons :

- $L$  : la longueur du guide.
- $W$  : la largeur du guide.
- $D$  : Profondeur du guide.

Cette structure est attaquée par un faisceau dont la configuration du champ dépend généralement de trois coordonnées  $x, y$  et  $z$ , parce que l'indice de réfraction d'une telle structure dépend généralement de ces trois coordonnées  $x, y$  et  $z$ . La lumière va être confinée dans le cœur à base de GaN. Elle va se propager le long de cette structure suivant la direction  $z$  tout en restant à l'intérieur de la structure GaN.

Le microguide présenté dans -la figure 1- est une structure à trois dimensions, l'utilisation de la méthode de l'indice effectif permet de l'approximer par un guide plan à deux dimensions seulement avec un indice effectif  $n_e$ . Cela va rendre la transformation de FOURIER accessible pour permettre de résoudre l'équation de propagation en utilisant des méthodes numériques, tel que la BPM.

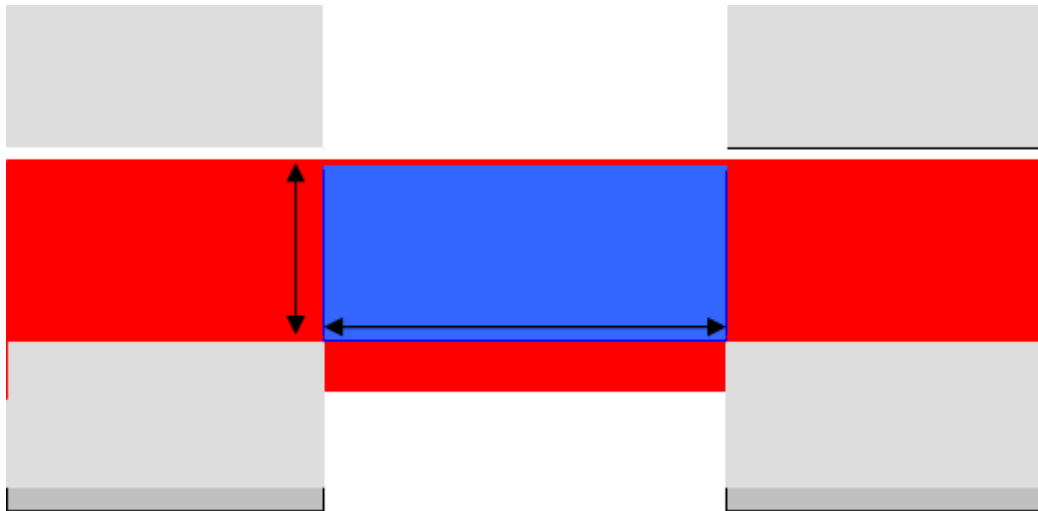


Figure -2 - Microguide vu du face, ou du côté de l'onde incidente.

Les zones en gris ne vont pas être prises en considération dans les calculs vu qu'elles n'influent pas sur le calcul de l'indice effectif.

**Etape 1 :** On fait tendre la dimension du film «  $W$  » vers l'infinie.

Le guide plan obtenu est présenté dans la figure ci-dessous. Ainsi, le calcul de son indice effectif pour les différents modes propagés sera facile.

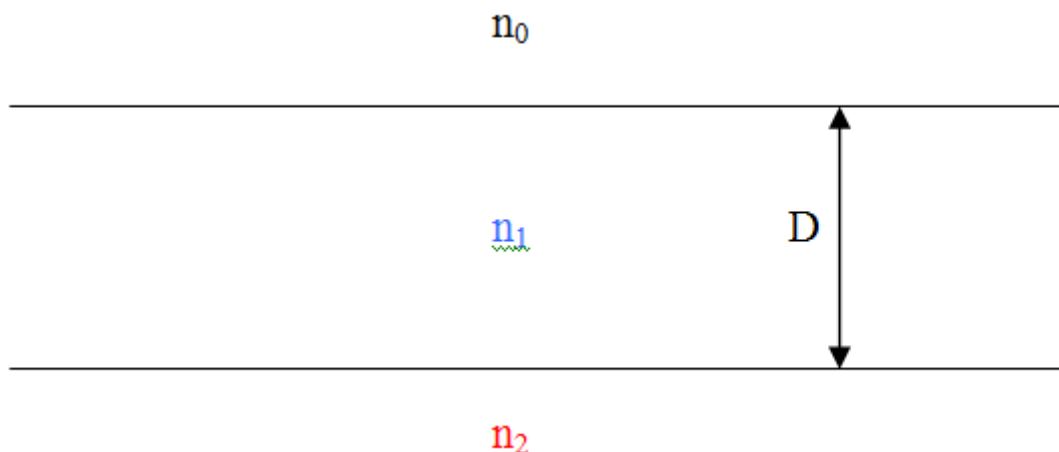


Figure -3 - Structure en guide plan horizontal.

**Etape 2 :** On fait tendre la hauteur «  $D$  » du microguide vers l'infini et on considère l'indice effectif obtenu (dans la première étape) comme étant l'indice du guide plan vertical, comme le montre la figure suivante.



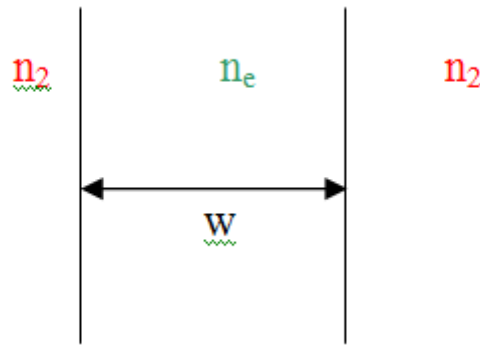


Figure -4 - structure en guide plan vertical.

Le calcul de l'indice effectif de ce dernier guide plan donne l'indice effectif du guide original de la figure.

Cette méthode de calcul peut être appliquée et pour les structures à saut d'indice et pour les structures à gradient d'indice.

La méthode de l'indice effectif ou EIM permet alors de remplacer un guide d'onde linéaire 3D schématisé à la figure -1- par un guide planaire équivalent où le profil d'indice à déterminer ne dépend que des coordonnées  $y$  et  $z$ , sans perte significative d'informations.

Par conséquent, l'utilisation de cette méthode de calcul repose sur certaines conditions. La condition la plus importante est que la méthode de l'indice effectif ne peut être appliquée que lorsque le champ électromagnétique peut être exprimé avec une séparation de variable de sorte que le champ électrique peut être décomposé comme suit :

$$\Phi(x, y, z) = f(x) \cdot g(y) \cdot e^{j(\omega \cdot t - \beta \cdot z_0)} \quad (1)$$

Cela donne ; en 2D :

$$\Phi(y, z_0) = g(y) \cdot e^{j(\omega \cdot t - \beta \cdot z_0)} \quad (2)$$

Ainsi, la recherche de l'indice effectif d'une structure réelle, revient à résoudre l'équation de dispersion (condition de phase). Cette équation apparaît comme suit :

- Pour les modes **TE** :

$$k_0 \cdot h \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = \arctg \left[ \frac{n_e^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_e^2} \right]^{\frac{1}{2}} + \arctg \left[ \frac{n_e^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_e^2} \right]^{\frac{1}{2}} + m \cdot \pi. \quad (1-a)$$

- Pour les modes **TM** :

$$k_0 \cdot h \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = \arctg \frac{n_1^2 \left[ \frac{n_e^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_e^2} \right]^{\frac{1}{2}}}{n_0^2} + \arctg \frac{n_1^2 \left[ \frac{n_e^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_e^2} \right]^{\frac{1}{2}}}{n_0^2} + m \cdot \pi. \quad (1-b)$$

Avec :

**k** : le numéro du mode,  $\mathbf{k}_0 = 2\pi / \lambda_0$ , vecteur d'onde, en sachant que  $\lambda_0$  est la longueur d'onde du faisceau incident et **h** est l'épaisseur du film.

Prenons, maintenant l'équation de dispersion (1) précédente.

Sous la forme :  $f(n_e) = 0$ , cette équation deviendra :

$$k_0 \cdot h \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} - \arctg \left[ \frac{n_e^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_e^2} \right]^{\frac{1}{2}} + \arctg \left[ \frac{n_e^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_e^2} \right]^{\frac{1}{2}} + m \cdot \pi = 0. \quad (3)$$

Cela mène à une recherche de zéros.

La procédure habituelle et convenable est que si l'on ait une équation de la forme  $f(n_e) = 0$ , et que si l'on ait choisit deux valeurs  $n_{e1}$  et  $n_{e2}$ , telles que :

1 - « f » reste monotone sur  $[n_{e1}, n_{e2}]$ , ce qui revient à dire que  $f(n_e)$  est croissante, décroissante ou nulle dans cet intervalle, elle est donc monotone.

2 -  $f(n_{e1}) \cdot f(n_{e2}) < 0$ , ce qui implique le fait que la dérivée de la fonction  $f(n_e)$  change de signe dans l'intervalle  $[n_{e1}, n_{e2}]$ .

Alors la suite :

$$n_{e_{n+2}} = \frac{n_{e_{n+1}} \cdot f(n_e) - n_{e_n} \cdot f(n_{e_{n+1}})}{f(n_{e_n}) - f(n_{e_{n+1}})} \quad (4)$$

a pour limite «  $n_e$  », telle que  $f(n_e) = 0$  lorsque  $n$  tend vers l'infini.

Reprenons notre équation de dispersion aménagée :

**Première condition** : soit  $f'(n_e)$ , la dérivée de  $f(n_e)$  par rapport à  $n_e$  :

$$f'(n_e) = - \frac{n_e}{(n_1^2 - n_e^2)^2} \cdot \left( k_0 \cdot h + \frac{1}{(n_1^2 - n_e^2)^2} + \frac{1}{(n_1^2 - n_e^2)^2} \right) \quad (5)$$

Il apparaît évident que  $f'(n_e)$  soit toujours négative dans  $[n_1, n_2]$ , parce que  $n_1$  est toujours plus grand que  $n_e$ , elle est donc monotone .

**Deuxième condition** : en partant des valeurs  $n_{e1} = n_1$  et  $n_{e2} = n_2$ , l'on satisfait obligatoirement à la condition que  $f(n_1) \cdot f(n_2) < 0$ , pour la même raison énoncée.

La procédure que nous avons choisie, apparaît donc adéquate pour la résolution de notre problème.

Notre but sera concrétisé lorsque :

$$n_{e_{n+2}} = \frac{n_{e_{n+1}} \cdot f(n_e) - n_{e_n} \cdot f(n_{e_{n+1}})}{f(n_{e_n}) - f(n_{e_{n+1}})}, \text{ sera telle que : } \left| n_{e_{n+2}} - n_{e_{n+1}} \right| \leq \varepsilon .$$

où «  $\varepsilon$  » est la précision voulue.

Le nombre, maximal, de modes pouvant être propagés par la structure étudiée est donné par les formules :

- Modes TE

$$m_M = \frac{k_0 \cdot h \cdot (n_1^2 - n_2^2) - \arctg \left[ \frac{n_2^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_2^2} \right]^{\frac{1}{2}}}{\pi} \quad (6-a)$$

- Modes TM

$$m_M = \frac{k_0 \cdot h \cdot (n_1^2 - n_2^2) - \arctg \frac{n_1^2}{n_0^2} \left[ \frac{n_e^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_2^2} \right]^{\frac{1}{2}}}{\pi} \quad (6-b)$$

## 2. Programme de calcul de l'indice effectif

L'utilisation d'un programme informatique est plus que nécessaire pour permettre le calcul des différents indices effectifs.

On commence le programme de calcul de l'indice effectif d'un guide plan par l'introduction d'une entrée de données :

- L'indice du superstrat qui est généralement l'air  $n_0 = 1,00$ .
- L'indice de la couche guidante (film) noté  $n_1$ .
- L'indice du substrat noté  $n_2$ .
- Profondeur (épaisseur) du film notée  $h$ .
- La longueur d'onde du faisceau incident  $\lambda_0$ .
- Précision du calcul.

Le programme calcule ensuite la constante de propagation de l'onde plane  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ .

Il y a ensuite un choix entre les modes TE et les modes TM, ceci en fonction du déphasage  $\varphi_{10}$  qui diffère d'un terme  $n_1^2/n_0^2$  dans le mode TM par rapport au mode TE.

Parr la suite, le programme calcule immédiatement le nombre maximal de modes qui se propagent dans le guide. Ce nombre dépend surtout de l'indice de la structure guidante, de celui du substrat et des dimensions du guide. Ce nombre permet d'avoir

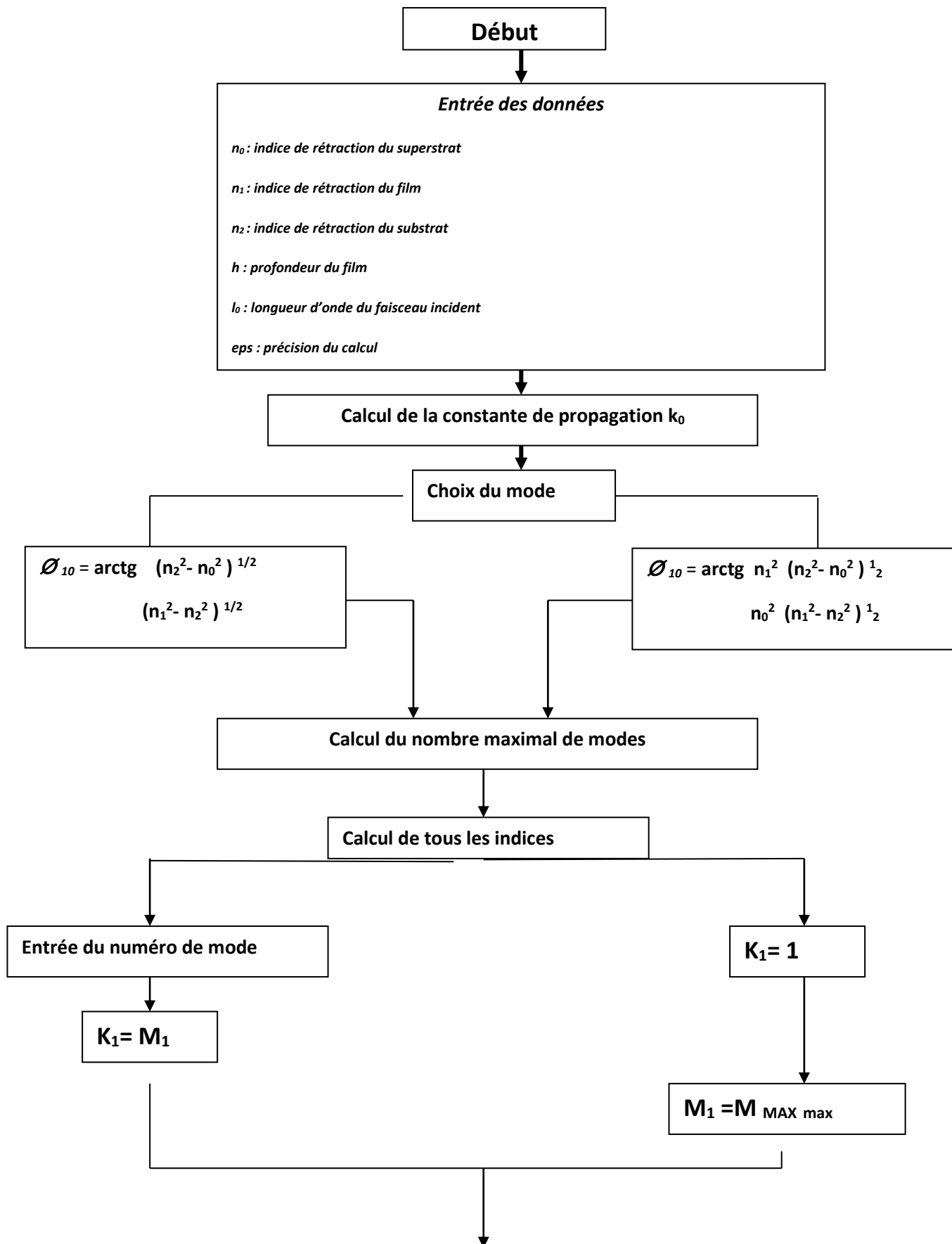
une idée sur les capacités que possède la structure proposée pour le guidage de l'onde dont on dispose.

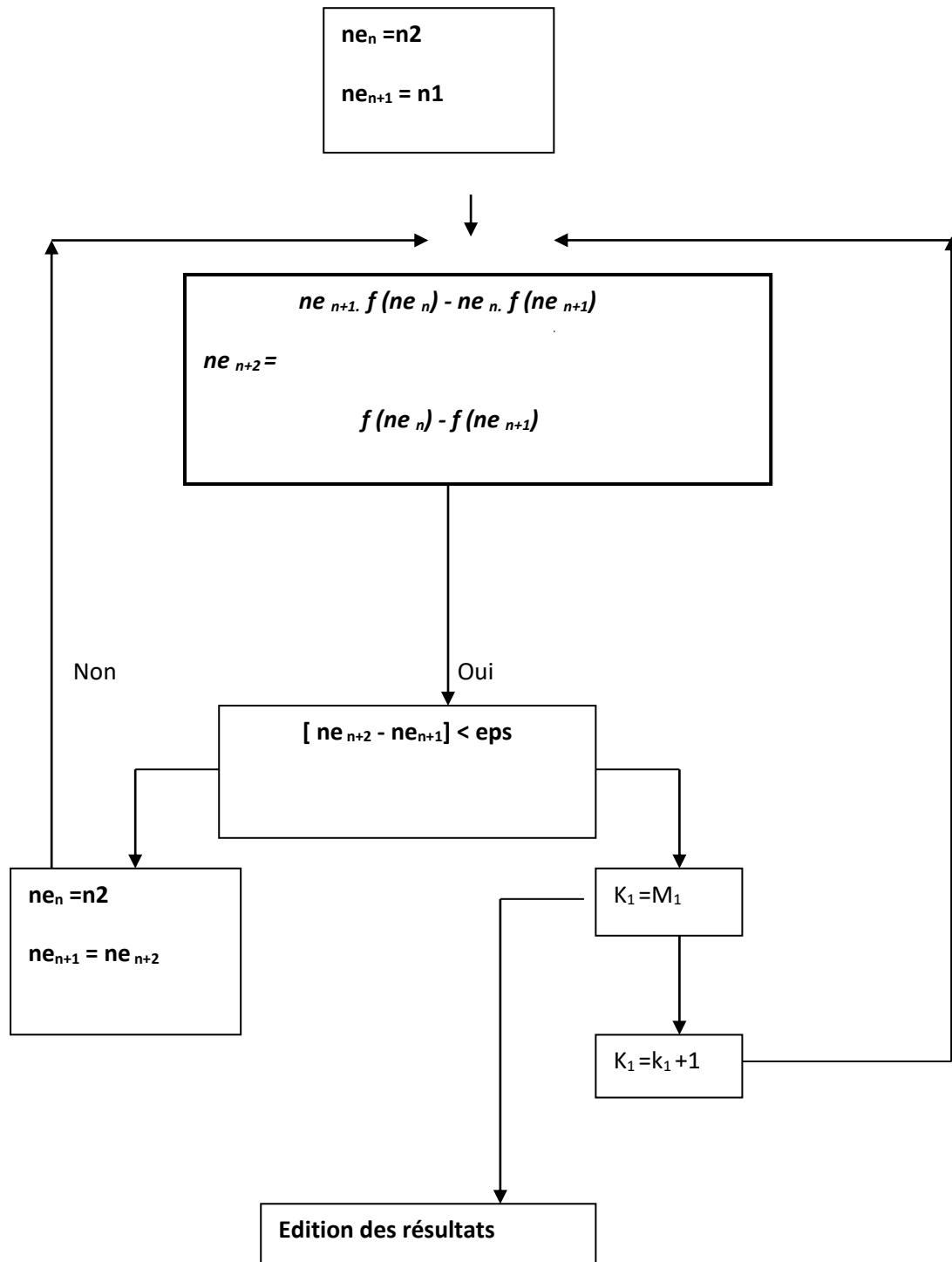
L'étape suivante du programme ; est le choix entre le calcul de tous les indices effectifs que possède le guide, ou d'un seul seulement en indiquant le numéro du mode voulu.

Les deux conditions sur la fonction  $f(n_e)$  nous permettent de la développer numériquement. On calcule donc  $n_{n+2}$  suivant la formule (4) précédente.

Lorsque l'expression  $(n_{n+2} - n_{n+1})$  devient égale ou inférieure à la précision donnée, il y a affichage des résultats et arrêt du programme.

L'organigramme général de ce programme est confiné dans es deux pages suivantes.





### 3. Résultats

L'objectif de ce travail était de calculer les indices effectifs d'une structure guidante du type GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (avec  $x = 0,38$  soit In<sub>0,38</sub>Ga<sub>0,62</sub>N) ayant comme caractéristiques :

- L'indice de réfraction du superstrat  $n_0=1,00$ .
- L'indice de réfraction du film  $n_1= 2,484$
- L'indice de réfraction du substrat  $n_2= 2,15$
- La longueur d'onde  $\lambda= 359\mu\text{m}$

Dans un premier temps, on a calculé les indices effectifs du guide plan en considérant l'indice du superstrat égale à 1 (air), quand à l'indice du guide d'onde GaN qui est égale à 2,484 en utilisant une longueur d'ondes de 359  $\mu\text{m}$ . La quasi-totalité de l'énergie des ondes guidées électromagnétiques était confinée dans les modes fondamentaux appelés TE<sub>0</sub> et TM<sub>0</sub>. Chaque mode possède son indice effectif correspondant à une vitesse différente, inférieure à la fondamentale. Ainsi, l'objectif principal, pour concevoir un guide d'onde optique, est d'obtenir un seul mode guidé, correspondant au fondamental.

Dans une deuxième étape, on a évalué les indices effectifs en modifiant la **largeur** du guide d'onde. Prenant une profondeur de **1  $\mu\text{m}$** , on a initialement calculé l'indice effectif du guide planaire et trouvé :

- Un indice effectif de **neTE<sub>0</sub> = 2.465** correspondant au mode électrique fondamental.
- Un autre indice effectif **neTM<sub>0</sub> = 2.460** lié au mode magnétique fondamental.

La raison du choix d'une profondeur fixe et d'une largeur variée est qu'il est encore plus facile de modifier la largeur dans le processus de croissance que l'épaisseur de croissance épitaxiale.

Par la suite, afin de calculer les indices effectifs du microguide, nous avons pris :  **$n_0 = n_2 = 2,16$**  et l'indice du film dans ce cas serait l'indice effectif du guide plan obtenu précédemment.

Pour une meilleure intégration, on a pris une profondeur de seulement **0,1 $\mu\text{m}$**  et trouvé une différence importante dans les indices effectifs.

En utilisant plusieurs largeurs du guide d'ondes considéré, les deux modes TE transversal électrique et TM transversal magnétique ont été impliqués comme le montre les figures ci-dessous.



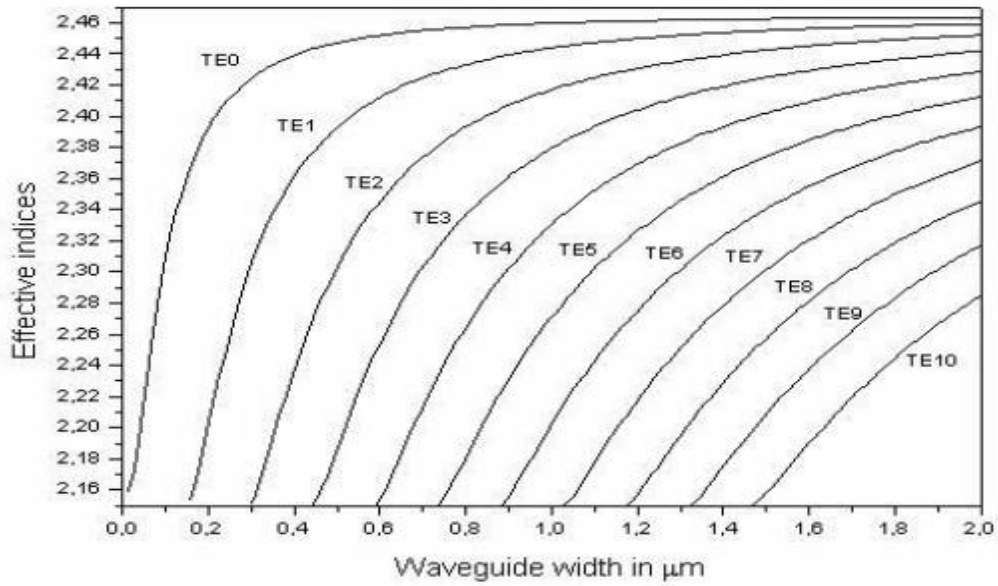


Figure - 5- Les modes TE.

Pour les modes TE, la figure montre que le mode fondamental apparaît à une largeur égale à  $0,016 \mu\text{m}$  tandis que le second mode n'apparaît qu'à plus de  $0,157 \mu\text{m}$ .

Cette structure –avec ces caractéristiques- est considéré comme un guide monomode qui ne guide qu'une seule onde jusqu'à l'augmentation de sa largeur, et de ce fait, l'apparition des autres modes. Par conséquent ; le guide devient multimode.

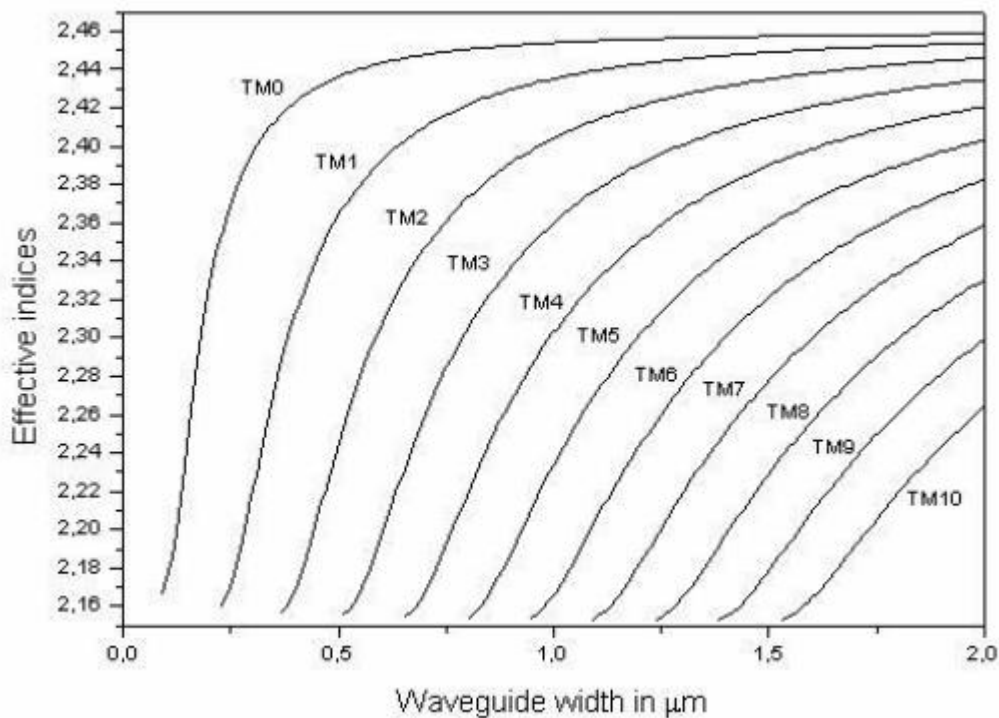


Figure -6- Les modes TM.

Pour les modes TM ; le mode fondamental apparaît à une largeur égale à  $0,092 \mu\text{m}$ , tandis que le premier mode secondaire n'apparaît qu'à partir de  $0,229 \mu\text{m}$ .

Ensuite, au lieu de faire varier la largeur du guide d'onde, on a modifié le coefficient stœchiométrique. Il faut continuellement évaluer d'abord le guide d'onde planaire infini et par la suite l'injecter dans le guide d'ondes vertical.

La variation du coefficient stœchiométrique a montré qu'il est possible d'agir sur les dosages des compositions afin de contrôler les indices des alliages par leurs bandes interdites. De ce fait ; il est également possible d'obtenir un indice de réfraction précis en choisissant judicieusement les composés binaires dans la composition des alliages ternaires.

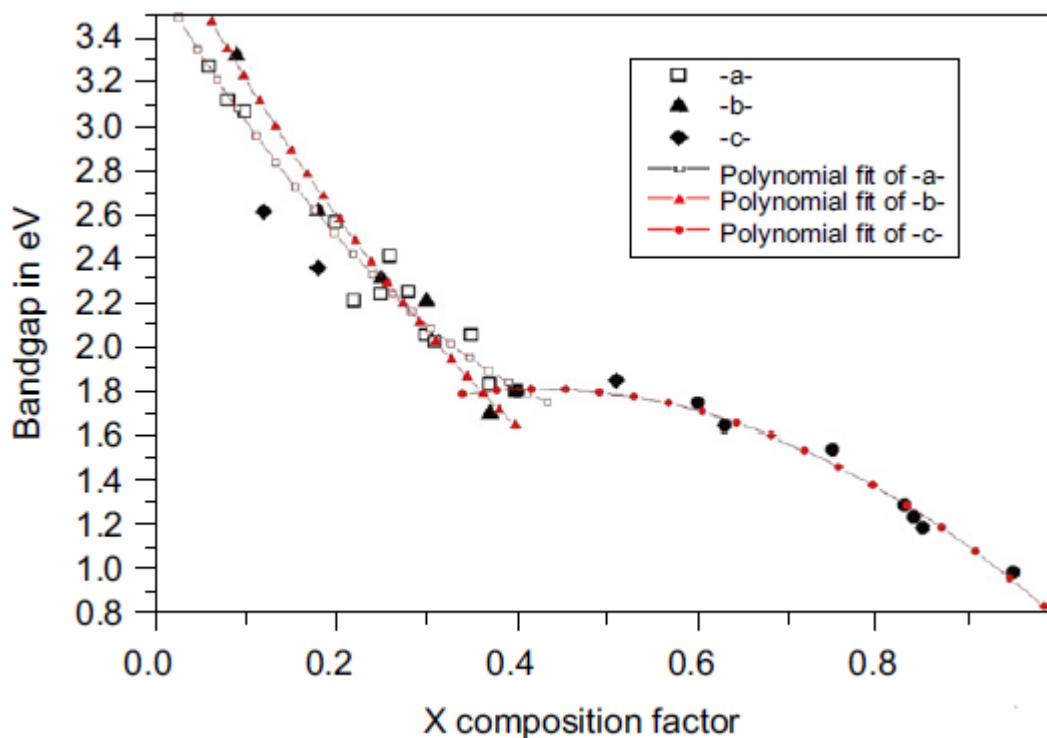


Figure-7- variation du gap en fonction de la fraction molaire.

Les résultats obtenus sont montrés dans la figure-8-. Concernant les modes **TE**, le mode fondamental apparaît à une largeur de seulement  **$0,005 \mu\text{m}$** . Par contre ; pour les modes **TM** le mode fondamental apparaît à  **$0,016 \mu\text{m}$**  de largeur.

Ces largeurs sont appelées **largeurs de coupure** ou **d'extinction**. En dessous de ces largeurs, le faisceau lumineux est diffusé dans le substrat et par conséquent il n'est pas guidé.

En augmentant progressivement la largeur du guide d'onde on obtient les autres modes appelés modes secondaires. Les modes suivants commencent aussi loin que  **$0,025 \mu\text{m}$**  pour les modes **TE** et à  **$0,047 \mu\text{m}$**  pour les modes **TM**.

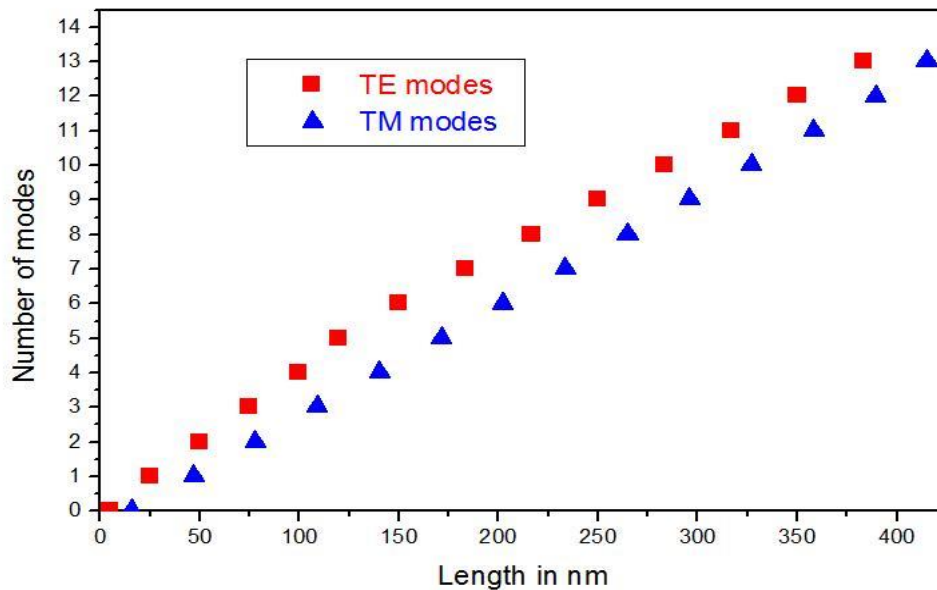


Figure - 8- Les modes TE et TM.

En continuant l'augmentation de la largeur du guide d'onde, on a pu constater que les indices effectifs qui augmentent graduellement tendent vers une valeur maximale ne l'atteignant jamais matérialisé par  $n_1$  l'indice de la structure guidante originale.

**On en conclue qu'il y a une asymptote qui ne peut être franchie, et ce même si la largeur du guide atteint une valeur infinie.**

**Donc** ; pour utiliser un seul mode de propagation ou pour avoir un guide d'onde **monomode** il faut prendre une largeur **inférieure à 25 nm**, sinon le premier mode fondamental apparaîtra et soustraira l'énergie du mode guidé. Si la largeur est augmentée, la quantité d'énergie guidée sera soustraite chaque fois qu'un autre mode apparaît.

Le tableau suivant montre les dimensions exactes de l'apparition de chaque mode.

Mode	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
TE (nm)	5	25	50	75	100	120	150	184	217	250	284	317	350	384
TM (nm)	16	47	78	110	140	171	202	234	265	296	327	358	389	418

**En conclusion** ; on peut dire que l'apparition des modes guidés dépend principalement des **dimensions initiales** de la structure guidante. Indépendamment de la longueur d'onde, plus la structure du guidage est **petite** ; plus les modes fondamentaux apparaissent en premier suivis des modes secondaires par la suite. Ceci est applicable et pour les modes TE et les modes TM.

## Conclusion

Dans ces travaux, on a calculé les indices effectifs d'une structure à base de GAN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ; même si ce semi-conducteur semble être très absorbant.

En réduisant les dimensions physiques du guide d'ondes, on a obtenu un mode guidé à partir d'une valeur très petite à savoir 5nm ; ce qui semble très intéressant. Puisque ; même avec une longueur d'onde de 0,359  $\mu\text{m}$ , un mode guidé pourrait apparaître à une très petite dimension conduisant à une meilleure intégration pour les futurs dispositifs d'optique intégrée.

Cela amène à dire que pour concevoir un guide d'onde monomode il serait suffisant de limiter la largeur du guide d'onde optique à 16 nanomètres. L'onde électromagnétique va se propager le long de ce guide d'onde monomode sans qu'il y ait un retard de phase à la réception.

Ce type de guides d'ondes optiques pourrait être utilisé dans un dispositif tout optique où l'émetteur transmet directement la lumière incidente vers le récepteur au lieu d'utiliser des connexions électriques.

Néanmoins, en raison de la grande absorbance d'une telle structure, il faut utiliser ce type de semi-conducteur juste à très courte distance.

Par conséquent, les résultats obtenus ont montré qu'il est adapté pour de courtes communications dans une seule puce d'un circuit intégré et en utilisant un émetteur laser GaN / InGaN et une liaison photodiode avec ce genre de guide d'onde pourrait non seulement économiser une grande quantité d'énergie électrique mais réduire le coût de la micropuce et accélérer la vitesse de transfert de l'information.

Finalement, les semi-conducteurs du type InGaN permettent de guider la lumière avec des dimensions de l'ordre des dizaines de nanomètres ce qui augure d'une grande intégration pour un premier résultat.

L'utilisation d'un émetteur à base d'InGaN et d'un récepteur réalisé dans ce même semi-conducteur, le tout relié par un guide d'onde réalisé aussi à base d'InGaN permettraient non seulement une énorme économie d'énergie mais aussi, vu l'ordre de grandeur des longueurs d'ondes en jeu, un étalement du spectre donc un élargissement de la bande passante.

## Conclusion générale

L'étude bibliographique, retranscrite dans les premiers chapitres, a permis dans un premier lieu l'analyse de la théorie du guidage optique tout en insistant sur les différentes approches permettant d'étudier le phénomène de propagation guidée, à savoir l'approche géométrique et ondulatoire. Et dans un second lieu, de comprendre le principe de fonctionnement des systèmes de transmissions et les réseaux optiques.

L'étude bibliographique, a permis aussi de faire le tour sur les différentes technologies permettant d'atteindre le haut débit dans les réseaux optiques, en passant du réseau cœur jusqu'au réseau d'accès.

L'étude des différentes propriétés des semi-conducteurs de type III-nitrides était plus que nécessaire pour compléter la partie théorique de ce manuscrit.

Pour finaliser, une étude d'une chaîne de transmission optique à très haut débit à base de semi-conducteur de type III-nitrides a été faite. En fait, les chaînes de transmission de l'information se faisaient à base de fils en cuivre. Une certaine amélioration fut introduite avec l'apparition des fibres optiques permettant de réduire grandement la consommation électrique et offrant une insensibilité aux perturbations extérieures. Cependant, le fait que les émetteurs et récepteurs soient à base de semi-conducteurs alors que le milieu intermédiaire qui transporte l'information soit conçu sur un guide d'onde à base de silice, il existe d'énormes pertes aux raccordements.

Nous avons pensé à remédier à ce grand inconvénient en remplaçant la fibre optique réalisée sur silice par un même continuum matériel en utilisant le même semi-conducteur aussi bien pour le système émission-réception que pour le transport de l'information. De ce fait, nous avons utilisé un semi-conducteur à base d'InGaN car les dimensions mises en jeu sont très réduites avec une efficacité accrue par rapport à un système classique à base de silicium. D'où ; l'obtention d'une chaîne de transmission optique à très haut débit à base de semi-conducteur de type III-nitrides.

Cette conception reste théorique et doit être corroborée par la pratique vu que l'usage d'InGaN soit encore restreint aux pratiques classiques d'amplification ou de commutation des composants électroniques.

# Annexes.

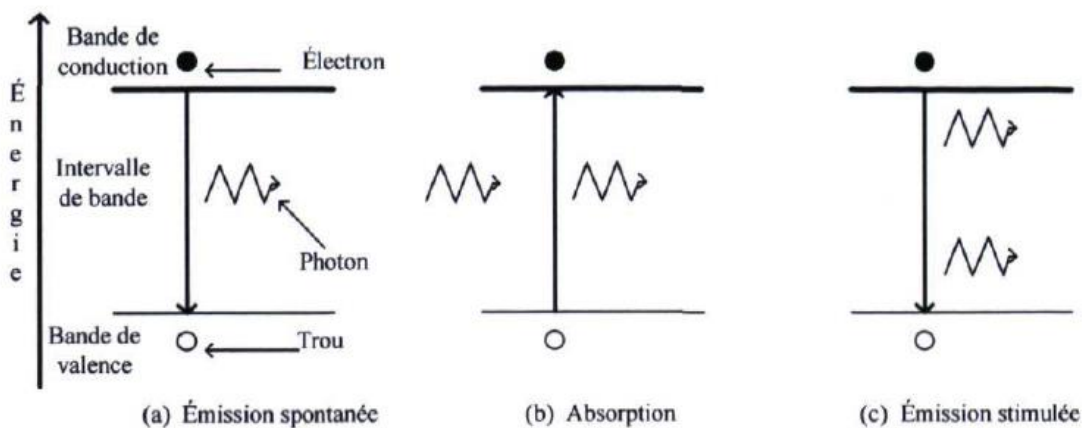
## Annexe 1 Processus d'interactions matière-rayonnement dans les semi-conducteurs.

La matière peut absorber ou émettre des rayonnements électromagnétiques. Au niveau microscopique et quantique, cela correspond à l'absorption ou l'émission de photons par les atomes. On utilise un modèle simplifié qui aide à la compréhension des effets atomiques qui sont au nombre de trois : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée.

Chaque atome possède des niveaux d'énergie particuliers où se placent les électrons, les niveaux d'énergie sont quantifiés et pour passer d'un niveau à l'autre, la quantité d'énergie à fournir doit correspondre exactement à la différence d'énergie entre ces niveaux.

En absence d'énergie extérieure ; les électrons sont localisés dans la bande de valence (niveau de plus basse énergie). Ces électrons ne pourront atteindre la bande de conduction (bande d'énergie supérieure) que si un flux lumineux de photons leur fournit l'énergie nécessaire pour le faire. En effet ; si l'énergie du flux lumineux  $E$  est inférieure à l'énergie de la bande interdite  $E_g$  ; les électrons restent dans la bande de valence. Par contre, si l'énergie incidente  $E$  est supérieure à  $E_g$  les électrons passeront à la bande de conduction.

La figure ci-dessous représente les différentes transitions possibles dans un semi-conducteur.

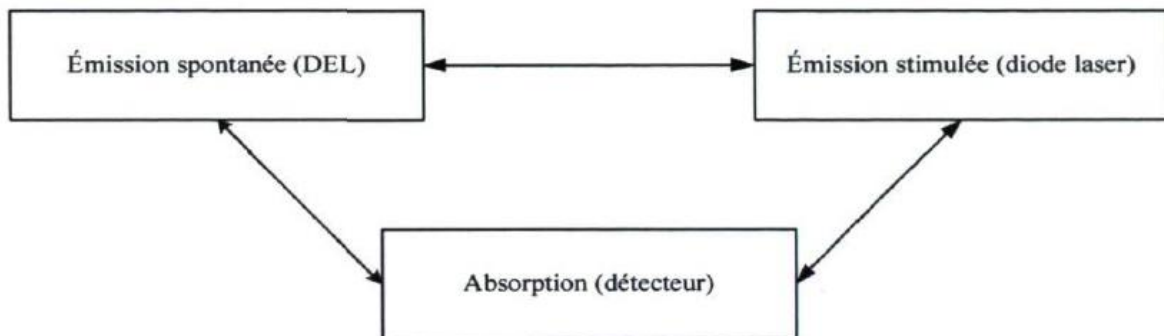


-Différentes transitions possibles dans un semi-conducteur-

1. **Emission spontanée** : de sa propre initiative, un électron peut tomber dans un état moins énergétique non occupé en émettant un photon spontané. Au bout d'une certaine durée où l'électron est au niveau supérieur, l'atome se désexcite et l'électron revient au niveau d'énergie inférieur.

2. **Absorption** : Consiste en le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, laissant un trou en bande de valence. L'énergie  $E_a$  nécessaire à cette transition est obtenue grâce au passage d'un photon de fréquence  $f_a$  telle que :  $f_a = E_a/h$  ;  $h$  étant la constante de Planck.
3. **Emission stimulée ou induite** : frappé par un photon, un électron peut retomber dans l'état le moins énergétique en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation que le photon incident.

L'émission spontanée trouve son application dans la diode électroluminescente, l'absorption dans la photodiode et l'émission stimulée dans la diode laser.



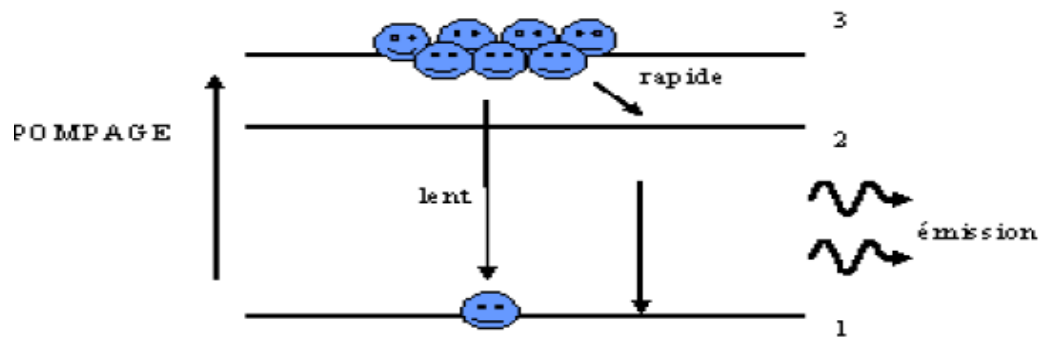
Nous avons ainsi décrit les trois processus d'interaction matière-rayonnement qui peuvent avoir lieu dans un semi-conducteur. Nous avons expliqué que l'absorption se caractérise par la disparition d'un photon et la création d'une paire électron-trou alors que l'émission se caractérise par une recombinaison électron-trou et la création d'un photon.

### Le pompage optique

Pour obtenir l'émission stimulée, il faut que les atomes soient dans un état excité. Pour cela, il faut leur transmettre de l'énergie sous forme de décharges électriques ou à l'aide d'un autre laser.

Pour obtenir l'effet laser, il faut apporter un minimum d'énergie sous forme électrique ou optique ; c'est le processus de pompage.





-Pompage optique-

### L'inversion de population

L'inversion de population joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des lasers. On a vu que l'émission stimulée produit un nouveau photon qui a exactement les mêmes fréquences, phase et direction que le photon incident. Dans un laser, cela se fait à grande échelle, sur un très grand nombre d'atomes ; la raison pour laquelle un laser a la particularité d'émettre une onde lumineuse intense dont la direction, la fréquence et la phase sont bien déterminées. Il s'agit d'une lumière dite cohérente.

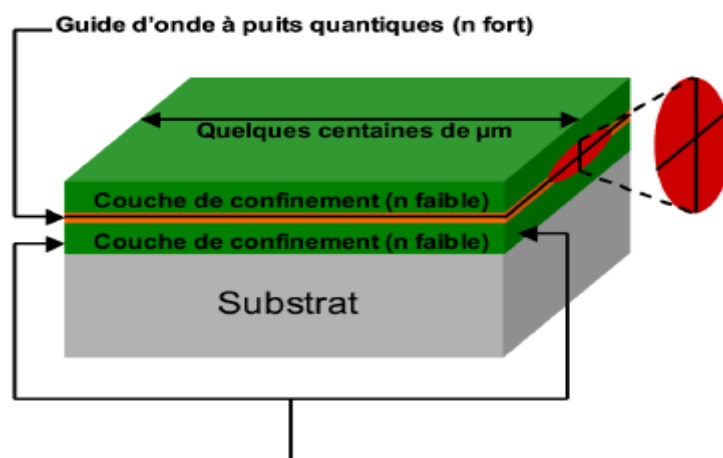
Pour cela ; il faut fournir de l'énergie au milieu matériel afin que ses atomes soient dans un niveau d'énergie excité  $E_2$  et non dans leur niveau fondamental  $E_1$ . C'est ce qu'on appelle effectuer une inversion de population, car à l'équilibre thermodynamique la majorité des atomes se trouvent dans l'état d'énergie le plus bas.

## Annexe 2 Principales structures de diodes lasers.

La diode laser, encore appelée laser à semi-conducteur, laser à injection, laser à jonction, laser à hétérojonctions, laser à puits quantiques ou même laser à diode est une diode à semi-conducteur, plus précisément une diode électroluminescente, conçue et utilisée de façon à exploiter l'effet LASER.

Plusieurs types de diodes laser peuvent être utilisés suivant les applications et le coût. Ce sont les composants les plus utilisés en raison de leur compacité, de leur efficacité et de leur rendement élevé.

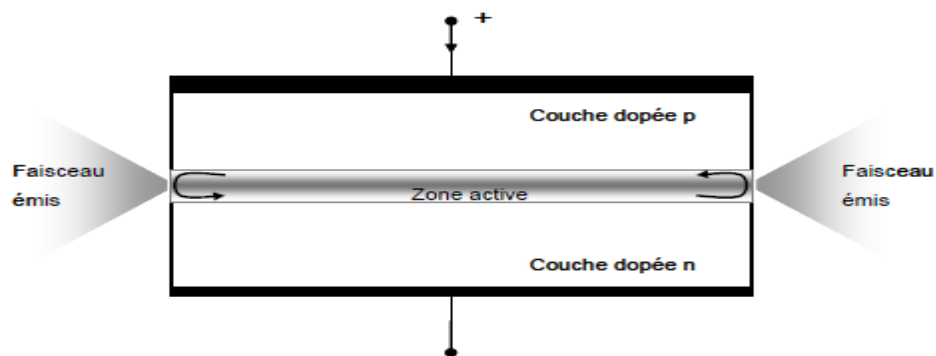
### 1. Diodes lasers à émission par la tranche



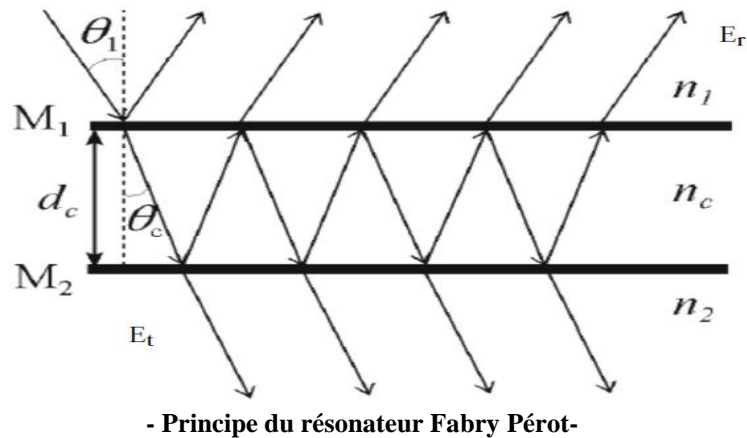
- Laser à semi-conducteur à émission par la tranche-

#### 1.1. Diodes lasers à cavité Fabry Pérot

Une cavité Fabry-Pérot est un oscillateur laser (résonateur) dans lequel deux miroirs semi réfléchissants sont séparés par une région de gain. Lorsque le résonateur est éclairé par une source de lumière, un rayon lumineux incident avec un angle  $\Theta_1$  sur le miroir  $M_1$  fait des allers-retours dans la cavité. Les multiples réflexions et transmissions sur les miroirs donnent lieu à des interférences à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité.

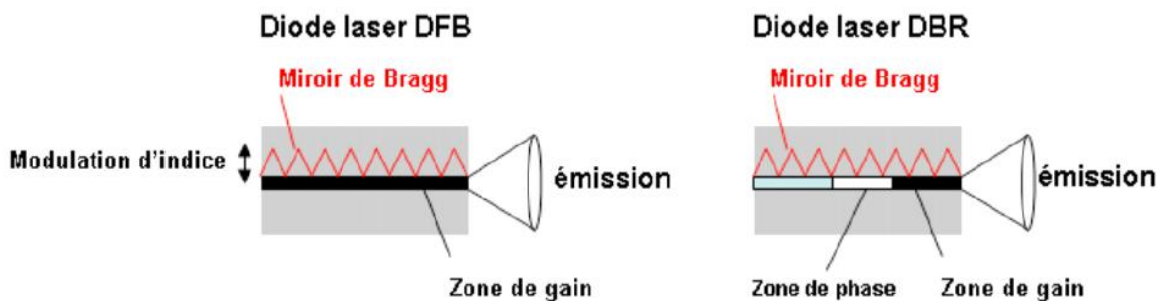


-Laser à cavité Fabry Pérot-



## 1.2. Les diodes DBR (Distributed Bragg Reflector) et DFB (Distributed FeedBack)

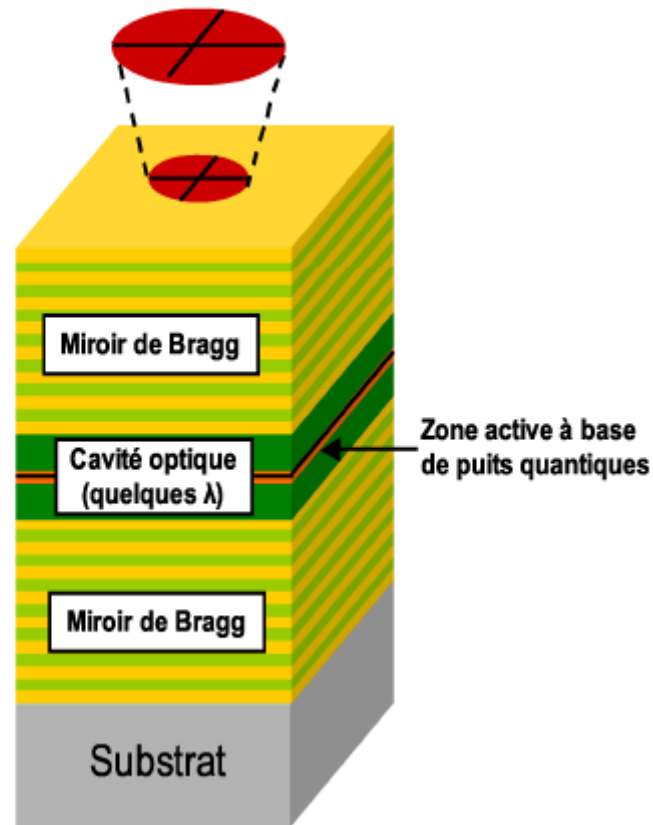
Les DBRs et DFBs sont des diodes lasers de type Fabry-Pérot dans lesquelles un réseau de diffraction a été gravé par modulation de l'indice de réfraction. Ce réseau de diffraction appelé aussi miroir de Bragg, peut remplacer un des miroirs de la cavité des diodes Fabry-Pérot, on parle alors de diodes DBRs. Il peut également être réparti le long de la zone active de la diode laser, on parle dans ce cas de diodes DFBs.



-Diode DFB et DBR-

## 2. Les diodes lasers à émission par la surface

On parle également de laser à cavité verticale (Vertical-Cavity Surface Emitting Laser). L'une des caractéristiques les plus marquantes des VCSELs est la longueur de la cavité qui est de quelques micromètres seulement. L'obtention de longueurs aussi courtes repose sur la croissance d'une cavité où la lumière se propage perpendiculairement par rapport à la surface des couches épitaxiées. Toutefois, cette cavité courte des VCSELs induit un gain optique faible par passage dans la cavité et nécessite d'avoir recours à des miroirs de haute réflectivité pour atteindre l'émission LASER.



**-Laser à semi-conducteur et à émission verticale-**

Cette technologie a su bénéficier de toutes les avancées technologiques de croissance des semi-conducteurs pour en faire aujourd'hui un des composants les plus utilisés, notamment dans les télécommunications optiques courtes distances. De récentes études ont démontré la possibilité d'utiliser les VCSEL pour des réseaux d'accès optiques.



## **Glossaire**

AON : Active Optical Network  
AOSC: Amplificateur Optique à Semi-Conducteur  
ASE: Amplified Spontaneous Emission  
ATM: Asynchronous Transfer Mode  
BER: Bit Error Rate  
BPM: Beam Propagation Method  
CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing  
DBR: Distributed Bragg Reflector  
DFB: Distributed FeedBack  
DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing  
EAM: Electro-Absorption Modulator  
EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier  
EIM: Effective Index Method  
ETDM: Electrical Time Deivision Multiplexing  
FTTH: Fiber To The Home  
FDM: Frequency Division Multiplexing  
FOM: Fibre Optique Microstructurée  
FP: Fabry Perrot  
FSAN : Full Service Access Network  
FTTH: Fiber To The Home  
FWM: Four Waves Mixing  
HVPE: Hybrid Vapor-Phase Epitaxial  
LAN: Local Area Network  
LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation  
LED: Light Emitting Diode  
MAN: Metropolitan Area Network  
MBE: Molecular Beam Epitaxy  
MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition  
MZM: Mach-Zender Modulator  
OCDMA: Optical Code Division Multiplexing Access  
ODN: Optical Distribution Network  
OLT: Optical Line Termination  
ONT: Optical Network Termination  
ONU: Optical Network Unit  
OOK: On Off Keying  
OTDM: Optical Time Division Multiplexing  
PAN: Personal Area Network  
PDA: Photodiode Array Detector  
PIN:Positive Intrinsic Negative  
PMD: Polarization Mode Dispersion  
PON: Passive Optical Network  
QoS : Quality of Service

SBS : Stimulated Brillouin Scattering

SDH : Synchronous Digital Hierarchy

SMF : Single Mode Fiber

SONET: Synchronous Optical Network

SPM : Self Phase Modulation

SRS : Stimulated Raman Scattering

TE : Transverse Electric

TEB: Taux d'erreur Binaire

TM: Transverse Magnétique

UDWDM : Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing

QOS : Quality Of Service

VCSEL : Vertical-Cavity Surface Emitting Laser

WAN : Wide Area Network

WDM: Wavelength Division Multiplexing

## Liste des figures

### Chapitre1

Figure-1- Spectre électromagnétique.....	P6
Figure-2- Représentation d'une onde électromagnétique.....	P7
Figure-3-a- guide d'onde plan, b- guide d'onde ruban c- guide d'onde cylindrique.	P10
Figure-4- Différents guides d'onde.....	P11
Figure-5- Réfraction de la lumière.....	P13
Figure -6- Structure d'un guide d'onde à saut d'indice et son profil d'indice.....	P15
Figure -7- Propagation de la lumière dans un guide à saut d'indice.....	P16
Figure-8- Représentation d'un guide ruban.....	P19
Figure-9- Guide ruban divisé en 3 parties.....	P19
Figure-10- Méthode de l'indice effectif.....	P20
Figure -11- schéma de la structure d'une fibre.....	P21
Figure -12- Différents types de fibre optique.....	P23
Figure -13- Le spectre lumineux.....	P24
Figure-14- Photographie de plusieurs fibres microstructurées.....	P25
Figure -15- Structure d'une FOM.....	P26
Figure-16-Différentes étapes de fabrication des FOM- a- assemblage b- étirage de la préforme – c- fibrage.....	P27
Figure-17- a-Fibre microstructurée à cœur creux b- à cœur plein.....	P28
Figure -18- Comportement modal d'une fibre.....	P28
Figure -19- Guidage par réflexion totale interne.....	P31
Figure -20- Diagramme des indices de réfraction d'une fibre optique.....	P31
Figure -21- a- Fibre PCF à cœur plein b- Fibre à saut d'indice équivalente.....	P33
Figure -22- Réflexion totale interne modifiée.....	P33



## Chapitre 2

Figure-1-Catégories des réseaux informatiques.....	P42
Figure-2-Câble coaxial.....	P45
Figure-3-Paire torsadée.....	P45
Figure-4-Fibre optique.....	P46
Figure-5-Pertes linéiques en fonction de la longueur d'onde.....	P50
Figure-6-Schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre.....	P50
Figure -7-Diffusion de Rayleigh.....	P51
Figure -8-Pertes de connectique.....	P52
Figure -9-Phénomène de dispersion.....	P52
Figure -10- schéma d'une liaison optique.....	P56
Figure-11- Structure d'un émetteur optique.....	P56
Figure-12- Spectre d'émission d'une LED et d'une DL.....	P58
Figure -13- Bloc-diagramme de l'émetteur optique avec (a) modulation directe et (b) modulation externe.....	P59
Figure-14-Types des amplificateurs selon la position dans la chaîne de transmission.....	P61
Figure -15-Eléments constitutifs de l'amplificateur EDFA.....	P62
Figure-16- Spectre du gain (a) d'un SOA (b) d'un EDFA.....	P63
Figure -17- Diode PIN et diagramme d'énergie correspondant.....	P66
Figure -18- Technique TDM.....	P68
Figure -19- Concept de base du WDM.....	P69
Figure -20- différentes techniques CDMA.....	P72

### Chapitre3

Figure-1-Types des systèmes de transmissions optiques.....	P78
Figure -2-Les différentes technologies FTTx.....	P81
Figure-3-Architecture d'un réseau d'accès.....	P81
Figure-4-Topologies des réseaux d'accès.....	P83
Figure-5-Architecture P2P.....	P83
Figure-6-Architecture P2MP.....	P84
Figure-7-Exemple d'un réseau PON.....	P85
Figure-8-Architecture PON basé sur le multiplexage temporel.....	P88
Figure-9-Migration du TDM-PON vers le WDM-PON.....	P89
Figure-10-Principe de l'accès multiple en WDM.....	P89
Figure-11-WDM-PON Broadcast and Select.....	P90
Figure-12-PON avec ODN utilisant un répartiteur en WDM.....	P91
Figure-13-WDM-TDM-PON.....	P91
Figure-14-Exemple d'un réseau avec une architecture hybride.....	P92
Figure-15-OFDMA-PON.....	P92
Figure-16-Construction du diagramme de l'œil.....	P95
Figure-17-Diagramme de l'œil d'un signal a- de bonne qualité – b- bruité.....	P95

## Chapitre4

Figure -1-Paramètres de maille dans les structures hexagonale et cubique.....	P103
Figure-2-Polarité du GaN.....	P105
Figure -3- Dopage des nitrides-III.....	P107
Figure -4- La mobilité des porteurs de GaN en fonction de la concentration d'électrons à T= 300 K.....	P108
Figure -5- La mobilité en fonction de la température pour des concentrations de GaN a- $n= 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; b- $n= 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .....	P108
Figure-6- La mobilité de l'AlN en fonction de la température.....	P109
Figure-7- La mobilité de l'AlN en fonction de la concentration des électrons à la température T= 300 K.....	P109
Figure-8- La mobilité en fonction de la concentration et de la température (InN).P110	
Figure -9- Représentation d'une dislocation coin.....	P111
Figure -10- Représentation d'une dislocation vis.....	P111
Figure -11- Représentation d'une dislocation mixte.....	P112
Figure -12- Diagramme de bandes de GaN, AlN et InN en phase hexagonale.....	P114
Figure -13- représentation du gap des semi-conducteurs en fonction de leurs paramètres de maille.....	P115
Figure -14- Largeur de la bande interdite en fonction de la température.....	P116
Figure -15- Variation de la masse effective et de l'énergie des électrons dans GaN et AlN en fonction du champ électrique.....	P117
Figure -16- Variation de l'indice de réfraction du GaN en fonction de la longueur d'onde.....	P118
Figure -17- Variation de l'indice de réfraction du AlN en fonction de la longueur d'onde1- Geidur et Yaskov (1980)2-3- Demiryont et al. (1986) .....	P118
Figure -18- Variation de l'indice de réfraction du InN en fonction de la longueur d'onde.....	P118
Figure -19- Indices de réfraction du GaN, InN et AlN.....	P119
Figure -20- Courbe d'absorption du GaN en fonction de la longueur d'onde.....	P120
Figure -21- Coefficient d'absorption du GaN en fonction du gap.....	P120
Figure -22- Coefficient d'absorption du AlN.....	P121
Figure -23- Coefficient d'absorption du InN.....	P121
Figure-24- évolution des alliages utilisés pour les dispositifs optoélectroniques en fonction de la longueur d'onde ciblée.....	P122
Figure -25- Gap d'énergie des structures $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ et $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ en fonction de X.....	P124
Figure -26- Variations du gap d'énergie d'une structure hexagonale $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de X.....	P124
Figure -27- Concentration des électrons dans une structure $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ en fonction de la température.....	P125

Figure -28- vitesse de saturation des électrons dans $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de la fraction de mole Al.....	P125
Figure -29- Vitesse de saturation des électrons dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , en fonction de la fraction de mole In.....	P126
Figure -30- mobilité des électrons dans $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de la fraction de mole Al.....	P126
Figure-31-Mobilité des porteurs libres dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ en fonction de la température.....	P127
Figure -32- Indices de réfraction des structures $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .....	P127
Figure -33- indices de réfraction des structures $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .....	P128
Figure -34- Indices de réfraction des structures $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$ .....	P128
Figure-35-Variations de la longueur d'onde émise par $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de x.....	P129
Figure-36-Configuration des bandes de conduction et de valence dans une hétérostructure de type I et de type II.....	P129
Figure -37- Densité d'états dans différentes configurations de confinement.....	P130
Figure-38- Structure type d'une LED.....	P134
Figure -39- Structure du laser bleu à multi-puits quantiques de $\text{InGaN}$ .....	P135
Figure -40- Structure d'une photodiode PIN à base de $\text{GaN}$ .....	P136
Figure -41- Réponse spectrale d'une photodiode PIN à base de $\text{GaN}$ .....	P137

## Chapitre 5

Figure -1 -Microguide optique GaN sur InGaN.....	P143
Figure -2 - Microguide vu du face, ou du côté de l'onde incidente.....	P144
Figure -3 - Structure en guide plan horizontal.....	P144
Figure -4 - structure en guide plan vertical.....	P145
Figure - 5- Les modes TE.....	P153
Figure -6- Les modes TM.....	P153
Figure-7- variation du gap en fonction de la fraction molaire.....	P154
Figure - 8- Les modes TE et TM.....	P155

