

Université Abou Bekr Belkaid  
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID TLEMCCEN  
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS  
LABORATOIRE DE TELECOMMUNICATIONS



Mémoire pour l'obtention du diplôme de

**Master en Télécommunications**

Option : Photonique et Réseaux Optiques de Télécommunications

(PROTONS)

**Thème**

**Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs  
optiques : EDFA, SOA, et Raman**

*Présenté par :*

**Mlle.Berrahil Nor El houda**

**Mlle.Benhammou Khalida**

**Soutenu le 24 Mai 2016 devant le jury composé de :**

<b>Président :</b>	Mr. KAMECHE. S	M C A Université de Tlemcen
<b>Examineurs :</b>	Mr. KARIM. F. A	M C A Université de Tlemcen
	Mr. BOUACHA .A	M C A Université de Tlemcen
<b>Encadreur :</b>	Mr KHELLADI. M	M C A. Université de Tlemcen

**Année Universitaire 2015-2016**

# Remercîment

*En préambule à ce mémoire nous remercions le bon dieu qui nous aide et nous donne la patience et courage durant ces longues années d'étude.*

*Au nom de la science et de la technologie et de l'esprit scientifique au nom de la vertu de travail et de l'esprit d'élévation de la connaissance , nous tiendrons à remercier notre encadreur Mr. Khelladi Mounir , pour ses précieux et judicieux conseils ses justes critiques qui témoignent de l'intérêt qu'il nous apportent Mr.karim et Mr Bouacha et le président des jury Mr. Kameche Samir pour avoir accepté d'examiner ce travail de mémoire*

*En fin nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches qui nous ont toujours soutenues et encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire*

# *Dédicace*

*A mes chers parents qui m'ont toujours poussé et motivée dans mes études. Ce mémoire représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'ils m'ont prodigués tout au long de ma scolarité .qu'ils en soient remerciés par cette modeste dédicace*

*A ma précieuse sœur*

*A mes frères*

*A mes cousins*

*A mes chers amis*

*Enfin à mon binôme Benhammou khalida*

*Nor eh houda . . . .*

# *Dédicace*

*A mes chers parents qui m'ont toujours poussé et motivée dans mes études. Ce mémoire représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'ils m'ont prodigués tout au long de ma scolarité .qu'ils en soient remerciés par cette modeste dédicace.*

*A ma précieuse sœur*

*A mes frères*

*A mes cousines*

*A mes chers amis*

*Enfin à mon binôme Berrahil nor el houda*

*Khalida .....*

## Table de matière

Introduction générale .....	2
I.1 Historique.....	5
I.2 Introduction.....	6
I.3 Systèmes de transmission optique .....	7
I.3.1 Interface optique de l'émission.....	7
I.3.1.1 Codage de source.....	7
I.3.1.2 Les source optique.....	8
I.3.1.2.1 Diode électroluminescente.....	8
I.3.1.2.2 Laser .....	9
I.3.1.3 Modulateur.....	14
I.3.2 Le support de transmission .....	15
I.3.2.1 Structure de la fibre optique.....	15
I.3.2.2 Propagation de la lumière dans une fibre optique .....	16
I.3.2.3 Type de fibre optique .....	18
I.3.2.3.1 Les fibres monomode.....	18
I.3.2.3.2 Les fibres multi-mode .....	19
A. Fibres à saut d'indice .....	19
B. Fibre à gradient d'indice .....	20
I.3.2.4 Caractéristique des fibres optiques.....	21
I.3.2.4.1 Atténuation dans la fibre optique .....	21
I.3.2.4.2 La dispersion.....	23
I.3.2.5 Répéteur ou régénérateur de signal .....	24
I.3.2.5.1 Amplificateur optique .....	25
I.3.3 L'interface optique de réception .....	25
I.3.3.1 La photodiode PIN .....	25
I.3.3.2 Photodiode à avalanche PDA .....	27
Chapitre II : les amplificateurs optique dopé en erbium.....	30
II.1 Introduction .....	30

II.2 L'amplificateur optique dopé à l'erbium .....	30
II .2.1 Définition .....	30
II.2.5 Système à deux niveaux.....	34
II.2.5.1 L'absorption .....	34
II.2.5.2 Émission stimulée .....	34
II.2.5.3.2.Nonradiative .....	36
II.2.6 Principe d'un système à trois niveaux .....	36
II.2.6. 2 Evolution en régime non-stationnaire.....	38
II.2.7 Les caractéristique de l'amplificateur optique EDFA .....	39
II.2.7.1. Gain.....	39
II.2.7. 2 Saturation d'amplificateur .....	40
II.2.7. 3 Rapport signal à bruit.....	41
II.2.7.4 Facteur de bruit .....	41
II.2.7.5 Longueur optimale .....	42
II .3 Les avantages de ce type d'amplificateur .....	43
II .4 Conclusion .....	44
Chapitre III : les amplificateurs à base semi-conducteur.....	45
III.1 Introduction .....	45
III.2 Rappels sur le semi-conducteur .....	46
III 2.1 Caractéristiques d'un semi-conducteur .....	48
III.2.2 Type du semi-conducteur .....	49
III.2.2.1 Semi-conducteur intrinsèque .....	49
III.2.2.2 Semi-conducteur extrinsèque.....	49
III.2.3 La théorie des alliages .....	50
III.2.4 Notion du gap direct et du gap indirect dans un semi-conducteur .....	51
III.2.5 Les semi-conducteurs III-V.....	52
III.2.5.1 Description de l'alliage quaternaire.....	52
III.3 Amplificateurs optiques à semi-conducteurs .....	53
III.3.1 Définition .....	53
III.3.2 Principe générale d'un amplificateur optique à semi-conducteurs.....	53
III.3.2 Facteur de confinement .....	56
III.3.3 Caractéristique d'un amplificateur optique à semi-conducteurs.....	57
III.3.3.1 Gain optique.....	57

III.3.3.3 Puissance de saturation.....	59
III.4 Avantages et inconvénients des amplificateurs à semi-conducteurs .....	59
Chapitre IV : les amplificateurs optique Raman .....	61
IV.1 Introduction.....	61
IV .2 Amplificateur Raman .....	61
IV.2.1 Définition .....	61
IV.2.2 Principe de fonctionnement .....	62
IV.2.3 Les caractéristiques de l'amplificateur Raman .....	66
IV.2.3.1 Gain de l'amplificateur Raman.....	66
IV.2.3.1.1 Gain, sans déplétion de la pompe : .....	66
IV.2.3.1.2 Gain, régime de déplétion de la pompe : .....	68
IV.2.3.2 Le bruit dans l'amplificateur Raman .....	69
IV .2.3.2.1 Équations d'évolution du signal et des densités spectrales de bruit.....	69
IV.2.3.2.2 Facteur de bruit de l'amplificateur Raman .....	70
IV .3.2.3 Le rapport signal sur bruit.....	72
IV.4 Avantages d'amplificateur Raman .....	72
IV.5 Comparaison entre les trois types d'amplificateurs .....	73
IV.6 Conclusion .....	74
Chapitre V : Simulation et comparaison des résultats .....	77
V.1 Introduction.....	77
V.2 Présentation du logiciel OptiSystem.....	77
V.2.1 Applications d'Optisystem .....	78
V.2.2 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem.....	78
V.2.3 Avantage du logiciel OptiSystem .....	79
V.3 Présentation de la simulation .....	79
V.3.1 Module d'émission .....	79
V.3.2 Support de transmission .....	79
V.3.3 Module de réception .....	80
V.4.Conclusion.....	96
Conclusion générale.....	98
Bibliographie .....	XIV





## *Tableau des figures*

Figure I-1 : Synoptique général d'un système de communications par fibre optique .....	7
Figure I-2: Symbole de la DEL .....	8
Figure I-3: Phénomène d'émission spontanée .....	9
Figure I-4: Phénomène absorption .....	10
Figure I-5: Phénomène d'émission stimulée .....	11
Figure I-6: Les lasers Fabry-Pérot (FP) .....	11
Figure I-7: lasers Distributed Feedback (DFB).....	11
Figure I-8: les lasers Distributed Bragg Reflector (DBR) .....	12
Figure I-9: Les lasers Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) .....	12
Figure I-10 : Structure de la fibre optique.....	16
Figure I-11: Réflexion et réfraction d'un rayon incident sur la surface de séparation des deux milieux.....	17
Figure I-12: Guidage de la lumière dans le milieu d'indice $n_1$ par réflexion totale interne. ..	17
Figure I-14 : Etalement du signal optique dans une fibre monomode .....	18
Figure I-15: Structure de la fibre à saut d'indice.....	20
Figure I-16: Etalement du signal optique dans une fibre à saut d'indice. ....	20
Figure I-17 : Structure de la fibre à gradient d'indice .....	20
Figure I-18 : Etalement du signal optique dans une fibre à gradient d'indice .....	21
Figure I-19 : Atténuations dans la fibre optique .....	21
Figure I-20 : Atténuation d'une fibre optique .....	22
Figure I-21: Évolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique.....	23
Figure I-22 : Structure d'une photodiode PIN .....	26
Figure I-23 : Photodiode à avalanche (APD). ....	27
Figure I-24 Tchebychev .....	28
Figure II.1 : structure de l'amplificateur à fibre optique dopé en erbium .....	31

Figure II-2 : Tableau périodiques des éléments .....	32
Figure II-3 : principe de fonctionnement d'EDFA.....	33
FigureII-5 : principe de l'émission stimulée .....	35
FigureII-6 : Désexcitation radiative. ....	35
Figure II-7: <b>Taux de transition entre niveaux d'énergie.</b> .....	36
Figure II-8 : système à 3 niveaux d'énergie .....	36
Figure II-9 : la variation de gain et le facteur de bruit en fonction de la longueur d'onde ....	42
Figure IV-1 : Principe d'une liaison utilisant l'amplificateur Raman distribuée .....	62
Figure IV-2 : Représentation schématique de différents phénomènes produits dans l'interaction d'un faisceau lumineux avec un milieu dense .....	63
Figure IV-3 : Représentation schématique des transitions énergétiques à la base de la diffusion Raman .....	64
Figure IV-4 : Schéma de principe de la diffusion Raman au sein d'une fibre optique en silice pure [ .....	65
Figure IV-6 : Spectre Raman dans une fibre en silice pour longueur d'onde de pompe de 1450 nm.....	66
Figure IV-7 : Evolution du facteur de bruit en fonction de la puissance du signal à niveau de bruit de pompe constant.....	71
Figure IV-8 : Evolution du facteur de bruit en fonction du niveau de bruit de pompe à niveau de puissance signal constante .....	71
Figure V.1 : Schéma de l'interface OptiSystem.....	78
Figure V-2 : Schéma bloc de la liaison de simulation .....	81
Figure V-3: le paramétrage de l'amplificateur EDFA. ....	82
Figure V-4 : Visualisation globale de la puissance d'entrée.....	82
Figure V-5 : Visualisation globale la puissance de sortie .....	83
Figure V-6 : diagramme de l'œil .....	84
Figure V-7 : tableau des parametres .....	84
Figure V-8 : Visualisation globale de la puissance d'entrée. ....	85
Figure V -9: Visualisation globale de la puissance de sortie. ....	85
Figure V-10 : Visualisation globale la puissance de sortie.....	86

Figure V-11 : tableau des paramètres .....	86
Figure V-12 : Schéma bloc de la liaison de simulation .....	87
Figure V-13: le paramétrage de l'amplificateur SOA. ....	88
Figure V-14 : visualisation de la puissance de l'entrée .....	88
Figure V-15 : visualisation de la puissance de l'entrée .....	89
Figure V-16 : diagramme de l'oeil .....	89
Figure V-17 : tableau des parametres .....	89
Figure V-18 : visualisation de la puissance de l'entrée .....	90
Figure V-19 : Figure : Visualisation globale de la puissance de sortie. ....	91
Figure V-21: tableau des parametres.....	92
FigureV-22: Schéma bloc de la liaison de simulation : .....	93
FigureV-23: le paramétrage de l'amplificateur Raman.....	94
Figure V-24 : visualisation de la puissance de l'entrée .....	95
FigureV-25: Puissance de sortie. ....	95
FigureV-26: Diagramme de l'œil.....	96
FigureV-27: les paramètres de la photodiode PIN .....	96
Figure V-28 : visualisation de la puissance de l'entrée .....	97
Figure V-29 : Visualisation globale de la puissance de sortie. ....	97
FigureV-30: Diagramme de l'œil.....	98
FigureV-31: Diagramme de l'œil.....	98

## Liste des tableaux

Tableau I-1: Comparaison des émetteurs optoélectronique .....	13
Tableau 02: comparaison entre photodiode PIN et PDA .....	27
Tableau III -1 : Morceau du tableau périodique des éléments de Mendeleïev .....	46
Tableau III .2 : Exemple des semi-conducteurs .....	50
Tableau III-3 : Les matériaux semi-conducteur important pour l'optoélectronique .....	50
Tableau IV-1 : Grandeurs caractéristiques associées aux différentes techniques d'amplification .....	74
Optique .....	74

# Introduction générale

### Introduction générale

Depuis une vingtaine d'années, la très forte croissance du multimédia et des systèmes de communication à haut débit montrent que les moyens de transmission par fibre optique sont devenus indispensables. En effet, compte tenu de la bande passante et des pertes d'un câble cuivre, l'utilisation des câbles coaxiaux devient rédhibitoire. En effet, l'atténuation intrinsèque dans la bande 0.3 à 1.8  $\mu m$ , est bien plus faible pour la fibre optique. De plus, la fenêtre de transmission d'une fibre est très large ; plusieurs dizaines de THz repartis autour de 1.3 et 1.55  $\mu m$ , correspondant à un minimum d'atténuation pour une fibre en silice dopée à l'oxyde de germanium. Cette extraordinaire bande passante fait de la fibre optique un vecteur idéal pour les besoins multimédia.

Les informations sont transmises sur de très longues distances. Elles sont soumises à de multiples effets décrits plus haut qui dégradent le signal (atténuation, élargissement, déphasage..). C'est pourquoi tout au long de la ligne des répéteurs sont positionnés afin de régénérer le signal (R), de le remettre en forme (2R) voir de le resynchronisé ou récupérer le rythme (3R). La plupart des lignes déjà installées possèdent des répéteurs purement électroniques. Le signal est donc converti (optique-électrique O/E) remis en forme, resynchronisé, etc. Reconvertir électrique/optique (E/O). Ce type de répéteurs emploie des circuits électroniques ultra rapides, donc très coûteux et complexes à mettre en œuvre, pour pouvoir gérer le nombre de canaux qui croît régulièrement pour augmenter les débits de transmission, surtout à de telles vitesses de fonctionnement. Les systèmes actuels utilisent dorénavant, des répéteurs purement optiques, facile à mettre œuvre et permettant d'effectuer cette tâche à la « vitesse optique ». La remise en forme et la régénérescence du signal, sera faite par un amplificateur optique, la ré-synchronisation par l'emploi de fibre de compensation.

Dans ce mémoire Nous sommes particulièrement intéressés aux amplificateurs optique dans les systèmes de transmission. Le travail, mène dans le cadre de ce mémoire, est articulé autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation d'une de chaîne de transmission par fibre optique. Nous commençons par la description de la partie émission. Cette partie est essentielle puisque elle englobe les données à transmettre, le codage qui présente une tâche

nécessaire pour le bon fonctionnement et la surveillance de ces données, le type de modulation ( direct ou externe) et le modulateur lui-même ( Niobate de lithium, Mach-Zenhder, Absorption,...), et effectivement la source laser utilisées. Ensuite, la canal de transmission qui la fibre optique comme dans notre cas. On va définir la fibre, les types de fibres, quelques phénomènes linéaires comme l'atténuation et la dispersion. Enfin, la partie réception qui contient les photodiodes pour faire la conversion électrique/optique, les filtres électriques pour élimination des bruits, le circuit de décision pour décidé oui le « un » et le « zéro ».

Le seconde chapitre, est dédié pour l'amplificateur optique dopé en Erbium. au début on va définir c'est quoi un amplificateur optique. La notion des terres rares en particulier Erbium. Ensuite, on va expliquer le principe de fonctionnement de ce type d'amplificateur avec une présentation de manière détaillée. Enfin, les caractéristiques de cet amplificateur.

Dans le troisième chapitre, on va présenter un deuxième type d'amplificateur à base de semi-conducteur. On commence par un rappel théorique sur les semi conducteurs. Les notions de base sur gap direct et indirect, les alliages ternaires et quaternaires. Après, principe de fonctionnement d'un amplificateur optique. Enfin, les caractéristiques de ce dernier.

Le quatrième chapitre implémente un troisième type d'amplificateur optique à base de l'effet Raman. On s'intéressera au phénomène absorption, émission spontanée et l'émission stimulée. Ces phénomènes sont les mots clés de l'amplification Raman. Après, on va définir le gain, le facteur de bruit...

Enfin, le dernier chapitre sera consacré pour la comparaison de ces trois types d'amplification optique dans une chaîne de transmission et voir la particularité de chaque amplificateur par rapport aux autres. Après, on termine par une conclusion générale pour contourner l'ensemble de notre travail de ce mémoire de projet de fin d'étude.

## Chapitre 1

# Généralité sur les télécommunications optique



## I. Introduction

L'arrivée de la fibre optique a totalement changé le monde des télécommunications. La conception de systèmes de transmission à très grande capacité était désormais possible. Aujourd'hui plus 80% de communication utilise la fibre optique sur des distances dépassant 30 millions de kilomètres puisqu'il offre plus d'avantages par rapport à tout autre support de transmission.

L'objectif de ce chapitre est de donner une formation des notions fondamentales à la conception d'un système de transmission par fibre optique. On fait le tour sur la partie d'émission, support de transmission, amplificateurs et partie de réception.

### I.2 Historique

Les expériences de transmission optique d'information datent de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, il a fallu attendre de savoir diriger ou guider correctement la lumière pour envisager son application aux télécommunications. L'apparition des lasers, vers 1960, a donné lieu à des expériences de transmission à travers l'atmosphère. Mais les instabilités de propagation (dus en particulier aux variations d'indice de l'air) ont fait abandonner cette solution, réservée de près aux communications à courtes distances (télécommunication infrarouge, télécommunication « indoor », liaisons laser infrarouge entre deux bâtiments), même si on l'envisagera nouveau pour les liaisons directes entre satellites. De leur côté, les fibres optiques, minces cheveux de verre très transparents qui utilisent le principe, connu depuis fort longtemps, des fontaines lumineuses, faisant l'objet d'applications décoratives, puis plus utilitaires (éclairage, endoscopie, mesures optiques à distance). Leur application aux domaines de télécommunication, envisagée par les théoriciens (Charles Kao) dès 1966, a été rendue possible dans les années 1970 grâce aux progrès dans la technologie de fabrication des fibres optiques de silice, permettant une très faible atténuation et une résistance mécanique suffisante. Il est également dû à la maîtrise des diodes laser à semi-conducteurs, qui allient les performances des lasers à la facilité d'emploi des composants III-V. La mise au point de câbles, connecteurs et composants passifs performants, et la mise en disposition de procédés industriels de raccordement, ont également été indispensables pour le développement des premières liaisons commerciales, vers 1980.

**Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman**

Les années 1990 ont été marquées par la maîtrise de l'amplification optique puis de multiplexages en longueurs d'onde, qui permit une explosion des capacités répondant aux besoins de la croissance de l'Internet. La révolution suivante devrait être celle des réseaux tout optiques, inaugurées par l'apparition des premiers commutateurs entièrement optiques en 2000 ; il s'agissait cependant de prototypes et ce concept reste à préciser, notamment par standardisation des protocoles.

Avec environ 100 millions de kilomètres fabriqués par an, et malgré les fluctuations de l'activité industrielle de ce secteur qui connaît un caractère cyclique marqué, les fibres optiques sont désormais une technique à maturité, qui diffuse dans des domaines d'application de plus en plus vastes [1].

### I.3 Systèmes de transmission optique

Une liaison de transmission optique est constituée d'un émetteur, d'un récepteur et d'un support de transmission, la façon de transmettre l'information dépend bien souvent du milieu de transmission (la fibre optique), la figure ci-dessous élabore ces différentes interfaces.

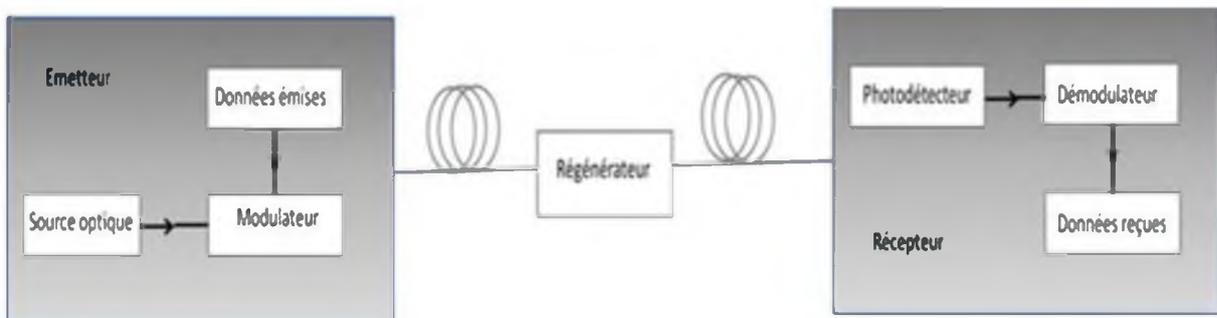


Figure I-1 : Synoptique général d'un système de communications par fibre optique

#### I.3.1 Interface optique de l'émission

On général un module d'émission est composée de divers éléments (diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL), modulateur), leur principe est de mise en forme de l'information à transmettre.

### I.3.1.1 Codage de source

Un système de communication a pour but d'acheminer des données d'un émetteur vers un récepteur. Le codage de source est une techniques de compression de l'information ceci de transmettre le maximum d'information sur un minimum de bande passante, à la sortie du codeur les données est caractérisée par un débit binaire, donc un codage sert à fournir une représentation agissant des données tout en protégeant l'information contre les différent erreurs de transmission, Il permet également dans certains cas d'assurer le secret des communications.

Codage de l'information s'effectue principalement en trois étapes :

- l'information sera exprimée par une suite de nombres (numérisation)
- chaque nombre est codé sous forme binaire (suite de 0 et 1)
- chaque élément binaire est représenté par un état physique, selon la nature du canal de communication utilisé pour la transmission (câble coaxial, fibre optique, canal hertzien...).

### I.3.1.2 Les source optique

Dans le domaine de la télécommunication optique, deux types de sources lumineuses sont couramment utilisées :

#### I.3.1.2.1 Diode électroluminescente

Une LED (Light Emitting Diode) est ce qu'on appelle en français une DEL : une diode électroluminescente est une composant optoélectronique ce dernier est réalisé avec une jonction PN polarisée dans le sens passant, C'est un dispositif génial car il permet d'obtenir de la lumière avec un très bon rendement.

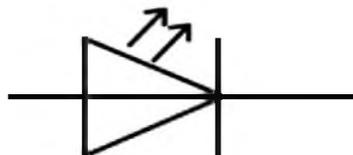


Figure I-2: Symbole de la DEL

Ce dispositif émet de la lumière incohérente lorsqu'il est traversé par un courant électrique, un courant qui ne peut le parcourir que dans un seul sens. Le procédé repose sur l'émission spontanée d'un photon produit grâce à la recombinaison d'un électron et d'un trou dans un semi-conducteur. On peut distinguer différents types de diodes électroluminescentes en fonction de leur puissance (inférieure ou supérieure à 1 W), ou de leur spectre d'émission (diodes chromatiques, blanches ou à infrarouges). La première couleur obtenue a été le rouge en 1962 (par Nick Holon).

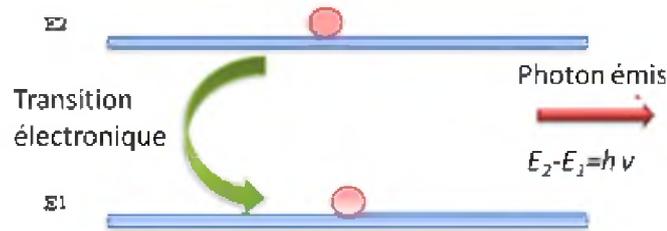


Figure I-3: Phénomène d'émission spontanée

Un électron dans un état instable, il tend de revenir spontanément dans son état fondamentale, (il passe d'un état ionisé à un état lié), en émettant énergie sous forme d'un photon, Cette émission de photon est appelée émission spontanée.

L'énergie de ce photon est :  $E = E_2 - E_1 = h\nu$

Avec  $h$ : constante de Planck

$\nu$  : fréquence de radiation émise.

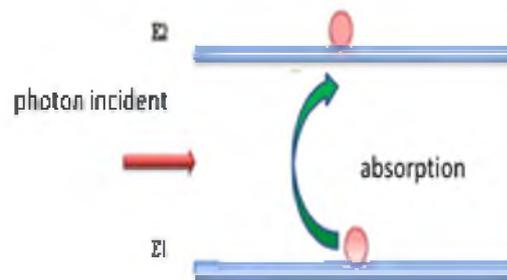
### I.3.1.2 .1 Laser

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) signifie amplification de lumière par émission stimulée de Rayonnement est un composant optoélectronique à base de matériaux semi-conducteurs utilisé pour produit une lumière cohérente [1]. Un laser est similaire d'un oscillateur mais dans le domaine optique comporte les éléments suivant :

- Milieu amplificateur (L'émission stimulée)
- Une source externe d'énergie (le pompage).
- Contre-réaction (La cavité Fabry- Pérot)

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

Le laser est constituée d'une jonction PN , de miroir réfléchissant et de miroir semi-réfléchissant, au départ la diode laser est polarisée en direct ce qui provoque la génération de premier photons par émission spontanée, ce photon est subit des réflexions multiples, causées par les deux miroirs (extrémités), c'est-à-dire qu'une partie de la lumière sort de la cavité et l'autre partie est réinjectée vers l'intérieur, le routeur à la zone actifs va provoquer le passage de l'électrons de la bande  $E_2$  à la bande  $E_1$ , il recombinaison avec la charge négative et la génération d'autre photons, ainsi pour chaque photon passe par la zone actifs il y a un recombinaison électron- trous, et donc la génération de deuxième photon ce phénomène est appelé émission stimulée.



FigureI-4:Phénomène absorption

Phénomène absorption est dû lorsque le photon absorbé provoque un saut d'électron d'un état occupé de la bande de valence vers un état vide de la bande conduction, on dit qu'il y a absorption.

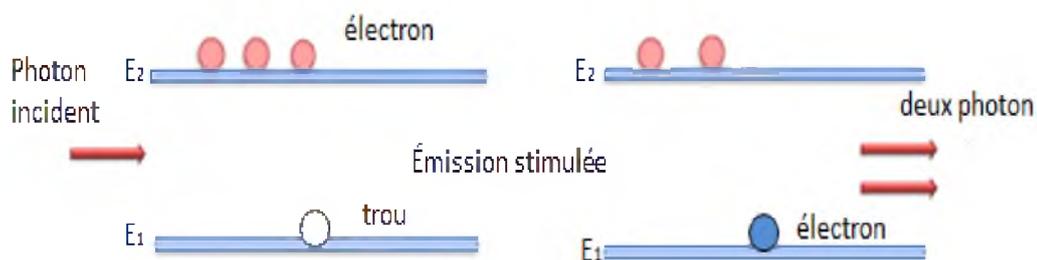


Figure I-5:Phénomène d'émission stimulée

Les quatre principaux types de lasers à semi-conducteurs sont [2] :

- Les lasers Fabry-Pérot (FP) sont peu performants en bruit mais sont peu coûteux ; ils sont multi modes et leur longueur d'onde atteint les 1550 nm; on les utilise par exemple comme source de puissance optique continue ou dans les liaisons numériques.

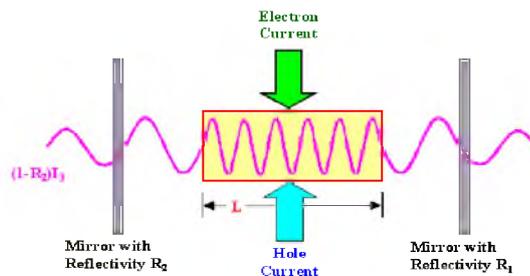


Figure I-6: Les lasers Fabry-Pérot (FP)

- Les lasers Distributed Feedback (DFB) ont de très bonnes performances en bruit et sont largement utilisés pour les télécommunications; ils sont monomodes et leur longueur d'onde atteint les 1550 nm.

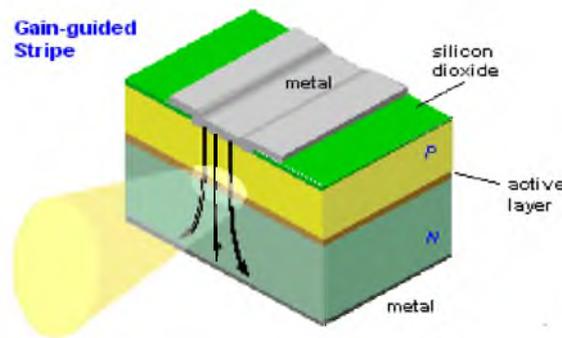


Figure I-7: lasers Distributed Feedback (DFB)

- les lasers Distributed Bragg Reflector (DBR) ; contrairement aux lasers DFB (Historiquement plus anciens), la contre-réaction ne se réalise pas à l'intérieur du milieu actif. En effet les extrémités d'un laser DBR se comportent comme des miroirs dont la réflectivité est maximale pour une longueur d'onde donnée. Ils restent plus difficiles à réaliser et présente un coût élevé.

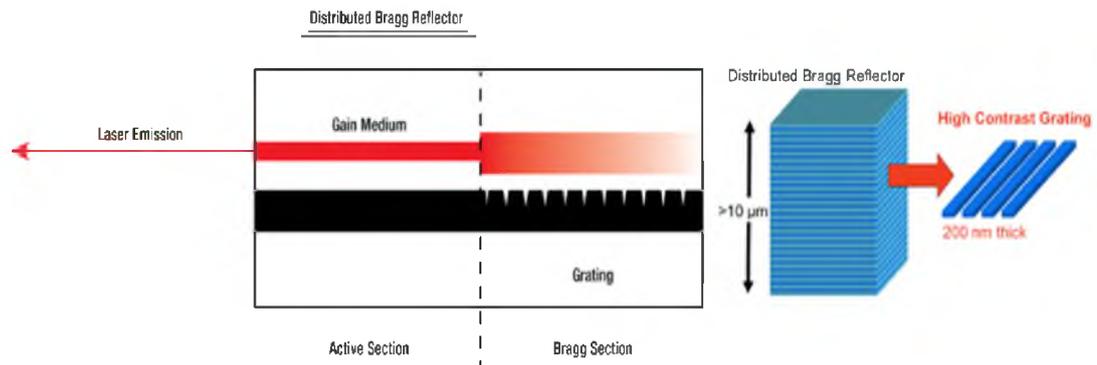


Figure I-8: les lasers Distributed Bragg Reflector (DBR)

- Les lasers Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) ; leur longueur d'onde atteint pour l'instant les 1550 nm et leur intérêt principal est d'être plus adapté à la fabrication en grand nombre.

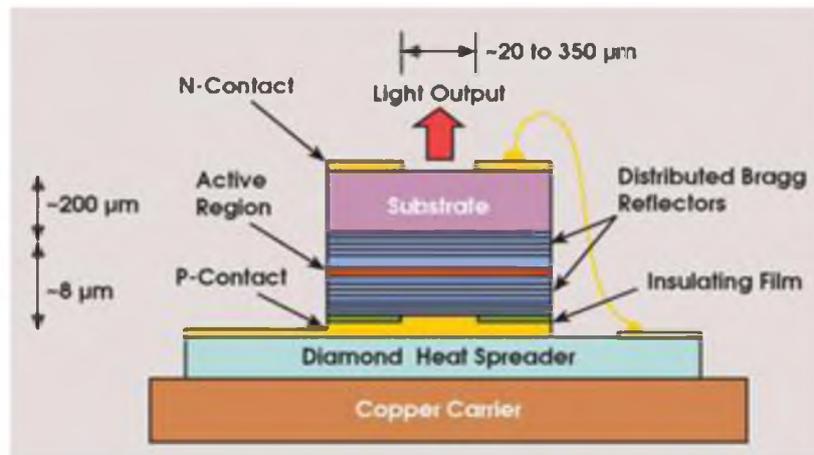
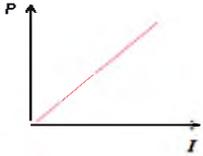
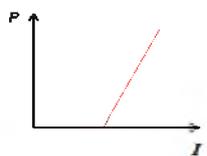


Figure I-9: Les lasers Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)

Cependant la technologie de fabrication des VCSELs à 1550 nm n'est pas encore mature, et ils présentent encore quelques inconvénients : en comparaison aux DFBs leur puissance émise est plus faible et leurs propriétés spectrales et en bruit sont moins bonnes.

Le tableau permet de comparer les ordres de grandeur des performances des différents types d'émetteurs optoélectroniques.

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

<i>Composants</i>	<i>DEL</i>	<i>DL (diode laser)</i>		
	(Diode électroluminescente)	VCSEL (cavité verticale)	Fabry- pérot	DFB
<i>Puissance optique</i>	<1 mW	Quelque mW	Quelque mW	Quelque mW
<i>Couplage dans une fibre optique</i>	Quelque % (fibre multi mode)	>50% (Fibre multi mode)	>50% (fibre monomode)	>50% (fibre monomode)
<i>Diagramme d'émission</i>	par la surface très divergence	Par la surface peut divergence	Par la tranche assez divergence	Par la tranche assez divergence
<i>Spectre et largeur spectrale</i>	Large, continu 20 à 50 nm	Une raie fine < 0,1 nm	Plusieurs rais 5 à 10 nm	une raie fine < 0,1 nm
<i>Caractéristique P(I) Courant de seuil</i>		 5 à 10 mA	 10 à 30 mA	 10 à 30 mA
<i>Fréquence max de modulation</i>	100 à 200 Mhz	10 GHz	Plusieurs GHz	Plusieurs GHz
<i>Bruit</i>	Très faible	Très faible	faible	Faible
<i>Principale longueur d'onde</i>	0,67 $\mu m$ 0,8 à 0,9 $\mu m$ 1,3 $\mu m$	0,78 à 0,9 $\mu m$	1,3 $\mu m$	1,3 $\mu m$ 1,5 à 1,6 $\mu m$
<i>coût</i>	Faible	assez faible	Moyen	Elevé

<b><i>Application</i></b>	Transmission à courte distance et analogique (sur fibre multi mode)	Capteur, lecteur optique, transmission haut débit a court distance (sur fibre multi mode et monomode)	Transmission à haut débit à moyen distance (sur fibre monomode)	Transmission très haute débit à longue distance et multiplexage en longueur d'onde (sur fibre monomode)
---------------------------	---	---	---	---

Tableau I-1: Comparaison des émetteurs optoélectronique [1]

### I.1.4 Modulateur

Le but d'un modulateur est d'adapter le signal à transmettre au canal de transmission entre la source et le destinataire (pour une transmission par fibre il est nécessaire de réaliser une conversion des données électrique en données optiques) on introduit donc deux opérations supplémentaires, entre la source et le canal appelé modulation et entre le canal et la destination appelée démodulation.

Il existe deux types de modulation directe et externe.

Dans la modulation directe, on modifie le courant dans la diode laser (DL, ou dans la diode électroluminescente (DEL), tandis que pour la modulation externe, il faut un dispositif séparé appelé modulateur externe. La modulation directe offre l'avantage d'être simple et peu coûteuse, en plus elle nécessite une tension réduite (la tension appliquée n'est que de 2 à 3 Volts) et une puissance faible. Cependant, elle présente des inconvénients liés aux oscillations de relaxation, *chirp*, bruit, ... En effet, la modulation d'intensité s'accompagne d'une modulation parasite de fréquence optique (ou de longueur d'onde) désignée sous le nom de « *chirp* » [3].

Dans le cas de la modulation externe, divers types de modulation sont possibles : modulation d'amplitude, de phase, de polarisation, d'impulsion ... Ce type de modulation permet d'obtenir de très grands débits. Avant de décrire la modulation, examinons quelques particularités et/ou caractéristiques des différentes modulations. Comme la sortie d'un laser à semi-conducteurs possède une longueur d'onde qui varie dans le temps à cause de la variation dans le temps du bruit et de la température,

la modulation de fréquence et la modulation de phase sont assez difficiles à expliquer à cause de la non-cohérence de la lumière laser utilisée dans la communication optique [4]. On peut, à coup sûr, utiliser en pratique les modulations d'amplitude et d'impulsion

### I.3.2 Le support de transmission

La fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de la lumière entre deux lieux distance de plusieurs centaines vers million de kilomètres. Par comparaison aux autres supports de transmission existants, la fibre optique présente de nombreux avantages.

- très faible atténuation sur une grande distance.
- grande bande passante, et donc une grande capacité
- multiplexage en longueur d'onde possible
- taille réduite, grande souplesse, faible poids.
- La sécurité de l'installation et la maintenance
- insensible aux parasites et n'en crée pas, inviolabilité presque totale.
- coût global du système souvent inférieur à celui d'un système " sur cuivre "

#### I.3.2.1 Structure de la fibre optique

La fibre optique qui se présente comme un fil fin de verre est en réalité constituée d'un cœur cylindrique en matériau transparent d'indice de réfraction  $n_1$ , entouré d'une gaine concentrique constituée d'un matériau ayant un indice de réfraction  $n_2$  inférieur à  $n_1$ . Le diamètre du cœur varie de 8-10  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$  selon le type de fibre. Celui de la gaine est de l'ordre de 125  $\mu\text{m}$ . Les valeurs typiques d'indices de réfraction pour le cœur :  $n_1 \cong 1,48$ , pour la gaine :  $n_2 \cong 1,46$  [5]. La fibre est protégée extérieurement par un revêtement dit primaire, réalisé en général par un matériau plastique.

**-Cœur:** Milieu diélectrique intérieur, conducteur de la lumière ou sera confiner la plus grande partie de l'énergie lumineuse véhicule dans la fibre d'indice de réfraction  $n_1$ .

- **Gaine:** Entoure le cœur d'un milieu diélectrique, d'indice de réfraction  $n_2$  plus faible. Les pertes des rayons lumineux se produisent dans la gaine.

- **Revêtement de protection :** Assure une protection mécanique de la fibre.

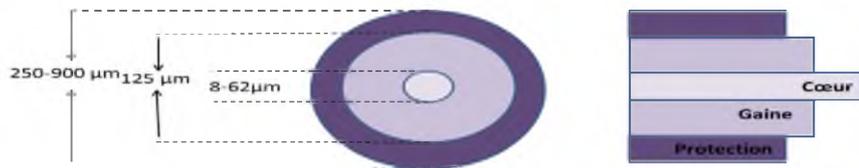


Figure I-10 : Structure de la fibre optique

Le cœur et la gaine optique sont responsables de la propagation du signal lumineux au sein de la fibre.

### I.3.2.2 Propagation de la lumière dans une fibre optique

L'onde se propage dans le cœur par réflexion successive sur l'interface cœur-gaine. Elle décroît dans la gaine jusqu'à presque s'annuler sur l'interface gaine-air.

Un milieu de propagation quelconque est caractérisé par ces trois paramètres :

La permittivité  $\epsilon(\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r)$ , la perméabilité  $\mu(\mu = \mu_0 \cdot \mu_r)$  et la conductivité donc à partir des deux premiers paramètres on définit l'indice de réfraction  $n$  du milieu qui est donnée par l'expression suivantes :

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad \text{I-1}$$

L'indice de réfraction  $n$  permet de déterminer la vitesse de propagation de l'onde dans ce milieu. Cette vitesse est donnée par la relation suivantes

$$v = c/n \quad \text{I-2}$$

ou  $v$  est la vitesse de l'onde dans un milieu d'indice  $n$ .

Nous avons vu ci-dessus qu'une fibre est constituée de deux milieux d'indices optiques différents : le cœur central et la gaine optique d'indice de réfraction noté respectivement  $n_1$  et  $n_2$ , avec  $n_1 > n_2$ .

la relation liant les indices de refraction  $n_1$  et  $n_2$  de chacun des milieux et les angles incident  $i_1$  et réfracté  $i_2$  sont liés par la relation de Snell-Descartes :

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad \text{I-3}$$

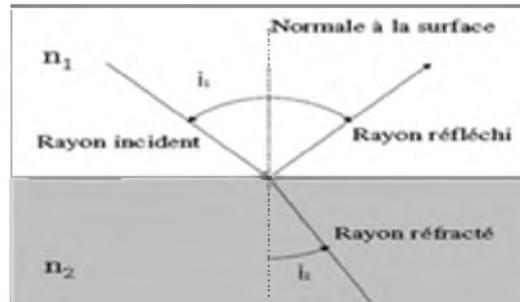


Figure I-11 : Réflexion et réfraction d'un rayon incident sur la surface de séparation des deux milieux.

Dans le cas où l'angle d'incidence respecte la condition suivante :

$$\theta_i > \text{arc sin} \frac{n_1}{n_2} \quad \text{I-4}$$

Alors le rayon n'est plus réfracté mais réfléchi. En rajoutant un deuxième milieu d'indice  $n_2$ , le rayon optique se trouve alors piégé dans le milieu  $n_1$  par des réflexions successives aux interfaces (entre le cœur et la gaine dans une fibre optique) comme le montre la figure suivante :

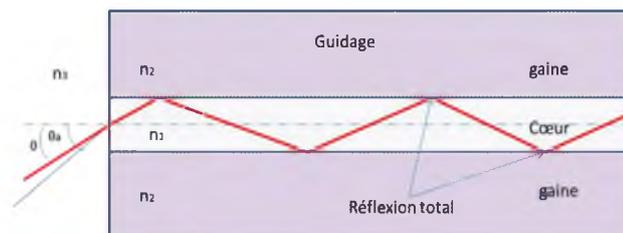


Figure I-12: Guidage de la lumière dans le milieu d'indice  $n_1$  par réflexion totale interne.

On parle alors de guidage par réflexion totale interne. Pour les fibres optiques, une grandeur supplémentaire est introduite concernant l'angle d'incidence du rayon sur la face d'entrée de la fibre noté  $\theta$ . Elle découle de l'équation I-5 et stipule que si l'angle d'incidence  $\theta$  est inférieur à l'angle critique (ou angle d'acceptante) noté  $\theta_a$  et défini par [6]:

$$\theta_a = \arcsin \left( \left[ \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_3^2} \right]^{1/2} \right) \quad \text{I-5}$$

Le rayon sera uniquement guidé dans le cœur. On définit alors la notion d'ouverture numérique (ON) par la relation I-6, dans le cas où le milieu d'indice  $n_3$  est l'air [6] :

$$ON = \sin(\theta) = \sqrt{n_c^2 + n_g^2} \quad \text{I-6}$$

### I.3.2.3 Type de fibre optique

Les fibres optiques sont classées en deux catégories selon le diamètre de leur cœur et la longueur d'onde utilisée. Nous citons :

#### I.3.2.3.1 Les fibres monomode

Les fibres monomodes avec un seul signal qui se propage de ce cas le diamètre de cœur est faible de 5 à 10 microns, par rapport au diamètre de la gaine (125 microns), elle est utilisée pour les longues distances.

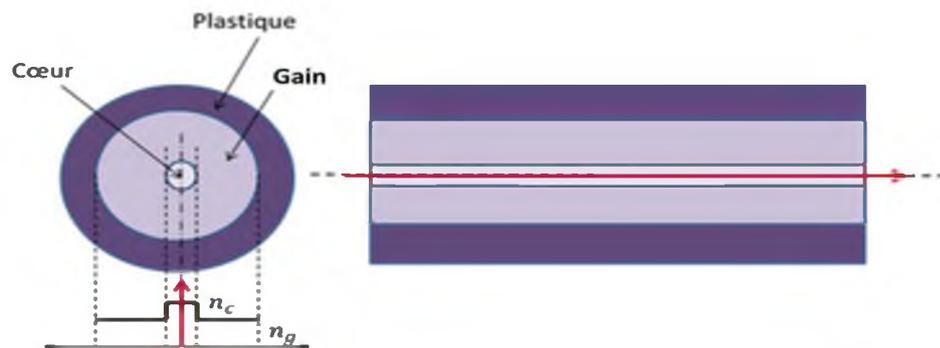


Figure I-13 : Structure de la fibre monomode

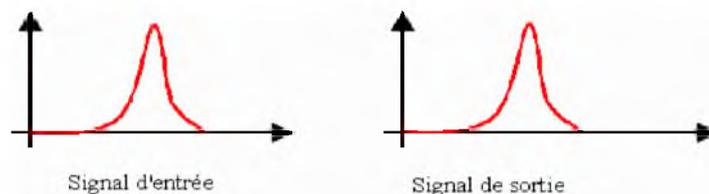


Figure I-14 : Étalement du signal optique dans une fibre monomode

L'onde se propage alors sans réflexion et il n'y a pas de dispersion modale. Le petit diamètre du cœur des fibres monomodes nécessite une grande puissance d'émission qui est délivrée par des diodes laser. Les caractéristiques essentielles d'une fibre optique monomode pour la transmission d'un signal sont :

- l'affaiblissement (dB) par unité de longueur (Km), qui est fonction de la longueur d'onde, soit 0,36 dB/Km à 1300 nm et 0,2 dB/Km à 1550 nm,
- La dispersion chromatique, qui conduit à un élargissement d'une impulsion lumineuse du fait de la variation des vitesses de propagation, ce qui est pénalisant dans le cas d'une modulation directe (1 ou 0) du signal optique,
- la dispersion des modes de polarisation (PMD), qui se caractérise par un étalement spectral en ligne,
- la longueur d'onde de coupure [7].

#### **I.3.2.3.2 Les fibres multi-mode**

Dans ce type de fibre il y a plusieurs signal qui se propage à l'intérieur de cœur leur diamètre est de l'ordre de 50 à 85 microns. La lumière se propage jusqu'à l'autre extrémité grâce aux réflexions totales entre les deux interfaces cœur et de gaine.

Plusieurs modes (chemins optiques) se propagent dans ce type de fibre optique. Selon les différents chemins empruntés par les rayons, ils arrivent avec des temps différents. Ce qui provoque une forte dispersion du signal lumineux, due à la multiplication des modes de propagations (dispersion modale) [8].

Ce type de fibre utilisé pour les courtes distances, on distingue deux types des fibres les fibres à saut d'indice et les fibres à gradient d'indice.

##### **A. Fibres à saut d'indice**

Dans ce type de fibre l'indice de réfraction reste constant dans tout le cœur de la fibre, et à l'interface gaine cœur il décroît brusquement en effectuant un saut d'indice dans la gaine.

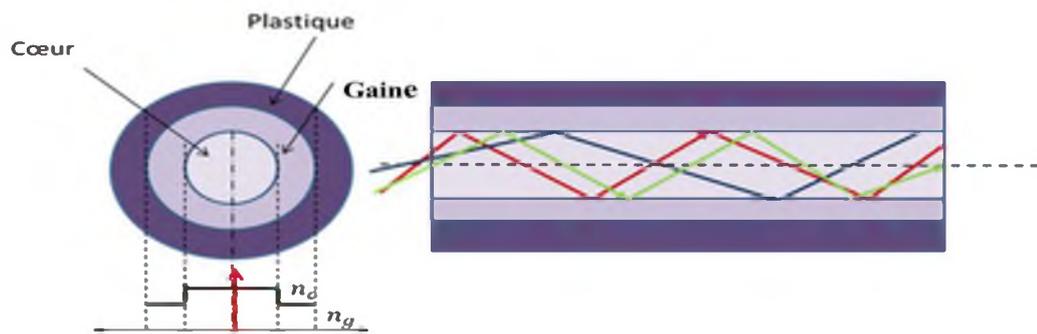


Figure I-15: Structure de la fibre à saut d'indice

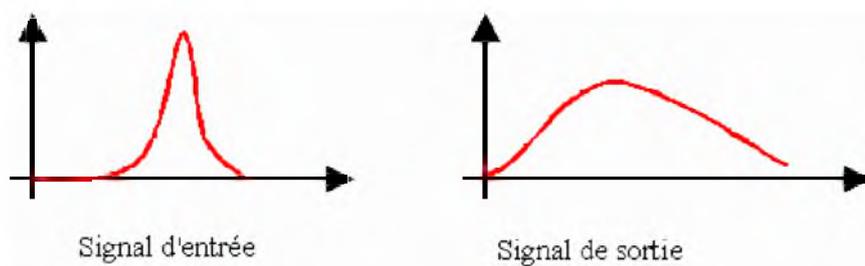


Figure I-16: Étalement du signal optique dans une fibre à saut d'indice.

### B. Fibre à gradient d'indice

Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction  $n$  n'est pas constant dans le cœur ; bien au contraire il décroît graduellement du centre du cœur jusqu'à la limite de la surface qui sépare le cœur et la gaine.

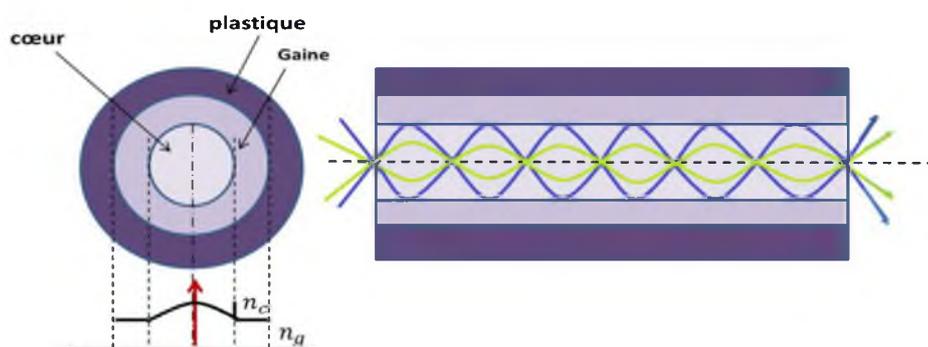


Figure I-17 : Structure de la fibre à gradient d'indice

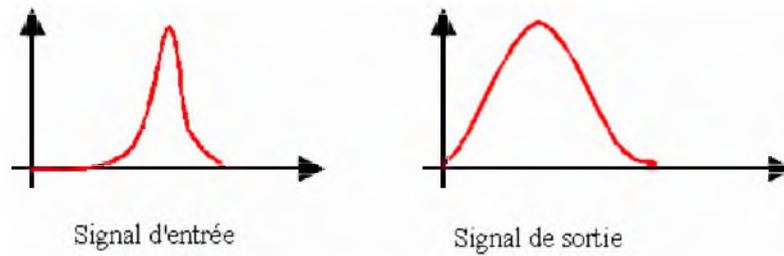


Figure I-18 : Etallement du signal optique dans une fibre à gradient d'indice

### I.3.2.4 Caractéristique des fibres optiques

#### I.3.2.4.1 Atténuation dans la fibre optique

L'atténuation caractérise l'affaiblissement de l'amplitude du signal ou cour de sa propagation, elle est donnée en dB par Km.

$$\alpha = -\frac{10}{l} \log \frac{P_s}{P_E} \quad \text{I-7}$$

$\alpha$ : Coefficient d'atténuation,

$P_E$ : La puissance d'entrée de la lumière

$P_s$ : La puissance de sortie de la lumière

$l$ : Longueur de fibre.



Figure I-19 : Atténuations dans la fibre optique [8]

Les différentes causes d'affaiblissement sont:

- une courbure trop prononcée qui augmente les pertes par réflexion.
- L'affaiblissement par absorption atomique ou électronique. Elle est due aux impuretés. Région infrarouge

- Par absorption moléculaire. Elle est aussi due aux impuretés du cœur. Région Infrarouge.
- Par diffusion de Rayleigh. Elle est due aux variations de l'indice au niveau microscopique.

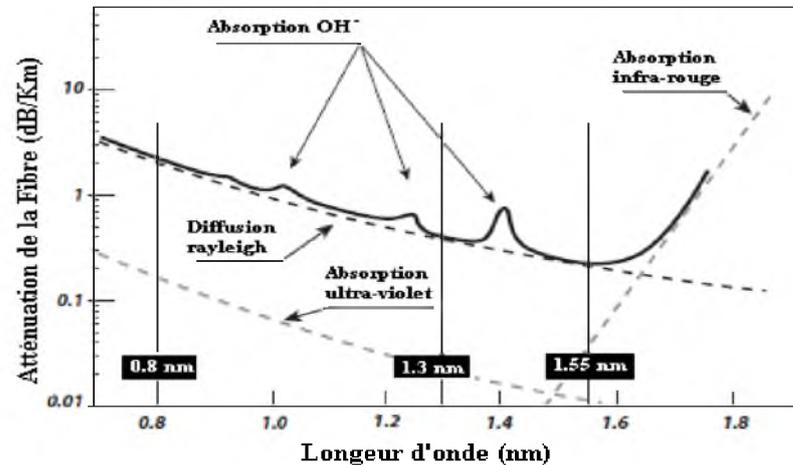


Figure I-20 : Atténuation d'une fibre optique [3].

On remarque l'existence de trois fenêtres spectrales, régions où l'atténuation est minimale.

Les fibres optiques fonctionnent actuellement dans ces trois fenêtres : elles définissent donc les gammes d'ondes utilisées en communication optique. On les appelle « fenêtres optiques» [1].

- **Première fenêtre :  $800 < \lambda < 900 \text{ nm}$** 
  - atténuation très élevée de l'ordre de 4 dB/Km
  - Dispersion élevée (forte)
  - composant optique moins cher
  - Utilise les fibres multi mode
- **Deuxième fenêtre  $\cong 1300 \text{ nm}$  les composant**
  - Les composants optoélectronique chers
  - Atténuation est convenable
  - Dispersion chromatique minimal (quasi nulle)
  - Utilise les fibres multi mode et monomode

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

- **Troisième fenêtre :  $1550 < \lambda < 1600$  nm.**
- Atténuation minimal (très faible : 0,2 dB/km)
- le laser et l'amplificateur performant
- existence de système optique plus performant
- Utilise les fibres multi mode

#### I.3.2.4.2 La dispersion

Lorsqu'un signal propage dans un milieu optique, elle subit à un élargissement temporel que l'on appelle phénomène de dispersion temporel qui limite le débit d'information de celle-ci (figure I-21).

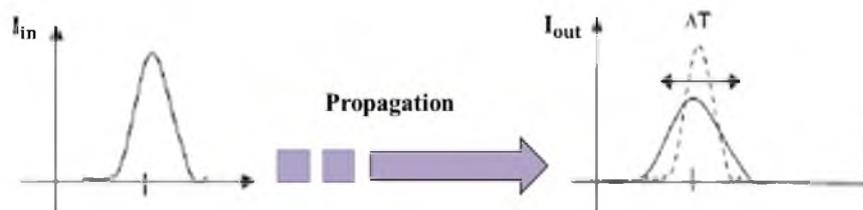


Figure I-21: Évolution de l'impulsion pendant sa propagation dans la fibre optique

Plusieurs types de dispersion existent, contribuant tous à l'étalement de l'impulsion au cours de sa propagation dans le guide :

**La dispersion intermodale** : elle n'est présente que dans les fibres multi-modes car il s'agit d'une dispersion liée au fait que les modes de la structure ne se propagent pas à la même vitesse [9].

#### **La dispersion chromatique**

La dispersion chromatique caractérise l'étalement du signal lié à sa largeur spectrale. Cette dispersion dépend de la longueur d'onde considérée et résulte de la somme de deux effets : la dispersion propre au matériau et la dispersion du guide.

**La dispersion du matériau** : elle traduit le fait que la silice, qui compose majoritairement la fibre, possède un indice optique, l'indice de réfraction, qui varie en fonction de la longueur d'onde. Cette dépendance de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde induit une modification de la vitesse de groupe propre au milieu et doit être incluse dans les lois de propagation de la lumière dans le guide [9].

$$D_{mat} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{dV^2} \text{ [ps/(nm . Km)]} \quad \text{I-8}$$

Avec  $n_1$  l'indice du cœur de la fibre proche de l'indice effectif  $n_e$

**La dispersion du guide** : le fait que les ondes se propagent dans un guide et non dans un milieu illimité entraîne une dépendance de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde. Cette influence du guidage correspond à une nouvelle contribution à l'évolution spectrale des temps de groupe [9].

$$D_{guide} = \frac{\tau_{guide}}{\Delta \lambda L} = -\frac{n_1 \Delta}{c \lambda} V \frac{d^2(VB)}{dV^2} \text{ [ps/(nm . Km)]} \quad \text{I-9}$$

Avec :  $b$  la constante de propagation normalisée,  $V$  la fréquence spatiale normalisée et  $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$  la différence d'indice relative.

La dispersion chromatique s'exprime sous la forme suivante :

$$D_{ch} = -\frac{n_1 \Delta}{c \lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \text{ [ps/(nm . Km)]} \quad \text{I-10}$$

### I.3.2.5 Répéteur ou régénérateur de signal

En général dans un système de transmission d'une fibre optique en place après une distance de 80 à 100 Km des répéteurs qui pour rôle d'amplifier le signal et corrigé la dispersion et ré-synchronisation, il existe deux solutions d'ingénierie d'un répéteur :

- solution électro-optique : le faible signal optique reçu est converti en signal électrique par un photo-détecteur, est électriquement amplifié et module un faisceau LASER en sortie (conversion électrique-optique)
- Solution purement optique : le faible signal reçu est mélangé avec le signal issu d'un LASER optique et amplifié par un amplificateur optique.

### I.3.2.5.1 Amplificateur optique

Les amplificateurs optiques sont désormais un vrai choix à la solution lourde, complexe et coûteuse des répéteurs-régénérateurs. Ils ont pris leur place puisqu'ils permettent l'amplification simultanée des canaux WDM et d'échapper à la limitation de la capacité de transmission due à l'électronique.

Un amplificateur optique est un composant qui permet d'amplifier le signal lumineux dans le but de battre le phénomène d'atténuation sans transformation électro /optique, Il n'est rien qu'un laser son contre réaction optique, leur principe de fonctionnement repose sur l'émission stimulée.

Le choix d'un amplificateur optique doit cependant se faire en fonction de son rôle. Il peut servir d'amplificateur de puissance en émission (booster), de préamplificateur en réception ou d'amplificateur en ligne. Selon l'utilisation qui en est faite, les paramètres diffèrent. On demandera par exemple à un amplificateur de puissance d'être capable de délivrer une puissance de sortie élevée et ses caractéristiques de bruit seront assez peu critiques, tandis qu'un préamplificateur doit être le moins bruyant possible. L'amplificateur en ligne sera un compromis à tout cela afin à la fois de ne pas dégrader la qualité du signal transmis et allonger la distance de transmission.

## I.3.3 L'interface optique de réception

Le rôle de la partie de réception c'est de recevoir le signal optique provient de la fibre et le convertir en signal électronique il existe des composant essentiel dans cette parties tel que la photodiode ;

### I.3.3.1 La photodiode PIN

Une photodiode fonctionne en réception comme générateur de courant elle convertit la puissance optique incidente en courant électrique  $I_{ph}$  ce courant ensuite convertit par la résistance de charge  $R_i$  en tension puis amplifie avant de soumettre à un traitement électronique

Une photodiode est un composant essentiel dans les communications par fibres optique. Elle fonctionne en réception comme générateur de courant. Elle convertit, avec un certain rendement, la puissance optique  $P_{op}$  incidente en courant électrique  $I_{ph}$  qui est ainsi délivré par la photodiode. Ce courant est ensuite converti en tension par une résistance de charge  $R_1$  puis amplifié avant de subir un traitement électronique [10].

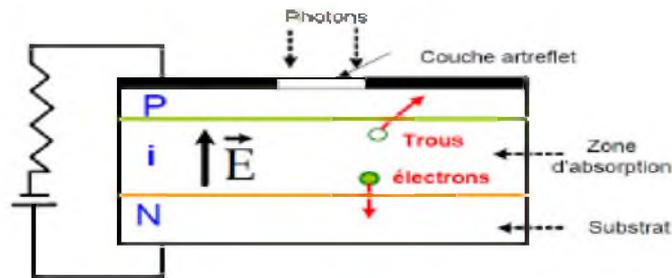


Figure I-22 : Structure d'une photodiode PIN

Les photodiodes PIN sont réalisées à partir d'une jonction PN polarisée en inverse. Dans une telle jonction, il existe une zone déserte (sans porteurs libres) où règne un champ électrique qui s'oppose au passage des porteurs majoritaires.

Lorsqu'un photon incident est absorbé, des paires de porteurs, sont générées aussi bien dans la zone désertée qu'en dehors de celle-ci (zone de diffusion).

Dans la zone désertée, les porteurs sont dissociés par le champ électrique qui déplace chaque porteur vers la région où il est majoritaire et crée ainsi un courant de déplacement.

Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode PIN sont la sensibilité et le courant d'obscurité.

La notion de sensibilité  $S_\lambda$  est le rapport entre la puissance lumineuse incidente  $P_{op}$  et la courante photo générée  $I_D$ :

$$I_{ph} = S_\lambda \times P_{op} \quad \text{I-11}$$

La photo courant  $I_{ph}$  est directement proportionnel à la puissance lumineuse incidente selon la relation

$$I_{\text{photogénère}} = S_{\lambda} \times P_{op} + i_{abs} \quad \text{I-12}$$

### I.3.3.2 Photodiode à avalanche PDA

En faisant croître le champ électrique dans la jonction PIN, l'énergie des porteurs s'élève, jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaîne se produisent alors et les porteurs se multiplient. Ces photo détecteurs à gain interne est appelées photodiode à avalanche ou PDA (en anglais APD).

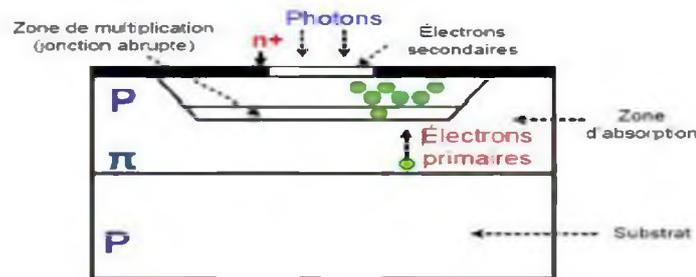


Figure I-23 : Photodiode à avalanche (APD).

Lorsque le champ électrique existant dans la zone désertée est suffisamment intense (polarisation inverse) les porteurs accélérés par ce champ peut atteindre l'énergie d'ionisation du matériau et produire la rupture des liaisons de valence. Il y a, dans ce cas, création d'autres paires secondaires (électrons-trous) qui, dissociées par le champ interne, sont accélérés et accentuent le processus d'avalanche [11].

Type de photodiode caractéristiques	PIN	Avalanche
Tension de commande (V)	Faible	Elevé
Fréquence de coupure (GHz)	>60	Quelque
Rendement quantique (%)	Faible	Elevé
Bande passante (GHz)	Large	Faible
Longueur d'onde (nm)	1300 et 1550	1300 et 1550

Tableau 02: comparaison entre photodiode PIN et PDA [12]

### I.3.3.3 Le filtre électrique

Le filtrage a pour objet de limiter l'occupation spectrale d'un signal. La séparation spectrale est réalisée en réfléchissant une certaine gamme de longueurs d'onde et en transmettant les autres. On caractérise donc le filtre par sa bande passante, c'est-à-dire le domaine de fréquence (ou de longueurs d'onde) pour lequel il laisse passer la lumière et par sa bande atténuée, c'est-à-dire le domaine de fréquence (ou de longueurs d'onde) pour lesquelles il réfléchit la lumière incidente.

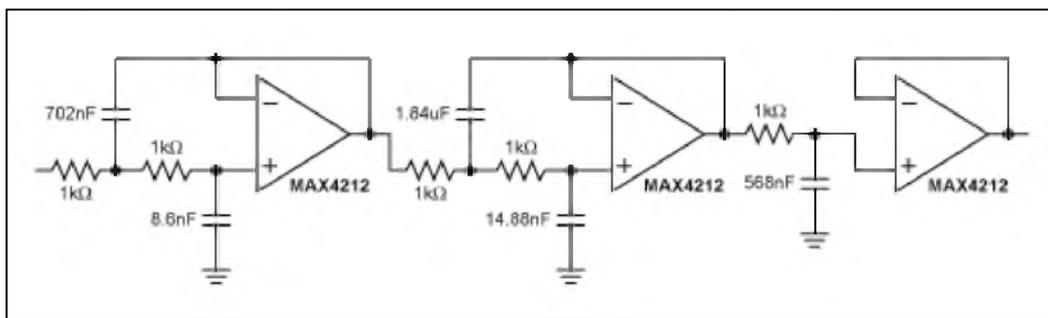


Figure I-24 Tchebychev

Ces deux domaines spectraux peuvent être très larges notamment pour les filtres passe-haut et passe-bas.

## I.3 Conclusion

Ce chapitre a été consacré sur la description d'une chaîne de transmission optique en général. Cette chaîne contient trois parties, la partie émission, le canal de transmission, et la partie réception. On a discuté l'ensemble des composants qui constituent la chaîne électrique et/ou optique, on va commencer en chapitres II par un amplificateur optique dopé erbium.

## Chapitre II

# Les amplificateurs à fibre optique dopé en erbium $\text{Er}^{+3}$

## II.1 Introduction

La section précédente a été consacrée à l'étude des composants passifs. Un autre élément essentiel d'un laser et le milieu de gain. Dans le cas qui nous intéresse, le milieu amplificateur est l'ion erbium qui est incorporé dans une fibre optique de silice. Il semble donc essentiel d'en introduire les principales propriétés physiques. Nous discuterons ici de différentes caractéristiques d'un milieu de gain erbium comme sa propriété d'élargissement homogène, ces sections efficaces ou sa propriété de milieu de gain à trois niveaux.

## II.2 L'amplificateur optique dopé à l'erbium

### II.2.1 Définition

Les amplificateurs à fibre dopée ont été introduits dès 1964 et commercialisés au début des années 1990. 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 à une concentration de 0.1 % environ. Le dopant le plus utilisé est l'erbium qui permet d'obtenir du gain sur la fenêtre spectrale «C» qui couvre les longueurs d'onde de 1528 à 1563 nm. 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 (approximativement 1.27 eV) dit excité. Le passage d'un photon dans la bande de gain stimule les ions excités à relâcher des photons de même longueur d'onde, même phase, même état de polarisation, et même directivité spatiale que le photon incident [13].

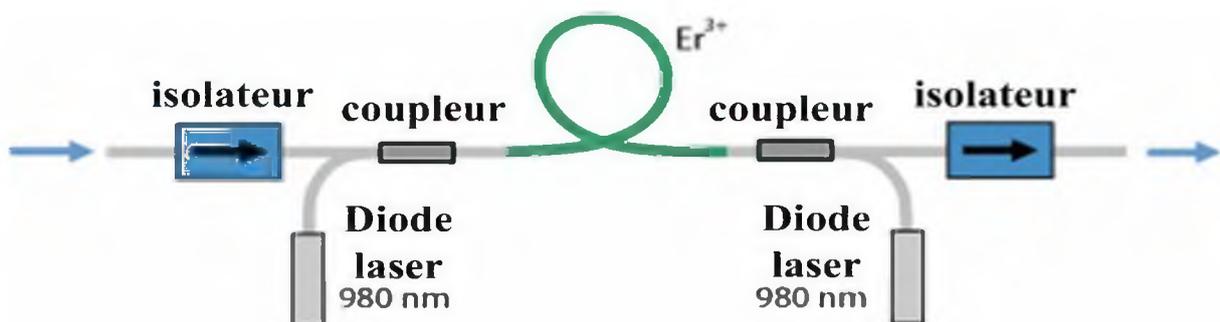


Figure II.1 : structure de l'amplificateur à fibre optique dopé en erbium [14]

On retrouve le phénomène d'amplification par émission stimulée La nature de la radiation (relaxation d'ions) fait que la dynamique de ce milieu est généralement plus lente que celle des amplificateurs à semi-conducteur.

**II.2.2 Notion des terres rares**

Dans la classification périodique des éléments, les terres rares appartiennent à la famille des lanthanides (figure II.2). La configuration électronique de ces éléments est la suivante :  $[Xe] 6s24f0-145d0-1$  . Leurs couches internes possèdent la même configuration que le Xénon (Xe). Les couches externes constituées des couches 6s, 4f et 5d sont à l'origine des propriétés optiques des lanthanides. Le remplissage de ces couches respecte la règle de Klechkowski La couche 6s étant saturée, la couche 4f se remplit progressivement jusqu'à saturation (soit 14 électrons) puis commence le remplissage de la couche 5d. Seuls le Lanthane et le Gadolinium font exception puisque que leurs couches 5d portent un électron alors que leurs couches 4f sont non saturées. L'ionisation de ces éléments donne généralement lieu à la formation d'ions trivalents (3+), les électrons étant « prélevés » sur les couches 6s et 4f.

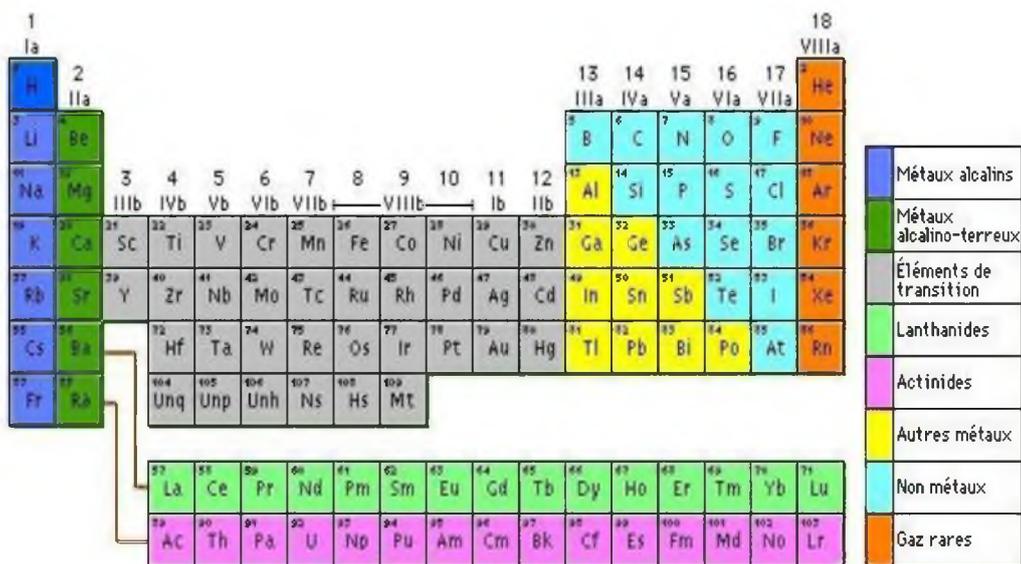


Figure II-2 : Tableau périodique des éléments

Le dopant le plus utilisé parmi les 15 éléments de terre rare est l'erbium qui permet d'obtenir du gain sur la fenêtre spectrale «C» qui couvre les longueurs d'onde de 1528 à 1563 nm.

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 (Approximativement 1.27 eV) dit excité. Le passage d'un photon dans la bande de gain stimule les ions excités à relâcher des photons de même longueur d'onde, même phase, même état de polarisation, et même directivité spatiale que le photon incidente on retrouve le phénomène d'amplification par émission stimulée[15].

#### II.2.4 Principe de fonctionnement

Le milieu est encore la fibre sauf que l'amplification se fait grâce aux éléments terre rare qui la dopent les longueurs d'ondes d'amplification et la bande spectrale de gain dépendent par conséquent de l'ion dopant l'erbium est le principal élément utilisé dans les systèmes de transmission car il est opéré des longueurs d'ondes proches de la troisième fenêtre des télécommunications.

Les propriétés des fibres dopées erbium sont dues à l'exploitation des différents transitions entre les niveaux d'énergie de l'ion  $\text{Er}^{3+}$  en effet dans un modèle théorique qui permet de décrire l'amplification erbium et qui correspond à la majorité des configurations utilisant le dopage erbium ces transitions peuvent être présentées comme sur la figure suivante.



Figure II-3 : principe de fonctionnement d'EDFA

Le signal et la pompe sont tous les deux introduits dans le milieu amplificateur l'énergie de la pompe est absorbée par la transition le l'électron du niveau fondamentale  $I_1 >$  vers le niveau existé  $I_3 >$  ou l'énergie pour passer d'un niveau à l'autre est liée à la longueur d'onde de la pompe de quantification  $E = hv_{pompe}$  il se produit ensuite une désexcitation non radiative vers le niveau  $I_2 >$ .

Enfin l'électron retourne à l'état fondamental en perdant de l'énergie via l'émission d'un photon dont la longueur d'onde correspond cette fois à celle du signal. Le signal est donc amplifié puisqu'il y a transfert de l'énergie de la pompe vers celle du signal.

Le signal de pompe peut se protéger dans le même sens que celui du signal à amplifier on parle alors de configuration de propagation directe ou encore dans le sens opposé on parle dans ce cas de configuration de propagation inverse. Les gains obtenus avec les EDFA peuvent atteindre 45dB et la puissance de saturation varient entre 0 et 10 mW les performances offertes par l'amplificateur EDFA en font un composant idéal pour les systèmes de communication à fibre optique [16].

L'avantage de cet amplificateur est que l'énergie dégagée par cette réaction chimique va amplifier tous les canaux qui constituent la fibre.

### II.2.5 Système à deux niveaux [18]

Ils existent trois types de transitions dans les niveaux d'énergie

#### II.2.5.1 L'absorption

Soit un rayonnement électromagnétique incident d'énergie résonante tel que  $\Delta E = E_2 - E_1 = hv$ . L'atome, initialement dans un état d'énergie  $E_1$ , passe alors dans un état d'énergie supérieure  $E_2 > E_1$ . Les électrons qui sont dans l'état fondamental vont absorber la lumière incidente ce qui va les amener dans un niveau d'énergie supérieur, on dit que les électrons sont dans un état excité.

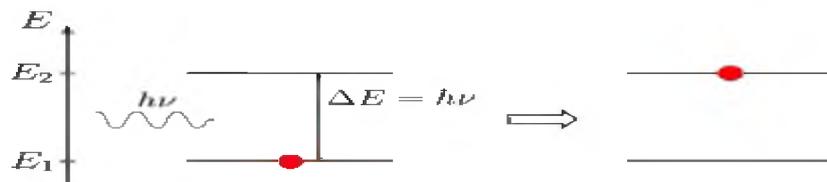


Figure II-4 : absorption

$N_1$  représentant la population d'électrons du niveau fondamental et  $N_2$  la population du niveau excité On définit le taux de transition  $W_{12}$  en  $s^{-1}$  entre les deux niveaux pour une longueur d'onde particulière tel que :

$$W_{21} = \frac{\sigma_{12} * I}{h * \nu} \tag{II-1}$$

$h$  : constant de Planck

$\nu$  : la fréquence du faisceau arrivant

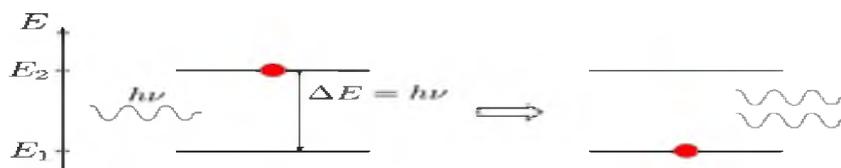
$\sigma_{12}$  : la section efficace d'absorption

$I$  : L'intensité du faisceau

La section efficace d'absorption représente le taux d'absorption et le nombre de photons par unité de surface et par unité de temps.

### II.2.5.2 Émission stimulée

Ce phénomène est le processus inverse de l'absorption.



FigureII-5 : principe de l'émission stimulée

Elle a pour taux de transition :

$$W_{21} = \frac{\sigma_{21} * I}{h * \nu} \tag{II-2}$$

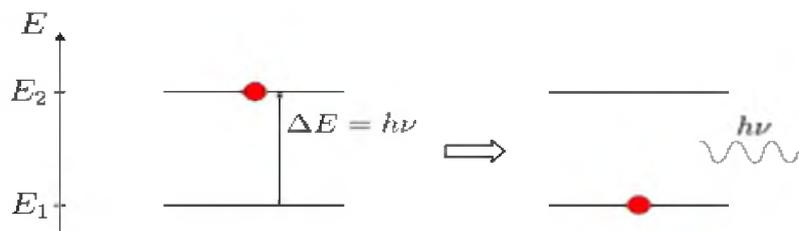
$\sigma_{21}$  : La section efficace d'émission en  $m^2$ .

**II.2.5.3 Désexcitation (émission) spontanée:**

**II.2.5.3.1, Radiative**

L'électron passe de façon spontanée (aucune influence extérieur) d'un niveau d'énergie supérieur  $E_2$  à un niveau inférieur  $E_1$  en retombant dans son état fondamental l'électron émet un photon d'énergie  $h\nu = E_2 - E_1$ .

Cette émission lumineuse est appelé fluorescence.



FigureII-6 : Désexcitation radiative.

On peut définir ici le taux d'émission spontanée  $A_{21}$  en  $s^{-1}$  qui est inversement proportionnel à la durée de vie du niveau excité:

$$A_{21} = \frac{1}{\tau} \tag{II -3}$$

Avec  $\tau$  : la durée de vie en seconde.

**II.2.5.3.2 Non radiative**

Cette transition se passe comme celle vue au-dessus sauf que lorsque l'électron arrive sur le niveau fondamental sans émette aucun photon.

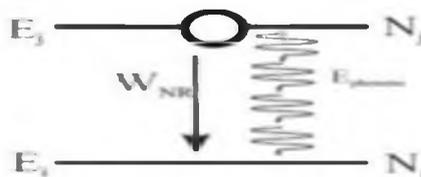


Figure II-7: Taux de transition entre niveaux d'énergie.

### II.2.6 Principe d'un système à trois niveaux

Il n'est pas possible d'avoir en réalité un système à deux niveaux d'énergie car cela nécessitent que les sections efficaces d'absorption et d'émission doivent être égaux. Pour cela il faut introduire un système à 3 niveaux d'énergie. Prenons le cas de l'ion Erbium.

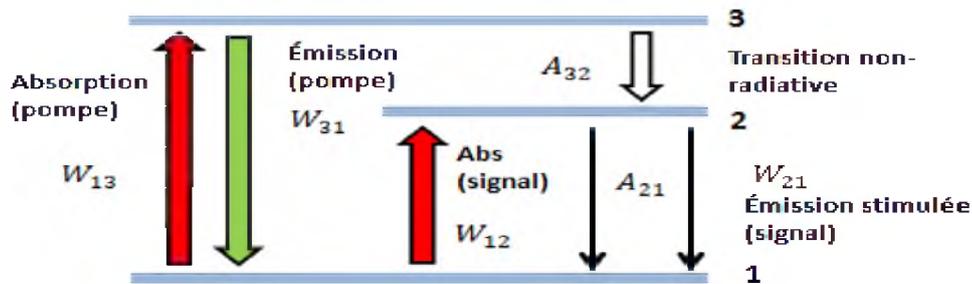


Figure II-8 : système à 3 niveaux d'énergie

On peut observer sur la figure II-8 :

- l'état (1) représente le niveau fondamental
- l'état (2) représente le niveau métastable
- l'état (3) représente le niveau excité (ou niveau de pompe)

Pour amener les électrons d'un niveau fondamental à un niveau d'énergie haut (3) il faut effectuer un pompage optique par l'intermédiaire d'une diode laser de pompe à 980nm ce qui va induire un phénomène d'absorption et permettre d'apporter suffisamment d'énergie. Ainsi les électrons se trouvent dans un niveau excité pendant une période extrêmement courte pendant laquelle ils vont subir une transition non radiative très rapide (sans émission de photon) vers un niveau vers un niveau (2) métastable.

Étant donné que ce niveau à une grande durée de vie par rapport au niveau (3), un grand nombre d'électrons vont pouvoir s'accumuler sur cet état et si la pompe est suffisamment intense, il y aura d'avantage d'électrons dans le niveau (2) que dans le niveau fondamental (1).

C'est par ce processus que s'effectue l'inversion de population. Donc à l'arrivée d'un photon incident (photon provenant du signal) le phénomène de l'émission stimulée se produira ce qui

donner a naissance à un second photon identique au premier et ainsi de suite, dès lors notre signal est amplifié

### II.2.6.1 Equation d'évolution du système à 3 niveaux

Comme nous l'avons mentionné précédemment plusieurs mécanismes se produisent lorsqu'un rayonnement vient interagir avec les ions erbium (absorption, transition non-radiative, émission...) ces phénomènes vont influencer la population d'électrons issue de chaque niveau d'énergie ce qui généré des équations de populations soient  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_t$  les populations des niveaux 1,2,3 et la population totale.

Ainsi nous avons les équations d'évolution des populations suivantes :

$$N_t = N_1 + N_2 + N_3 \quad \text{II-4}$$

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = N_1 * W_{13} - N_3 * W_{31} - N_3 * A_{32} \quad \text{II-5}$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = N_1 * W_{12} - N_2 * W_{21} - N_2 * A_{21} + N_3 * A_{32} \quad \text{II-6}$$

Dans un amplificateur, l'évolution des populations dans les niveaux d'énergie atteignent un régime stationnaire ( $W_{13} \neq 0$  pour  $t < 0$ ), donc les dérivées temporelles de  $N_2$  et  $N_3$  sont nulles.

En faisant les approximations  $A_{32} \gg W_{13}$ ,  $W_{13} \approx W_{31}$  on obtient:

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = 0 \Leftrightarrow N_1 * W_{13} - N_3 * A_{32} = 0 \Leftrightarrow N_3 * \frac{W_{13}}{A_{32}} \quad \text{II-7}$$

Donc

$$N_1 \gg N_3 \Leftrightarrow N_t \approx N_1 + N_3$$

On peut négliger  $N_3$  dans l'expression de  $N_t$  car la durée de vie du niveau 3 de l'erbium (de l'ordre de  $10\mu s$ ) est très petite devant la durée de vie des autres niveaux.

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = 0 \Leftrightarrow N_1 * W_{12} - N_2 * W_{21} - N_2 * A_{21} + N_3 * A_{32} = 0 \quad \text{II-8}$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = 0 \Leftrightarrow N_2 = N_t * \frac{(W_{12} + W_{13})}{(W_{21} + W_{12} + A_{21} + W_{13})} \quad \text{II-9}$$

Si nous posons comme grandeurs adimensionnées:

$$S_a = \frac{W_{12}}{A_{21}} \text{Le signal absorbé.}$$

$S_e = \frac{W_{21}}{A_{21}}$  Le signal normalisé émis.

$p = \frac{W_{13}}{A_{21}}$  Ou encore  $p = \frac{P_p}{p^{sat}}$  la puissance de pompe normalisée.

$n_2 = \frac{N_2}{N_t}$  La population normalisée

L'expression de  $n_2$  sous sa forme générale s'écrit donc:

$$n_2 = S_a + \frac{p}{(1+p+S_a+S_e)} \quad \text{II-10}$$

Dans la suite, nous ferons l'hypothèse que le signal est négligeable devant  $p$  ( $S_a, S_e \ll p$ ).

Ainsi pour décrire la fluorescence, on s'écrit:

$$n_2 = \frac{p}{(1+p)} \quad \text{II-11}$$

Expérimentalement nous n'avons pas de moyen pour mesurer directement  $n_2$ , donc pour cela nous mesurerons la puissance de la fluorescence qui est proportionnelle à  $n_2$ .

### II.2.6. 2 Evolution en régime non-stationnaire

Pour mesurer la durée de vie nous devons exciter les électrons puis couper la diode laser à l'instant  $t=0$  afin d'observer la désexcitation des électrons du niveau 2 vers le niveau fondamental. Le taux d'absorption  $W_{13} \neq 0$  pour  $t < 0$ . Nous reprendrons les approximations faites dans la section précédente. L'état du niveau 2 est non stationnaire donc la population du niveau 2 dépend du temps.

Réécrivons l'équation (II-8) en absence du signal :

$$\frac{dN_2}{dt} = N_2 * A_{21} + N_1 * W_{13} \quad \text{II-12}$$

D'où l'évolution du niveau 2 après coupure de la pompe s'écrit:

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 * A_{21} \quad \text{II-13}$$

Si à l'instant  $t=0$  la population du niveau 2 vaut  $N_2(0)$  et comme  $A_{21} = 1/\tau$ , elle vaut à l'instant  $t$ :

$$N_2 = N_2(0) * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{II-14}$$

Ou encore :

$$n_2 = n_2(0) * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{II-15}$$

Cette expression nous informe que la population du niveau suit une loi de décroissance exponentielle, elle nous permettra de vérifier expérimentalement si ce modèle correspond à la réalité.

### II.2.7 Les caractéristique de l'amplificateur optique EDFA

Pour quantifier les performances d'un amplificateur on utilise des paramètres tels que le *gain*, le *rapport signal à bruit*, le *facteur de bruit* et la *longueur optimale d'utilisation*.

Voyons la définition de ces quatre grandeurs.

#### II.2.7.1. Gain

Pour quantifier les performances d'un amplificateur, on définit son gain comme étant le rapport entre la puissance de signal en sortie du dispositif  $P_{sout}$  et la puissance de signal injectée  $P_{sin}$ . La relation entre ces deux puissances est donnée par la formule ci-dessous qui détermine l'expression de la puissance du signal en sortie d'une fibre amplificatrice de longueur L :

$$G(\lambda_s) = P_{sin}(\lambda_s) \exp \left\{ \int_0^L (\sigma_e(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(z))\Gamma_s(\lambda_s) dz \right\} \quad \text{II-16}$$

$\lambda_s$ : Longueur d'onde du signal injecté.

$\sigma_e, \sigma_a$ : Sections efficaces d'émission et d'absorption respectivement.

$N_i$ : Densité de population, donne le nombre d'atomes dans un même état d'excitation.

$\Gamma_s$ : Facteur de recouvrement traduisant le recouvrement entre la région dopée en ions

$Er^{3+}$  et la répartition transverse de la puissance du signal.

On en déduit alors l'expression du gain:

$$G(\lambda_s) = \exp \left\{ \Gamma_s(\lambda_s) \int_0^L [\sigma_e(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(z)] dz \right\} \quad \text{II-17}$$

De cette expression on tire les remarques suivantes : Pour une longueur fixe de fibre amplificatrice, l'équation confirme que plus le niveau fondamental est dépeuplé au profit du

niveau métastable ( $N_2$  proche de  $P_{er}$  - densité volumique d'ions erbium contenue dans l'amplificateur - et  $N_1$  proche de 0, forte inversion de population), plus le gain est grand. Cette condition peut être obtenue en disposant d'une puissance de pompe élevée et d'un bon recouvrement du champ de faisceau de pompe avec la région dopée.

Un deuxième point important est que le gain obtenu avec une fibre optique dopée aux terres rares semble d'autant meilleur que le facteur de recouvrement à la longueur d'onde du signal  $\lambda_s$  est élevé. Il faut cependant noter que les densités de population  $N_1$  et  $N_2$  dépendent elles aussi du recouvrement respectivement aux longueurs d'onde de pompe et de signal [12].

### II.2.7.2 Saturation d'amplificateur

Le gain d'un amplificateur EDFA en régime petit signal, comme on a déjà vu, défini par :

$$G = \frac{P_{sout}}{P_{sin}} \quad \text{II-18}$$

Est quasiment constant d'où  $P_{sout}$  est proportionnelle à  $P_{sin}$ , en supposant la puissance de pompe fixée. Si le phénomène d'amplification est basé sur un transfert d'énergie, alors la puissance maximale récupérée en sortie de la fibre dopée ne peut excéder  $P_{sin} + \frac{\lambda_s}{\lambda_p} P_p$ .

Ainsi, lorsque la puissance d'entrée du signal à amplifier augmente, la puissance du signal en sortie tend vers une valeur maximale limite: il s'agit de la puissance maximale de l'amplificateur  $P_{ext}$ .

La puissance de saturation  $P_{sat}$  d'un amplificateur EDFA est définie comme étant la puissance du signal en entrée pour laquelle le gain obtenu est égal à la moitié du gain petit signal  $G_0$ . Les amplificateurs à fibre dopée erbium fonctionnant en régime saturé afin d'obtenir une puissance de signal maximale en sortie de fibre sont qualifiés d'amplificateurs de puissance.

En introduisant La puissance de saturation, la puissance du signal en sortie de l'amplificateur peut être donnée par la relation simplifiée:

$$P_{sout} = G_0 P_{sin} \frac{P_{sat}}{P_{sout} + P_{sin}} \quad \text{II-19}$$

Pour de faibles valeurs de  $P_{sin}$  ( $P_{sin} \ll P_{sat}$ ), l'évolution de la puissance de sortie est bien quasi-linéaire. En revenant à la relation précédente, l'expression du gain de l'amplificateur est donnée par :

$$G = \frac{P_{sout}}{P_{sin}} = \frac{G_0}{1 + \frac{P_{sin}}{P_{sat}}} \quad \text{II-20}$$

En régime petit signal, ce gain est proche de la valeur maximale  $G_0$  et il est égal à  $G_0/2$  Pour une puissance d'entrée égale à la puissance de saturation [12].

### II.2.7.3 Rapport signal à bruit

Le rapport signal à bruit, noté SNR (Signal to Noise Ratio), exprime la quantité de bruit optique généré par l'amplification d'émission spontanée dans l'amplificateur. En régime linéaire, il est défini comme le rapport entre la puissance de signal et celle du bruit en sortie de l'amplificateur. La puissance de bruit  $P_{ASE}$  est évaluée sur une largeur de bande spectrale [19].

$$SNR = \frac{P_s}{P_{ASE}} \quad \text{II-21}$$

Comme le gain, il peut s'exprimer en décibels.

$P_{ASE}$ : Amplification Spontaneous Emission

### II.2.7.4 Facteur de bruit

La figure de bruit est une mesure de la qualité de l'amplification. Il est défini comme le quotient du rapport signal sur bruit (SNR) du signal d'entrée à celle du signal de sortie.

$$\text{Facteur de bruit} = \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}} \quad \text{II-22}$$

A cause de l'ASE, le SNR de sortie est inférieure à celle de l'entrée, par conséquent le facteur de bruit  $> 1$  ; c'est-à-dire un amplificateur optique ne peut pas améliorer le signal SNR optique. Comme gain, le facteur de bruit est également mesuré en échelle logarithmique

$$\text{Facteur de bruit}(dB) = 10 \log \text{Facteur de bruit} \quad \text{II-23}$$

La valeur de N.F. dépend de la fréquence de la pompe. Pour les grandes valeurs de SNR, une expression approximative pour F. est donnée par

$$\text{Facteur de bruit} = \frac{1}{G} \left[ 1 + \frac{2P_{ASE}}{hv\Delta} \right] \tag{II-24}$$

$P_{ASE}$  est la puissance de bruit de l'ASE,  $\nu$  est la fréquence de pompe et  $\Delta$  c'est la bande passante de l'EDFA le facteur de bruit dépend donc à la fois à l'extrémité d'alimentation de la pompe longueur EDFA [20].

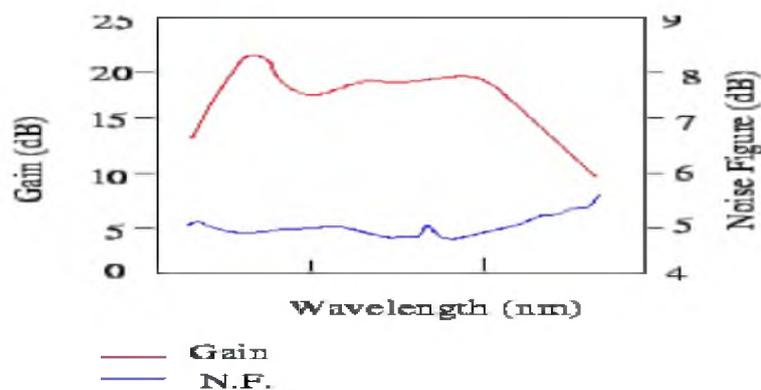


Figure II-9 : la variation de gain et le facteur de bruit en fonction de la longueur d'onde

### II.2.7.5 Longueur optimale

Soit un amplificateur à fibre dopée à l'erbium dont tous les paramètres sont fixés à l'exception de sa longueur L.

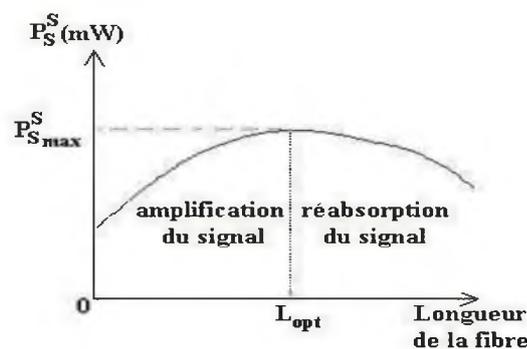


Figure II-10:Évolution de la puissance du signal de sortie en fonction de la longueur de la fibre dans un amplificateur fonctionnant selon un système à trois niveaux

La puissance de sortie du signal va alors varier en fonction de la longueur. Au départ la puissance signal de sortie augmente jusqu'à atteindre son maximum noté  $P_{smax}$  pour une longueur de fibre notée  $L_{opt}$ .

Au-delà de, l'inversion de population n'est plus réalisée et il y a réabsorption du signal, et donc décroissance de la puissance signal de sortie [19].

### II.3 Les avantages de ce type d'amplificateur

Enfin, les amplificateurs à fibre dopée ont une large bande passante pour laquelle le gain est quasiment identique, ce qui les rend intéressants dans la perspective d'amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexés en longueur d'onde (WDM). Leurs principaux avantages sont :

- 1- Amplification de plusieurs longueurs d'ondes en même temps.
- 2- Largeur de bande typique de 4 THz (40 nm), et qui peut être encore amélioré en associant plusieurs niveaux de différents dopants dans la fibre de manière à décaler la bande spectrale (actuellement couvre les bandes C et L).
- 3- Amplification ponctuelle (moins de 50 m de fibre Erbium).
- 4- Puissances de pompage relativement faibles (quelques dizaines de mW) permettant d'obtenir des gains élevés (25 dB à 45 dB) pour compenser des pertes liées à plusieurs dizaines de kilomètres de fibre

### II.4 Conclusion

Le saut technologique suivant pour les transmissions par fibre optique vient du développement très rapide des amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium. Dans ce chapitre on a donné une explication bien détaillée sur le fonctionnement d'un amplificateur EDFA, aussi nous avons bien écrit les principales caractéristiques du EDFA. Le chapitre suivant fera l'objet sur les amplificateurs à base de semi-conducteur.

## Chapitre III

# Les amplificateurs à base de semiconducteur

### III.1 Introduction

Les télécommunications par fibre optique se développent avec une vitesse impressionnante. En effet, depuis la réalisation des premières fibres optiques dans les années soixante-dix, et l'utilité de ce dernier augmente de plus en plus. Cependant, l'augmentation de la capacité de la transmission optique, elle était rendue possible. Ceci est dû, des fonctions de base telles que la technique de multiplexage en longueur d'onde (WDM), la fibre compensatrices de dispersion chromatique (DCF), la diode laser à 1.55  $\mu\text{m}$  et les amplificateurs, etc...

Pour cette sorte de réseaux, des composants optiques simples, flexibles, fiables et bon marché sont nécessaires. L'un de ces composantes est l'ampliateur optique à base de semi-conducteur (Semi-conducteur Optical Amplifier, SOA).

Ce chapitre concentre sur les bases théoriques nécessaires à la compréhension des amplificateurs à base de semi-conducteur (SOA). Leur principe de fonctionnement, et les différentes caractéristiques.

### III.2 Rappels sur le semi-conducteur

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs comme les métaux et celles des isolants, en fait, la différence la plus caractéristique réside dans le sens de la variation de la conductivité avec la température.

Les semi-conducteurs sont principalement le germanium et le silicium sont des éléments tétravalents qui appartiennent à la quatrième colonne de la classification périodique des éléments, leurs atomes comportent quatre électrons (de valence) sur la couche périphérique (couche de valence), mais aussi des alliages à base des éléments de la colonne III-V ou II-VI voir tableau III-1.

La conductivité d'un semi-conducteur est essentiellement due aux porteurs de charges (électrons) dans la bande de conduction et aux trous créés dans la bande de valence sous l'effet des impuretés ou par excitation des électrons dans la bande de conduction. Elle s'écrit :

Group II	Group III	Group IV	Group V	Group VI
	B	C	N	O
Mg	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te
Hg	Tl			

Tableau III -1 : Morceau du tableau périodique des éléments de Mendeleïev [21]

$$\sigma = \frac{n e^2 T_e}{m_e} + \frac{p e^2 T_h}{m_h} \quad \text{III-1}$$

$T_e$  : Le temps de relaxation des électrons dans cette bande

$m_e$ : Masse effective d'électrons.

$p, T_h, m_h$  : grandeurs correspondantes pour les trous dans la bande de valence.

Pour un semi-conducteur, la valeur de la conductivité en fonction de  $T$  est dominée par le comportement de  $n(T)$  et  $p(T)$  ( $n = p$  pour un semi-conducteur intrinsèque), car le temps de relaxation varie plus faiblement avec la température. Ce comportement est très différent de celui d'un métal pour lequel la densité électronique  $n$  est constante, l'effet de la température sur  $\sigma$  dépendant entièrement de la variation du temps de relaxation [1]

Pour une valeur de température  $T = 0$  K, les électrons sont situés dans la bande de valence, qui est pleine et donc aucun courant ne circule.

Pour une valeur de température  $T > 0$  K, des électrons, issus de la bande de valence, vont remplir la bande de conduction, et libérer des places dans cette bande de valence appelée trou. Plus la température est élevée et plus la quantité d'électrons dans la bande de conduction sera grande, ainsi que la quantité de trous dans la bande de valence.

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

### III 2.1 Caractéristiques d'un semi-conducteur

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement de tels électrons et celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence [22].

On caractérisera un semi-conducteur par les grandeurs suivantes :

- $E_c, E_v$  : Minimum de la bande de conduction et maximum de la bande de valence
- $E_g$ : Énergie de gap correspond à l'écart entre ces deux extrema.

On a alors

$$E_g = E_c - E_v \quad \text{III - 2}$$

- $E_F$ : La position du niveau de Fermi représente la limite entre les états libres et les états occupés. Pour les cas des semi-conducteurs, le gap est intermédiaire de l'ordre de 1 ev (1,1 ev pour le Si et de 0.7 ev pour le Ge).

Le niveau de Fermi a pour valeur comme suit :

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} = E_v + \frac{\Delta W}{2} \quad \text{III - 3}$$

$$\text{Avec} \quad \Delta W = E_c - E_v$$

- $n_i$ : La densité intrinsèque
- $n$ : La densité d'électrons dans la bande de conduction
- $p$ : La densité de trous dans la bande de valence
- $\sigma_n, \sigma_p, \sigma$ : La conductivité des électrons, des trous, totale
- $\rho$ : La résistivité (=  $1/\sigma$ )
- $N_c, N_v$ : Densités équivalentes d'états

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

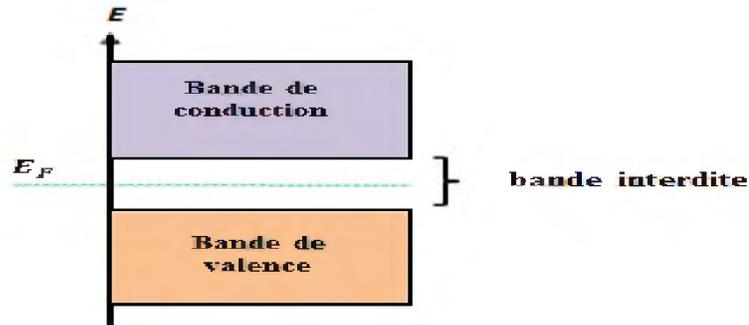


Figure III-2 : Schéma théorique de bande d'énergie d'un semi-conducteur

### III.2.2 Type du semi-conducteur

#### III.2.2.1 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque si le nombre d'électrons est égal au nombre de trous. Le taux d'impuretés  $y$  est très faible (moins d'un atome pour  $10^{13}$  atomes de l'élément semi-conducteur) [23].

La concentration intrinsèque s'exprime

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} e^{-E_g/2kt} \quad \text{III-4}$$

Le niveau de fermi est donné par

$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3}{4} KT \ln \frac{m_h}{m_e} \quad \text{III-5}$$

#### III.2.2.2 Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur est dit extrinsèque s'il comporte un taux d'impuretés très grand par rapport à celui du semi-conducteur intrinsèque (un atome pour  $10^5$  atomes de l'élément semi-conducteur). Selon la nature des impuretés il existe deux types des semi-conducteurs : type n et de type p [23]

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

Le niveau de fermi des semi-conducteurs extrinsèque  $E_F$  n'est plus dans le milieu de gap de semi-conducteur  $E_{Fi}$  mais à une distance  $e^{\phi_i} = E_F - E_{Fi}$  dépend de la densité et de la nature des atomes ajoutées, les densités de porteuse s'écrivent :

$$n = n_i \exp \frac{e^{\phi_i}}{kT} \tag{III-6}$$

$$n = n_i \exp - \frac{e^{\phi_i}}{kT} \tag{III-7}$$

### III.2.3 La théorie des alliages

L'alliage, permet d'avoir un mélange de deux ou plusieurs matériaux uniquement réservé aux métaux et associée à d'autres matériaux, plusieurs alliages binaires, ternaires et quaternaires ont été réalisés. L'utilisation de ces composants dans les domaines de la microélectronique et l'optoélectronique a repoussé les chercheurs à développer le côté théorique ainsi que l'expérimental.

Le tableau donne des exemples de matériaux ou de composée semi-conducteur en fonction des éléments qui les constituent et de la position de ces éléments dans le tableau de Mendeleiev.

Colonne		Semi-conducteur
IV		Si, Ge
III- V	binaire	GaAs ,GaP ,GaSb ,InAs ,InP ,InSb
	ternaire	$Al_xGa_{1-x}As$ , $GaAs_yP_{1-y}$
	quaternaire	$Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$
II-VI	binaire	CdS , HgTe , CdTe , ZnTe , ZnS
	ternaire	$Cd_xHg_{1-x}Te$

Tableau III .1 : Exemple de semi-conducteurs [21]

Matériaux	Type	Substrat	Dispositifs	Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )
Si	IV	Si	Détecteurs, Cellules Solaires	0.5-1
SiC	IV	SiC	LED's bleu	0.4
Ge	IV	Ge	Détecteurs	1-1.8
GaAs	III-V	GaAs	LED's, Lasers, Détecteurs, Cellules Solaires, Imagerie	0.85
AlGaAs	III-V	GaAs	LED's, Lasers, Cellules Solaires, Imagerie	0.67-0.98
GaInP	III-V	GaAs	Lasers Visibles, LED's	0.5-0.7
GaAlInP	III-V	GaAs	Lasers Visibles, LED's	0.5-0.7
GaP	III-V	GaP	LED's Visible	0.5-0.7
GaAsP	III-V	GaP	LED's Visible	0.5-0.7
InP	III-V	InP	Cellules Solaires	0.9
InGaAs	III-V	InP	Détecteurs	1-1.67
InGaAsP	III-V	InP	Lasers, LED's	1-1.6
InAlAs	III-V	InP	Lasers, Détecteurs	1-2.5
InAlGaAs	III-V	InP	Lasers, Détecteurs	1-2.5
GaSb/GaAlSb	III-V	GaSb	Lasers, Détecteurs	2-3.5
CdHgTe	II-VI	CdTe	Détecteurs des grandes ondes	3-5 et 8-12
ZnSe	II-VI	ZnSe	LED's des ondes courtes	0.4-0.6
ZnS	II-VI	ZnS	LED's des ondes courtes	0.4-0.6

Tableau III-2 : Les matériaux semi-conducteur important pour l'optoélectronique [24]

### III.2.4 Notion du gap direct et du gap indirect dans un semi-conducteur

Considérons le gap des différents semi-conducteurs. Le gap est par définition la largeur de la bande interdite, c'est-à-dire la différence d'énergie entre le minimum absolu de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence [21].

Les structures de bandes représentent dans la figure III-3 font apparaitre deux cas fondamentaux de semi-conducteur, à gap indirect, dont lesquelles le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande valence sont situés en des point différents de l'espace des K et les semi-conducteurs a gap direct pour lesquelles ces extrema sont situés aux même point de l'espace des K (au centre de la zone de Brillouin, en  $K=0$ ).

Dans les semi-conducteurs à gap direct, le minimum central de la bande de conduction correspond à des électrons de faible masse effective, donc très mobiles. Par contre ceux qui ont

un gap indirect, leur bande de conduction correspond à des électrons de grande masse effective, donc ayant une faible mobilité [21].

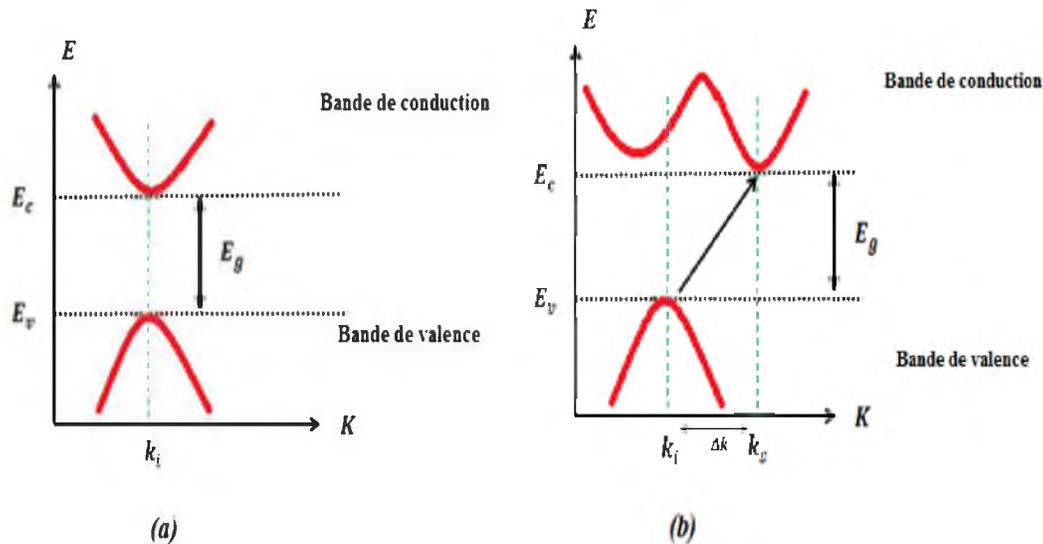


Figure III -3 : Structure de bande d'énergie :(a)-gap direct et (b)-gap indirect

### III.2.5 Les semi-conducteurs III-V

Le faible coût, la grande disponibilité, la grande conductivité thermique et la bonne qualité de son oxyde ont fait du silicium le matériau clé de l'électronique. Toutefois, les semi-conducteurs III-V sont rapidement apparus comme des matériaux de choix pour des applications spécialisées.

#### III.2.5.1 Description de l'alliage quaternaire

L'alliage quaternaire a fait l'objet de plusieurs études théoriques et expérimentales. Cet intérêt est dû au fait que ce dernier se laisse facilement croître sur des substrats des composés binaires InP, GaAs cela pour une large gamme des compositions  $x$  et  $y$ . L'information sur le gap de la bande d'énergie et la condition d'accord de maille aux substrats disponibles est un préalable à beaucoup d'applications pratiques. D'une manière générale, un quaternaire donné comporte un vaste espace bidimensionnel de compositions  $[x, y]$ . Cependant, Dans la pratique, la plupart des expériences se sont focalisées sur les sous-ensembles unidimensionnels,  $[x, y(x)]$  qui sont

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

(approximativement) l'accord de maille pour chacun des matériaux de substrats binaires communs qui sont GaAs, InP et ZnSe pour l'alliage quaternaire étudié. Le gap de la bande de l'alliage quaternaire peut largement changer en maintenant complètement l'accord de maille d'un cristal binaire utilisé comme substrat. Les gaps d'énergies dérivant de cette nouvelle structure varient dans l'intervalle (0.74-1.34) eV pour le substrat InP et (1.42-1.88) eV pour le substrat GaAs, ce qui correspond à une région spectrale de (0.92 à 1.67) nm dans le cas où le substrat est l'InP. Cette dernière est la région des basses pertes et des faibles dispersions pour les fibres optiques modernes.

Il y a eu peu de motivation pour suivre la structure de bande du GaInAsP ajusté sur le substrat GaAs, puisque son gap de bande direct enjambe presque la même gamme que le gap direct de AlGaAs, qui est considérablement plus facile de croître. Cependant, l'accord de maille sur InP, GaInAsP a été le sujet de nombreuses investigations et il est actuellement utilisé dans des dispositifs optoélectroniques et électroniques commerciaux [25].

### III.3 Amplificateurs optiques à semi-conducteurs

#### III.3.1 Définition

Il est possible d'amplifier la lumière qui traverse une structure très proche d'une diode laser, dont les faces traitées antireflets, pour éviter la formation d'une cavité laser. On a un fonctionnement progressives permettent d'exploiter toute la bande de gain du matériau, le seuil d'amplificateur est alors sensiblement plus faible que le seuil d'émission laser et ce composant peut être utilisée en tant qu'amplificateur optique à semi-conducteurs.

Les premiers travaux sur les SOA ont démarré au début des années 80, à partir du moment où les lasers à semi-conducteur fonctionnaient en continu avec une fiabilité acceptable.

### III.3.2 Principe générale d'un amplificateur optique à semi-conducteurs

L'amplificateur optique à base de semi-conducteur est un composant optoélectronique actif, sa structure élémentaire consiste en une diode de type p-i-n, basée sur une hétérojonction, permettant l'amplification de la lumière incidente par émission stimulée à une longueur d'onde à 1, 55 $\mu$ m.

Une structure de base d'un SOA est illustrée sur la Figure II -5 :

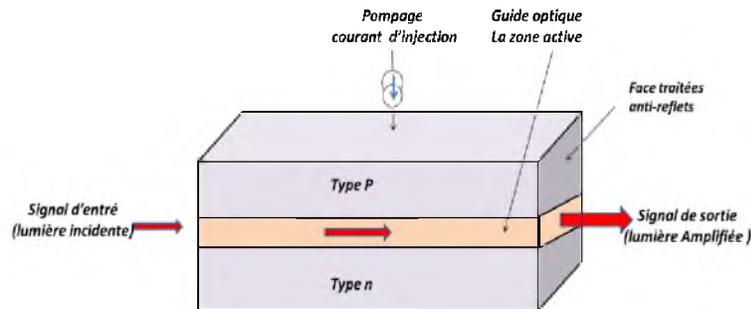


Figure II -5: Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur.

Son élément principal est la région active qui fournit le gain optique lorsque l'amplificateur est pompé électriquement, elle est très mince (moins d'un micro), est entourée de couche de confinement qui possède :

- une largeur de bande interdite (gap) plus élevée, ce qui fait que les recombinaisons (donc émission) et absorption sont confinées dans la couche active. On réalise plus souvent une double hétérojonction (DH) qui assure le confinement des deux types de porteurs.
- une transparence aux photons émis, qui ne seront donc pas réabsorbés ; ceci améliore le rendement externe, aussi bien en émission qu'en réception (pas d'absorption en dehors de la zone active).
- un indice de réfraction plus faible, d'où une possibilité de confinement et de guidage de la lumière, comme en optique intégrée, ce qu'on utilise surtout dans les diodes à émission par la tranche et les diodes lasers [1].

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

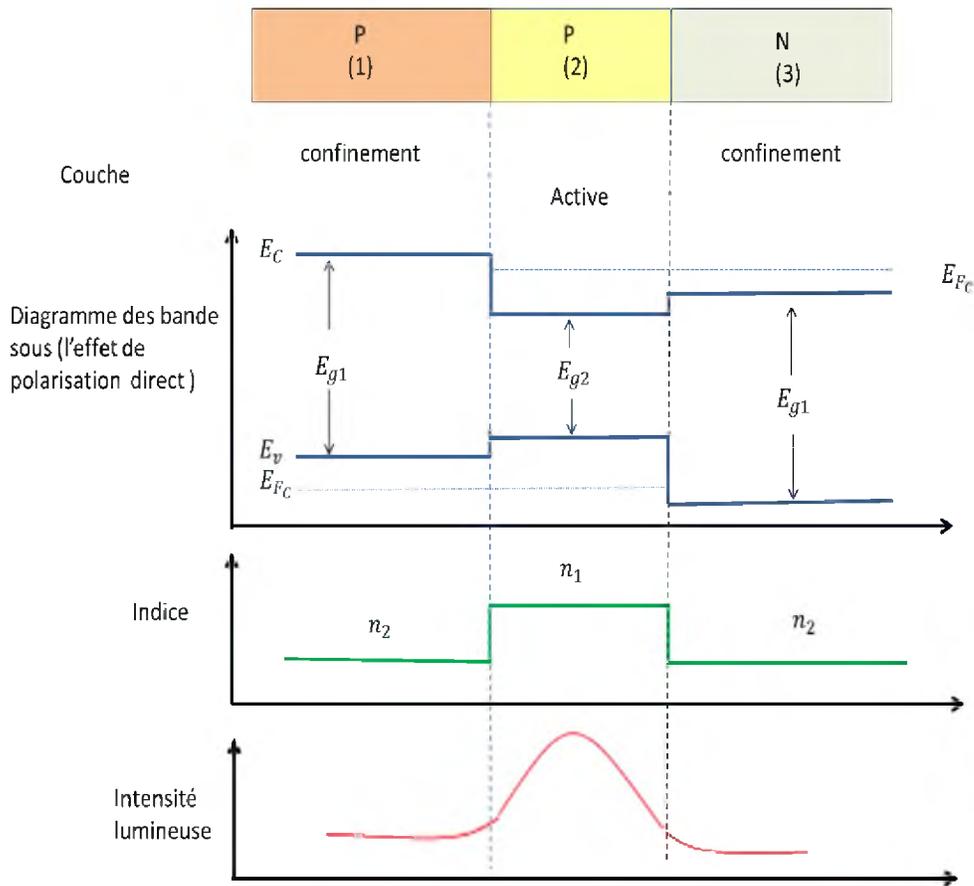


Figure II-5: Double hétérojonction

Si l'on utilise des matériaux de bande interdite directe et qu'on injecte des porteurs par polarisation de la jonction dans le sens direct, le passage d'un photon de longueur d'onde correspondant à la bande interdite de la zone active provoque l'émission de photons à la même longueur d'onde par recombinaison radiative d'électrons avec des trous. Donc le principe d'un SOA est basé sur la création d'inversion de population utilisée pour l'amplification de signal optique d'entrée via une émission stimulée.

Ces amplificateurs sont généralement fabriqués à partir des semi-conducteurs composés du groupe III-V tels que GaAs/AlGaAs, InP/InGaAs, InP/InGaAsP et InP/InAlGaAs, et ils fonctionnent à des longueurs d'onde comprises entre  $0,85\mu\text{m}$  et  $1,6\mu\text{m}$  générant un gain jusqu'à 30 dB.

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

### III.3.2 Facteur de confinement

Le facteur de confinement exprime la fraction du mode optique qui interagit avec la zone active. Le facteur de bruit est lié d'une part aux dimensions  $w$  et  $d$  de la zone active et d'autre part aux indices de réfraction optique des matériaux qui composent la couche active et les couches de confinement. Étant donné que  $w$  et  $d$  sont des constantes pour un SOA donné (en négligeant l'influence de la température), toute variation de  $\Gamma$  est due à un changement d'indice, et en particulier à un changement de l'indice de la zone active qui dépend de la densité des porteurs  $N$ .

De plus, nous savons que le SOA était un guide d'onde, et nous savons que les dimensions opto-géométriques d'un guide imposent une certaine plage de longueurs d'onde pouvant être propagées de manière optimale. Donc  $\Gamma$  est fonction de la longueur d'onde, cela exprime le fait qu'une longueur d'onde soit plus ou moins adaptée à être guidée par le SOA. De plus,  $\Gamma$  à une dépendance linéaire en fonction de  $N$  et  $\lambda$  sur une large plage de longueurs d'onde est donc linéarisé grâce à la formule suivante.

$$\Gamma(N; \lambda) = \Gamma_0 + \Gamma_N(N - N_0) + \Gamma_\lambda(\lambda - \lambda_0) \quad \text{III-8}$$

où  $\Gamma_0$  est le facteur de confinement de référence, à déterminer à  $N = N_0$  et  $\lambda = \lambda_0$ .  $\Gamma_N$  et  $\Gamma_\lambda$  sont des constantes donnant la variation du facteur de confinement en fonction respectivement de la densité de porteurs et de la longueur d'onde. Pour des faibles variations des dimensions géométriques du guide (autour des points de fonctionnement  $w_0$  et  $d_0$ ), nous pouvons supposer que  $\Gamma$  est proportionnel à  $w$  et  $d$ , ce qui conduit à la relation.

$$\Gamma(N; \lambda; w; d) = (\Gamma_0 + \Gamma_N(N - N_0)) + \Gamma_\lambda(\lambda - \lambda_0) \frac{w}{w_0} \frac{d}{d_0} \quad \text{III-9}$$

Cette condition n'est vérifiée que lorsque  $w$  et  $d$  varient faiblement par rapport aux dimensions nominales  $w_0$  et  $d_0$ . Dans le cas contraire, une détermination complète du facteur de confinement en fonction des dimensions opto-géométriques sera nécessaire, mais cette détermination est complexe et sort du cadre de notre travail [26].

### III.3.3 Caractéristique d'un amplificateur optique à semi-conducteurs

Les principales caractéristiques des SOA sont :

#### III.3.3.1 Gain optique

Nous exprimons le gain matériau  $g_m$  en fonction de la fréquence  $\nu$  d'un photon, sachant que les différents paramètres de cette définition peuvent dépendre de la densité des porteurs (comme par exemple  $E_g$ , l'énergie de la bande interdite, qui peut devenir  $E_g(N)$  si l'on tient compte de la normalisation du gap).

$$g_m(N) = \frac{A_{21} c^2}{8 \pi n_{eq}^2 \nu^2} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{L}(\nu) \rho(\nu_0) (f_c(E_a) - f_v(E_b)) d\nu_0 \quad \text{III-10}$$

Où  $A_{21}$  est le paramètre d'émission spontanée de la bande de conduction vers la bande de valence (coefficient d'Einstein),  $n_{eq}$  est l'indice de réfraction du mode guidé. Nous notons  $\mathcal{L}(\nu)$  la fonction d'élargissement liée au taux de relaxation intra-bande,  $T_{intra}$  à travers la largeur spectrale de la fonction  $\Delta\nu = \frac{1}{\pi T_{intra}}$

$$\mathcal{L}(\nu) = \frac{\Delta\nu}{2 \pi ((\nu - \nu_0)^2 + (\frac{\Delta\nu}{2})^2)} \quad \text{III-11}$$

Dans l'équation  $g_m(N)$  nous prenons en compte  $\rho(\nu_0)$  la densité d'états joints à la fréquence de transition  $\nu_0$ . Cette densité dans un semi-conducteur massif est donnée par :

$$\rho(\nu_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{2 m_c m_{hh}}{h(m_c + m_{hh})} \right)^{3/2} \sqrt{\nu_0 - \frac{E_g}{h}} \quad \text{III-12}$$

Où  $m_c$  (resp.  $m_{hh}$ ) est la masse effective d'un électron (resp. trou lourd) de la bande de conduction (resp. valence).

La fonction  $f_c(E_a)$  (resp.  $f_v(E_b)$ ) dans l'équation III-10 représente la probabilité qu'un porteur d'occuper le niveau d'énergie  $h\nu$  pour un électron de la bande de conduction (resp. valence), avec  $E_a = (h\nu - E_g) \frac{m_{hh}}{m_c + m_{hh}}$  resp.  $E_b = (h\nu - E_g) \frac{m_c}{m_c + m_{hh}}$ .

Les statistiques de Fermi-Dirac (pondérées par la densité d'états joints de notre semi-conducteur massif) pour la bande de conduction ( $f_c$ ) et la bande de valence ( $f_v$ ) sont données par les équations suivantes :

$$f_c(h\nu) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_\alpha - E_{fc}}{k_B T}}} \quad \text{III-13}$$

et

$$f_v(h\nu) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_{fc} - E_b}{k_B T}}} \quad \text{III-14}$$

Où  $k_B$  est la constante de Boltzmann et  $T$  la température du matériau.

Le gain matériau (équation III.10) exprime le bilan entre émission stimulée et absorption. Selon, le gain matériau peut être effectivement décomposé en deux termes distincts selon ce bilan :

$$g_m = g'_m - g''_m \quad \text{III-15}$$

Où  $g'_m$  est le terme concernant l'amplification appelé coefficient de gain et  $g''_m$  concerne l'absorption.

Pour qu'il y ait émission stimulée, il faut que soient disponibles à la fois un électron dans la bande de conduction ( $f_c$ ) et un trou dans la bande de valence ( $1 - f_v$ ) soit, en termes de probabilités,  $(f_c)(1 - f_v)$ . Pour qu'il y ait absorption c'est le contraire, il faut à la fois un trou dans la bande de conduction ( $1 - f_c$ ) et un électron dans la bande de valence ( $f_v$ ) soit, en termes de probabilités,  $f_v(1 - f_c)$ . Au final, nous faisons le bilan et obtenons bien  $g_m \propto f_c(1 - f_v) - f_v(1 - f_c) = f_c - f_v$ . Ce modèle est bien connu et tente de décrire avec précision tous les phénomènes conduisant à du gain dans les matériaux semi-conducteurs.

Son utilisation est très utile pour les fabricants des SOA puisque ce modèle permet de faire le lien entre les paramètres intimes du matériau et le comportement du composant au final. Cependant, sa confrontation avec la mesure à plusieurs courants et longueurs d'onde pose problème car des divergences apparaissent. Afin de reproduire les mesures, les paramètres du

modèle (comme les masses effectives des électrons et des trous) doivent être modifiés de manière arbitraire afin d'adapter le modèle à un composant particulier. Ceci réduit fortement la pertinence de l'utilisation d'un modèle physique. De plus, les différents paramètres, comme les masses effectives par exemple, ne sont pas indépendants, et il apparaît difficile d'expliquer une modification arbitraire de ceux-ci . . . [26]

### III.3.3.3 Puissance de saturation

Comme tout amplificateur, le potentiel de gain des SOA n'est pas infini et arrive à saturation lorsque le signal à amplifier devient trop puissant. Cette saturation du gain des SOA est caractérisée par un paramètre appelé puissance de saturation. Cette puissance peut être donnée soit à l'entrée du SOA (figure III.6(a)), soit à sa sortie (figure III-6(b)).

Cette puissance peut être donnée soit à l'entrée du SOA (figure III-6(a)), soit à sa sortie (figure III.6(b)) [27].

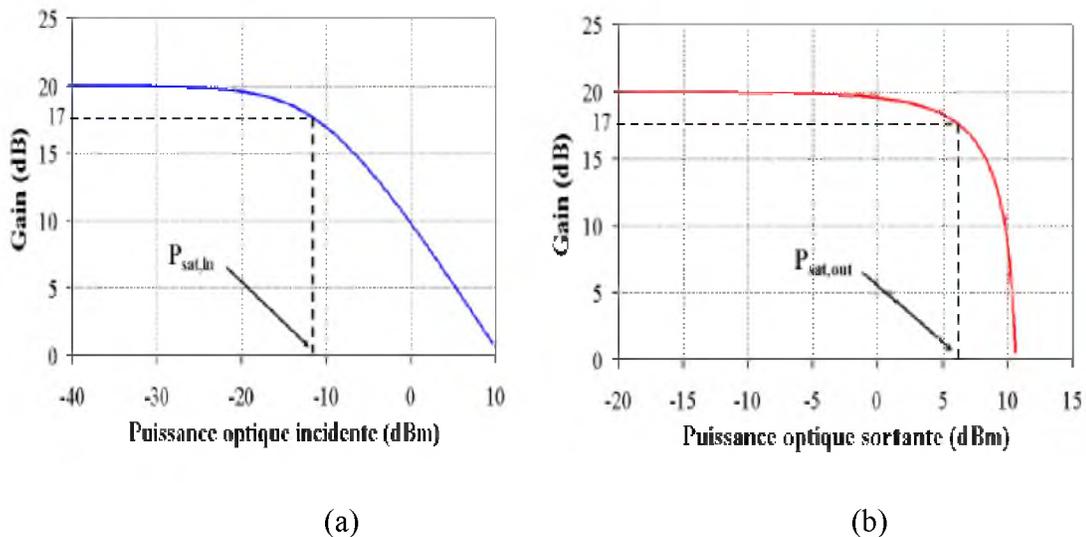


Figure III-6: Puissance de saturation : (a) à l'entrée d'un SOA, (b) à la sortie d'un SOA.

**III.4 Avantages et inconvénients des amplificateurs à semi-conducteurs [3]**

## ➤ Avantages

- Gain assez élevé (20-30dB).
- Puissance de saturation varie entre 5 et 20 dBm.
- Bande passante élevée.
- Couvre toutes les fenêtres de télécommunication (0,8  $\mu\text{m}$ , 1,3  $\mu\text{m}$ , 1,5  $\mu\text{m}$ ).
- Compacts.

## ➤ Inconvénients

- Sensibilité à la polarisation du signal.
- Effet non linéaires très importants.
- Facteur de bruits important et une grande diaphonie.

**III.4 Conclusion**

Les amplificateurs optiques à base de semi-conducteur ont un très fort potentiel d'intégration de par leur taille (plus de dix fois moins encombrants que les EDFA) et, de par leur coût, très abordable. Ils sont fondés sur la même technologie que les diodes laser à semi-conducteur. L'amplification est obtenue en pompant le matériau semi-conducteur. A la différence des EDFAs pompés optiquement, les SOAs sont pompés grâce au courant électrique injecté.

## Chapitre IV

# Les amplificateurs optique Raman

## IV.1 Introduction

Avec l'accroissement des canaux dans la fibre, la bande spectrale offerte par les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium, limitée au maximum à 40 nm, peut s'avérer être un facteur pénalisant. Ce constat a relancé les études sur de nouvelles méthodes permettant l'augmentation de la bande spectrale. Ce sont les amplificateurs Raman.

De la même manière que pour les amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA), les amplificateurs à semi-conducteurs. Nous nous présentons dans ce chapitre l'amplificateur Raman, on explique leur principe de fonctionnement puis leur caractéristique et en fait une comparaison entre les trois amplificateurs étudiés.

## IV.2 Amplificateur Raman

### IV.2.1 Définition

Un amplificateur Raman est un amplificateur optique basé sur le gain Raman qui résulte de l'effet de la diffusion Raman stimulée. Le milieu actif en Raman est souvent une fibre optique mais il peut aussi être un cristal en vrac, un guide d'ondes dans un circuit intégré photonique, ou d'une cellule avec un milieu gazeux ou liquide. Un signal d'entrée peut être amplifié pendant Co ou Contra-propagative avec un faisceau de pompage, la longueur d'onde est typiquement de quelques dizaines de nanomètres plus courtes. Pour les fibres de silice, le gain maximum est obtenu pour une position décalée de  $\approx 10$  à 15 THz entre la pompe et le signal de fréquence, en fonction de la composition du cœur de la fibre.

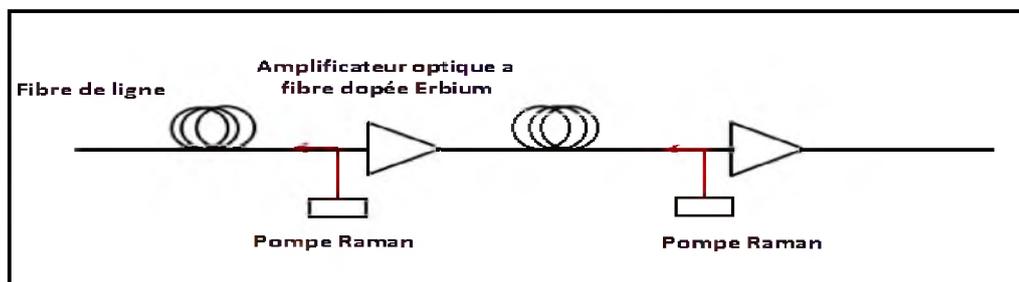


Figure IV-1 : Principe d'une liaison utilisant l'amplificateur Raman distribuée [1].

En télécommunications l'amplificateur Raman est pompé avec une lumière à onde continue à partir d'un laser à diode. L'amplification efficace des impulsions ultracourtes est également possible en utilisant des impulsions de pompe co-propagatives. Cependant, le phénomène de la vitesse de groupe est non-concordance alors limite considérablement la longueur d'interaction utile, en particulier pour des durées d'impulsion inférieures à 1 Ps. Les fibres utilisées pour les amplificateurs Raman ne sont pas dopées avec des ions de terres rares. En principe, toute fibre ordinaire unique mode peut être utilisé, et en pratique, les fibres de transmission elles-mêmes sont souvent appropriés (amplificateurs → distribués). Cependant, il y a des fibres spéciales avec augmentation de gain Raman, résultant de certains dopants (par exemple Germania) pour des coupes Raman améliorées, ou tout simplement d'une petite zone de mode efficace. Ces fibres sont utilisées pour les amplificateurs Raman localisés, où un morceau de fibre courte est dédié à une amplification seulement [28].

#### IV.2.2 Principe de fonctionnement

Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet Raman et consiste à injecter dans la fibre un signal pompe continu de forte puissance à une longueur d'onde plus courte d'environ 100 nm que la longueur d'onde du signal utile. Ce phénomène peut être spontané, s'il n'y a pas de photon signal, ou stimulé par la présence d'un photon signal.

Lors de l'interaction d'un faisceau lumineux avec la matière, plusieurs phénomènes peuvent se produire. Une partie du faisceau lumineux est réfléchi, une partie est diffusée et une partie peut être transmise à travers l'échantillon (Figure IV-2). Au cours de la propagation dans un milieu dense, différents phénomènes apparaissent : la réfraction, l'absorption, la diffusion, et éventuellement d'autres effets non-linéaires. L'absorption peut induire ensuite une photoluminescence ou des processus de désexcitation non-radiatifs.

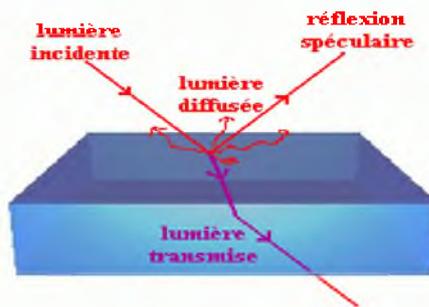


Figure IV-2 : Représentation schématique de différents phénomènes produits dans l'interaction d'un faisceau lumineux avec un milieu dense [29]

L'effet Raman est le plus connu des effets non linéaires. Il s'agit d'une interaction photon-phonon, c'est-à dire d'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau. Lorsque une onde pompe traverse un matériau certains photons perdent une partie de leur énergie  $h\nu_p$  au profit d'un phonon, particule associée à la vibration de fréquence  $\delta\nu$  qui apparaît dans la matière. il sont alors diffusée avec une énergie plus faible, autrement dit une longueur d'onde plus élevé, et constitué une onde stokes de fréquence.

$$\nu_s = \nu_p - \delta\nu \tag{IV.1}$$

Le décalage de fréquence  $\delta\nu = \nu_p - \nu_s$  ne dépend que de matériau, et pas de la longueur d'onde de pompe.

En sens inverse, quelque phonon va céder leur énergie à des photons, qui vont diffuser sous forme d'une onde anti-Stokes de fréquence  $\nu_a = \nu_p + \delta\nu$  Donc une longueur d'onde plus faible.

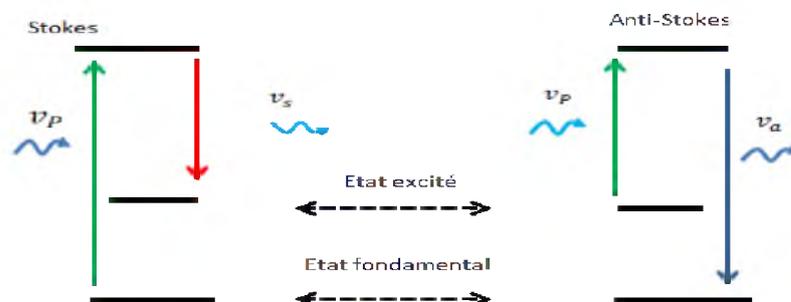


Figure IV-3 : Représentation schématique des transitions énergétiques à la base de la diffusion Raman

Le spectre de l'onde anti-Stokes est lié à celui de l'onde Stokes, et dépend fortement de la température  $T$ , qui crée des phonons par agitation thermique (Figure IV-3). Le rapport entre les raies Stokes et anti-Stokes vaut :

$$\frac{\sigma_s(\delta\nu)}{\sigma_a(\delta\nu)} = \exp \frac{h \cdot \delta\nu}{KT} \quad \text{IV.2}$$

Ce rapport ne dépend que de la température, ce qui permet d'utiliser la spectrométrie Raman pour connaître la composition et la température du milieu. Au cours de la propagation de l'onde pompe le long d'une fibre optique, l'onde Stokes, continuellement alimentée en photons, est amplifiée suivant une loi exponentielle dont le coefficient de gain est proportionnel à la puissance de l'onde pompe. Lorsque le gain devient élevé, soit parce que l'onde pompe est puissante, soit parce que la longueur d'interaction est grande, l'onde Stokes dépeuple l'onde pompe et crée elle-même de nouvelles raies. On a alors une diffusion Raman stimulée (SRS) qui donne un spectre quasi continu sur une large gamme de longueurs d'onde [1].

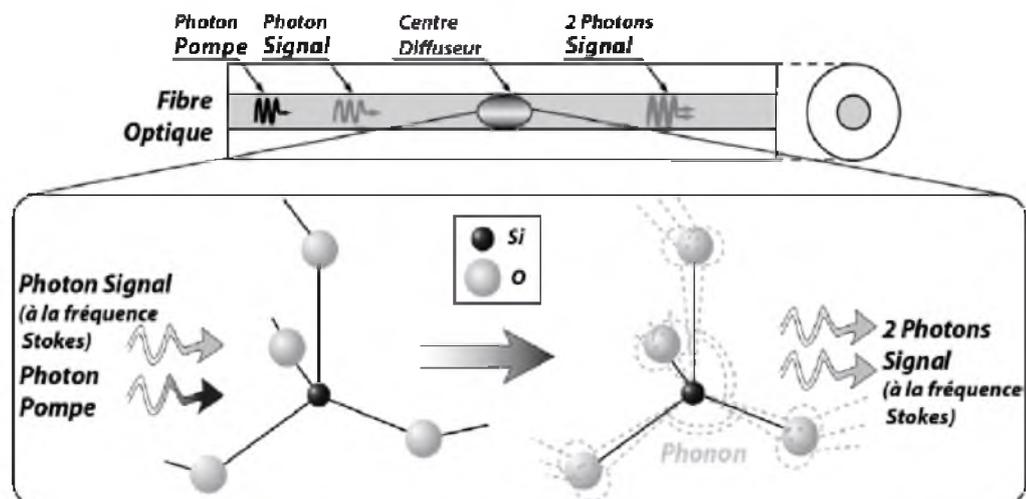


Figure IV-4 : Schéma de principe de la diffusion Raman au sein d'une fibre optique en silice pure [30]

On utilise l'effet Raman pour obtenir une amplification d'une onde incidente correspondant à une des raies de l'émission multi-Stokes. Son intérêt principal est que seule la différence de fréquence entre les ondes pompe et Stokes (et non ces fréquences elles-mêmes)

est imposée par le milieu amplificateur : on peut donc amplifier n'importe quelle longueur d'onde, à condition de choisir en conséquence celle de l'onde pompe. cependant le rendement quantique d'une telle amplificateur est très mauvais dans le silice, et nécessite de forte puissance, Des lasers YAG sont les plus souvent utilisés dans ce cas, en émettant une longueur d'onde inférieure à celle du signal. L'avantage principal de ces lasers est qu'ils sont accordables sur une très grande plage de longueurs d'onde [1].

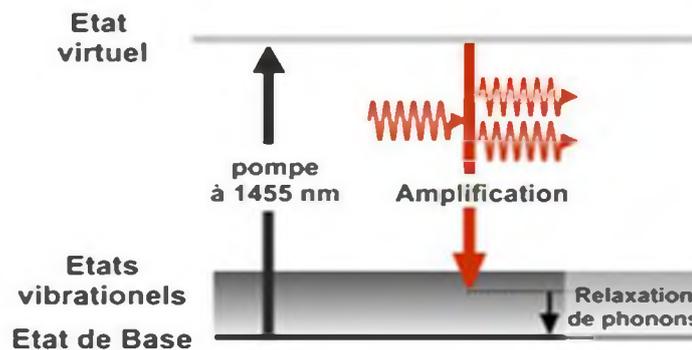


Figure IV-5 : Illustration schématique du procédé d'amplification Raman

La diffusion Raman stimulée présente de nombreux avantages dans le cadre de l'amplification optique. Elle peut se produire dans n'importe quelle fibre.

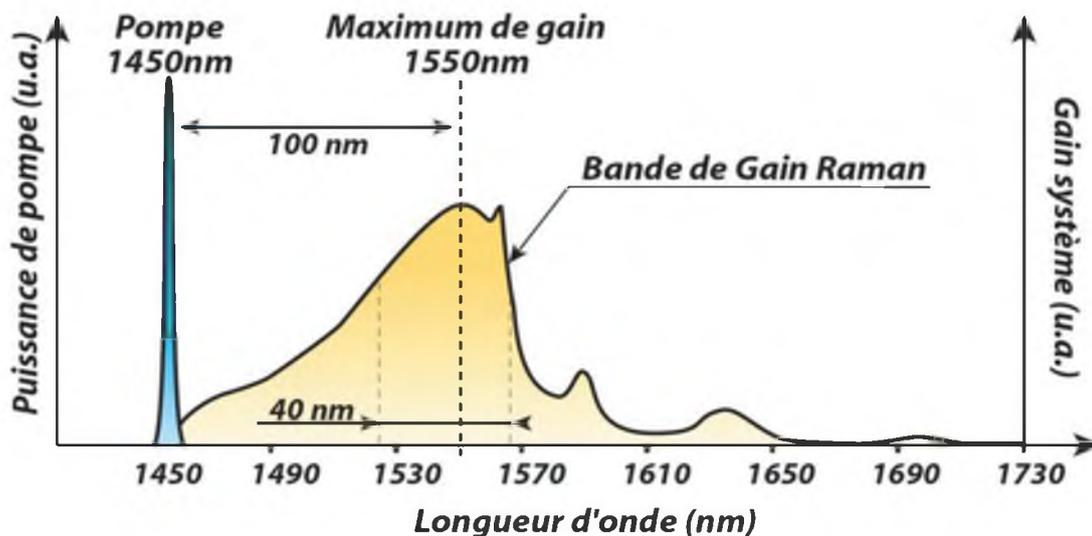


Figure IV-6 : Spectre Raman dans une fibre en silice pour longueur d'onde de pompe de 1450 nm

Le gain Raman peut avoir lieu à n'importe quelle longueur d'onde, pour cela, il faut juste ajuster la longueur d'onde de pompe. Cela est un grand avantage par rapport aux amplificateurs dopés terres-rares qui nécessitent une fibre spécialement dopée et les longueurs d'ondes pompe et signal sont déterminées par les niveaux énergétiques des ions dopants. Enfin, une large bande de gain de 100 nm ( $\sim 20$  THz) qui permet d'amplifier une large gamme de longueurs d'ondes environ plus de 40 nm aux longueurs d'onde télécoms (Figure IV-6) [30].

### IV.3 Les caractéristiques de l'amplificateur Raman

Pour quantifier les performances d'un amplificateur on utilise des paramètres tels que le gain, le rapport signal à bruit, le facteur de bruit.

#### IV.3.1 Gain de l'amplificateur Raman

##### IV.3.1.1 Gain, sans déplétion de la pompe

Pour commencer, on considère le régime dans lequel la pompe est très peu affectée par le processus d'amplification Raman, quand la puissance de la pompe employée est très supérieure à la puissance du signal à amplifier, par exemple. Dans ce régime particulier, les équations s'intègrent assez aisément. En effet, dans les deux cas (co ou contra-propageant), l'équation décrivant la variation du flux de la pompe.

$$\frac{dN_p}{dz} = -a_s N_p \quad \text{IV-3}$$

Avec  $a_s$  est les pertes (atténuation) de la fibre et  $N_p$  est le flux de photons à la longueur d'onde de pompe leur expression peut s'exprimer comme suivant :

$$N_p = \frac{g_r}{2A_{eff}K} P_0 \quad \text{IV-4}$$

Avec :

$P_0$  est la puissance de pompe utilisée.

$g_r$  le coefficient de gain Raman en m/W.

$A_{eff}$  est l'aire effective de la fibre,  $A_{eff} = \frac{d^2\pi}{4}$  et  $d$  étant le diamètre effectif du mode se propageant au cœur de la fibre.

$K$  le gain Raman (en  $m^{-1}$ ) qui dépend du matériau et de la longueur d'onde.

Si il n'y a pas de déplétion de pompe l'amplification Raman va apporter le gain net  $g_{net}$  qui est déterminé par le rapport entre les puissances optiques de signal en entrée et en sortie de fibre, tient compte de l'atténuation de la fibre.

$$G = e^{-a_s L} e^{\frac{g_r L_{eff} P_p}{2A_{eff}}} \quad \text{IV-4}$$

et

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-a_p L}}{a_p} \quad \text{IV-5}$$

$L$  est la longueur de la fibre.

$\frac{g_r}{2A_{eff}} P_p = \gamma$  est le facteur de gain.

Si l'on étudie les variations de  $G$ , on s'aperçoit que dans une configuration où:  $a_s > \frac{g_r P_p}{2A_{eff}}$  l'amplificateur ne fournira jamais de gain net. La diffusion Raman stimulée ne compensant pas les pertes de la fibre, on se retrouvera toujours avec moins de signal en sortie qu'en entrée. Notons néanmoins que le processus est utile si la fibre Raman est celle servant au transport de signal, qui sera moins atténué. C'est dans ce schéma que l'amplificateur Raman est utilisé dans la télécommunication optique. À partir des notations explicitées plus haut, on définit dans ce cas le gain on/off, i.e. avec/sans pompe:

$$G = e^{\gamma L_{eff}} \quad \text{IV-6}$$

Ce gain on/off ne tient pas compte de l'atténuation du signal due à sa propagation dans la fibre. Il est surtout intéressant lorsque la ligne optique est préexistante et que l'on souhaite limiter les dommages engendrés par l'atténuation. C'est celui qui est généralement cité en télécommunications optiques. Par contre, ce mode de fonctionnement n'est pas acceptable pour les liaisons opto-hyper où un gain net est nécessaire pour atteindre les niveaux de signal requis pour les applications. C'est donc du gain net dont il sera question par la suite si aucune précision supplémentaire n'est apportée.

Dans le cas d'un gain net positif, il existe une longueur  $L_{opt}$  qui optimise le gain que l'amplificateur peut atteindre (voir figure) en effet  $L_{eff}$  sature avec les grandes longueurs de fibre.

$$L_{opt} = \frac{1}{a_p} \ln \frac{\gamma}{a_s} = \frac{1}{a_p} \ln \frac{g_r P_{p0}}{2a_s A_{eff}} \quad \text{IV-7}$$

En supposant que l'atténuation est comparable aux longueurs d'onde pompe et signal,  $a_s \approx a_p = \alpha$  on peut réécrire le gain maximal:

$$G_{max} = \left( \frac{\gamma}{a_s} \right)^{\frac{-a_s}{a_p}} e^{\left[ \frac{\gamma - a_s}{a_p} \right]} \quad \text{IV-8}$$

Pour obtenir une amplification importante du signal, on peut donc jouer sur la puissance du faisceau pompe, sur l'aire effective du cœur de la fibre, ou encore sur son dopage de manière à augmenter son coefficient de gain Raman.

#### IV.3.1.2 Gain, régime de déplétion de la pompe :

Le gain calculé précédemment rend assez bien compte de la majorité des données récoltées lors d'études expérimentales. Toutefois, si l'on ne tient pas compte de la déplétion de la pompe, on ne peut expliquer les phénomènes de saturation observés lorsque le gain est très important. Dans ce cas, la puissance de signal amplifié devient considérable, comparable à la puissance de pompe. Une grande quantité de photons pompe est convertie en photons signal et la pompe est affaiblie. Dans ce régime, on parvient à une solution analytique complète du système d'équations couplées dans le cas d'un montage co-propageant où les atténuations sont égales pour la pompe et le signal.

$$N_p = \frac{N_0 e^{-\alpha L}}{1 + \frac{N_{S0} e^{KN_0 L_{eff}}}{N_{P0}}} \quad \text{IV-9}$$

$$N_s = \frac{N_0 e^{-\alpha L}}{1 + \frac{N_{P0} e^{-KN_0 L_{eff}}}{N_{S0}}} \quad \text{IV-10}$$

$\alpha$  c'est l'atténuation de la fibre, identique aux fréquences pompe et signal.

$N_{P0}$  le flux de photons pompe à l'entrée de la fibre.

$N_{S0}$  le flux de photons signal à l'entrée de la fibre.

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

$N_0 = N_{p_0} + N_{s_0}$  le flux total de photons.

Pour de faibles amplifications et des puissances de pompe fortes, l'exponentielle présente au dénominateur de NP devient négligeable devant un et l'on retrouve les résultats de l'approximation de la pompe sans déplétion.

Vu les puissances de pompe et de signal considérées par la suite, nous resterons souvent dans l'approximation de la pompe sans déplétion aussi bien pour l'évaluation du gain Raman que pour celle du bruit [31].

### IV.3.2 Le bruit dans l'amplificateur Raman

#### IV .3.2.1.Équations d'évolution du signal et des densités spectrales de bruit

Considérant que la puissance du signal varie peu au cours de la propagation, il résulte que le terme d'amplification Raman compense localement les pertes d'absorption de la fibre. Ainsi en se référant à l'équation d'évolution de la puissance moyenne du signal :

$$\frac{dN_s}{dz} = (-a_s + g_r P_p)N_s + (g_r P_p + a_s)h\nu_s + g_r P_s N_p \quad \text{IV-11}$$

$$\frac{dN_p}{dz} = (-a_s - g_r P_p)N_p + (g_r P_s + a_p)h\nu_p \quad \text{IV-12}$$

$N$ ,  $P$ ,  $g_r$ ,  $a$  et  $\nu$  désignent respectivement la densité spectrale de puissance de bruit, la puissance moyenne, le coefficient de gain Raman, le coefficient d'absorption et la fréquence optique. Les indices P et S indiquent respectivement la pompe et le signal. Dans (l'équation IV-11), le premier terme correspond à l'atténuation et l'amplification de la composante de bruit, le deuxième terme correspond au bruit de diffusion spontanée Raman et au bruit d'atténuation et le dernier terme représente le transfert du bruit de pompe vers le signal. Au niveau du transfert de bruit de pompe vers le signal, plus communément appelé transfert de bruit d'intensité relatif (RIN), le cas considéré s'affiche comme le pire des cas basse fréquence. Ce pire cas permet ainsi de ne pas prendre en compte la dépendance temporelle qui influe sur la différence de vitesse de groupe entre la pompe et le signal. Le premier terme de

(l'équation IV-12) correspond à l'onde pompe. Il est à noter que le coefficient de gain Raman dépend normalement de la nature de la diffusion suivant qu'elle est spontanée ou stimulée.

La diffusion spontanée Raman affichant une efficacité double du fait de la dépolarisation du bruit. Cet aspect est considéré par la prise en compte des composantes de bruit sur deux polarisations. La résolution de (l'équation IV-12) puis de (l'équation IV-11) avec l'hypothèse que la puissance signal reste constante donne l'évolution de la densité spectrale de puissance de bruit pour le signal [32].

$$N_s(z = L) = N_s + 2a_s L h \nu_s + a_s \frac{P_s}{P_p} (L h \nu_p + (N_p - h \nu_p) L_{eff}) \quad \text{IV-13}$$

#### IV.3.2.2. Facteur de bruit de l'amplificateur Raman

Le facteur de bruit est déduit à partir de (l'équation IV-13) en effectuant le rapport signal sur bruit optiques (SNR) pour un niveau de bruit en entrée limité au bruit quantique  $N_{s0} = h \nu_s$

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = 1 + 2La_s + a_s \frac{P_s}{P_p} \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_p} (L - L_{eff}) + \frac{N_{p0}}{h \nu_s} L_{eff} \right) \quad \text{IV-14}$$

Le facteur de bruit obtenu dépend du bruit d'atténuation et d'amplification par le terme  $2La_s = La_s + Lg_r P_p$ , de la puissance du signal et du niveau de bruit de pompe du fait du transfert de RIN de la pompe vers le signal.

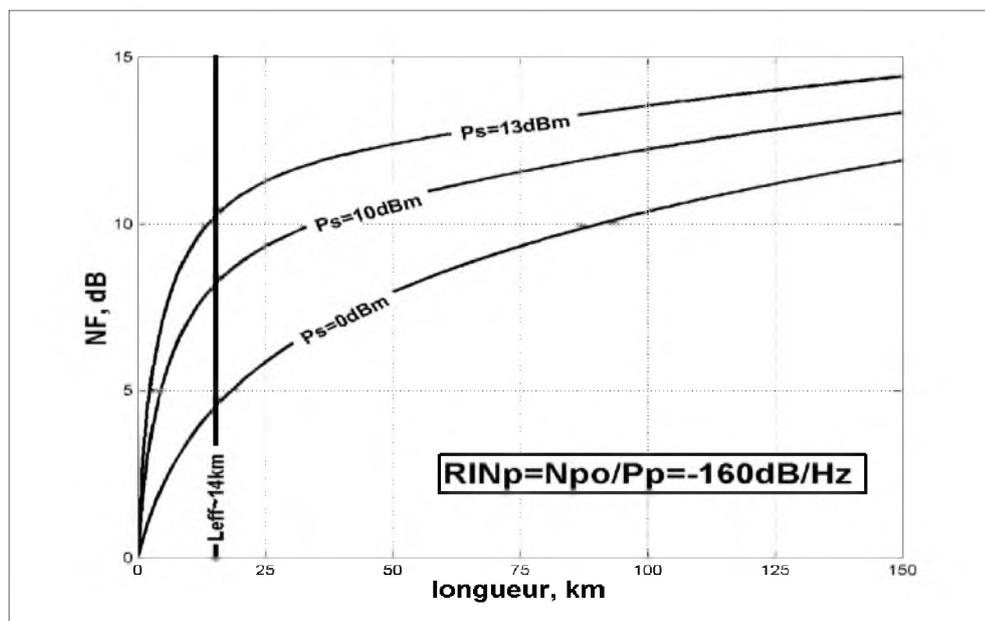


Figure IV-7 : Evolution du facteur de bruit en fonction de la puissance du signal à niveau de bruit de pompe constant.

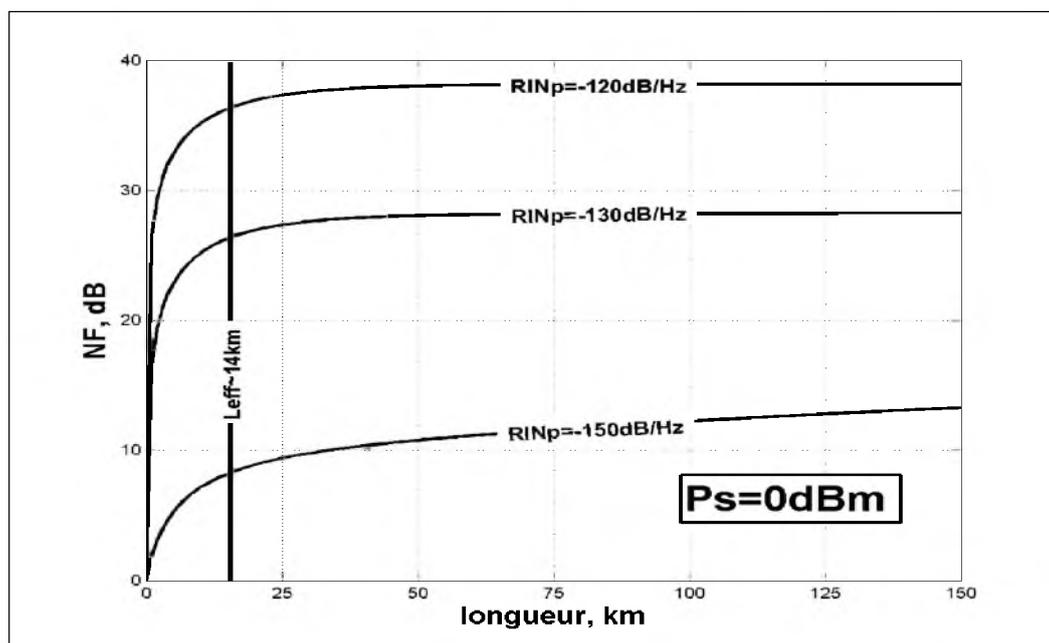


Figure IV-8 : Evolution du facteur de bruit en fonction du niveau de bruit de pompe à niveau de puissance signal constante

Figure IV-7 et IV-8 illustrent l'influence des niveaux de puissance du signal et de bruit de pompe sur les transferts de bruit de pompe vers le signal. L'amplificateur Raman considéré est constitué de 150 km de fibre monomode standard (SMF) ( $g_r=42,5 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,  $\alpha_s=0,2 \text{ dB/km}$ ,  $\alpha_p=0,3 \text{ dB/km}$ ,  $\lambda_p=1450 \text{ nm}$  et  $\lambda_s=1550 \text{ nm}$ ).

Le bruit de pompe interfère sur toute la longueur effective, puis du fait de la déplétion élevée du bruit de pompe après cette longueur, ces transferts deviennent négligeables d'autant plus que la puissance du signal est faible. Les transferts de RIN de la pompe vers le signal sont surtout assujettis par la valeur du RIN de la pompe. En effet, les excursions du facteur de bruit du fait de la variation de la puissance du signal restent faibles en comparaison des excursions du facteur de bruit dues à la variation de la valeur du RIN de la pompe.

### IV.3.2.3 Le rapport signal sur bruit

Le rapport signal à bruit, désigné par SNR pour "signal to noise ratio", est défini par le rapport du niveau de signal  $N_{\text{sin}}$  et du niveau de bruit  $N_{\text{ASE}}$  dans une bande de fréquence déterminée  $\Delta\nu$ . Comparer les valeurs de rapport signal à bruit en entrée et en sortie d'amplificateur permet de déterminer rapidement si l'amplificateur engendre une dégradation de la qualité du signal incident.

Une diminution du rapport signal sur bruit implique une augmentation plus forte du bruit que du signal à la traversée de l'amplificateur. Le rapport signal sur bruit en entrée est uniquement dépendant des paramètres de la source laser de signal utilisée.

$$\text{SNR}_{\text{out}} = \frac{N_{\text{sin}}}{N_{\text{ASE}}} G \quad \text{IV-15}$$

Le niveau de signal en sortie est égal à celui d'entrée multiplié par la valeur du gain net Raman,  $G$ , quant au niveau de bruit, il est essentiellement dû au bruit d'émission spontanée amplifiée  $N_{\text{ASE}}$  de l'amplificateur [32].

#### IV.4 Avantages d'amplificateur Raman

L'intérêt pour l'amplificateur Raman revient pour d'éventuels futures système a très grande nombre de longueur d'onde , car elle permet d'amplifier des longueur d'onde situées en dehors de la bande d'erbium, est ne nécessite pas de fibres spéciales :c'est la fibre de ligne elle-même qui devient amplificateur sous l'effet de l'onde pompe .

L'amplificateur Raman offre plusieurs avantages :

1. Faible niveau de bruit.
2. Conception simple : amplification directe du signal dans la fibre optique.
3. Flexibilité pour la sélection des longueurs d'onde : gain Raman dépend de la longueur d'onde de la pompe et pas d'un paramètre matériau sensible à la longueur d'onde.
4. Large bande passante.

#### IV .5 Comparaison entre les trois types d'amplificateurs

Les différents moyens d'amplification optique, dans le cadre des télécommunications autour de 1,55 $\mu$ m cites auparavant, ont été développés dans l'objectif de garantir une amplification optique du signal incident en ligne optimale. Cet objectif est atteint lorsque les systèmes autorisent :

1. un fort gain d'amplification (supérieur à 20dB).
2. un fort rapport signal sur bruit transmis (proche de 8dB).
3. une possibilité d'amplification sur une large bande spectrale (supérieure à 30nm).

L'amplificateur à semi-conducteur n'apparaît que très peu dans un système de transmission, car il présente aujourd'hui des caractéristiques assez peu favorables, au regard des EDFA. On notera cependant qu'il est le meilleur candidat à 1,3  $\mu$ m. De plus, il se prête à l'intégration monolithique, ce qui est difficilement réalisable avec les EDFA.

L'apparition de ces derniers a néanmoins eu des conséquences fondamentales. Ils ont permis de fabriquer un milieu de propagation sans perte sur une très grande distance dans les systèmes de transmission travaillant à 1,55 $\mu$ m. En les insérant périodiquement, ils trouvent

leur application dans les liaisons sous-marines. Ils introduisent de plus faibles pertes d'insertion, une faible distorsion du signal, un gain plus important et sont insensibles à la polarisation de la lumière incidente contrairement aux AOSC. Ceci conduit à préférer les EDFA. Leur plus gros défaut est leur limite à amplifier uniquement autour de 1550 nm. Chose qui peut être résolue en utilisant la nouvelle génération des amplificateurs Raman qui présentent une large bande d'amplification avec un faible bruit [33].

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques des trois amplificateurs mentionnés dans cette mémoire.

caractéristiques	EDFA	SOA	RAMAN
Gain	20 dB ou plus selon la concentration d'ions, la longueur de la fibre dopée et la configuration de pompe	20 à 30 dB	5-40 dB proportionnel à l'intensité de la pompe et la longueur de la fibre de transmission
Rapport signal/bruit	4dB	8dB	4dB
Puissance de saturation en sortie	13dBm	10dBm	Egale à la puissance de l'onde de pompe
Bande spectrale	30nm	60nm	50nm
Densité d'intégration	Faible	Très fort	Faible

Tableau IV-1 : Grandeurs caractéristiques associées aux différentes techniques d'amplification Optique

**IV .5 Conclusion**

Le présent chapitre était sur la description des amplificateurs Raman, phénomènes de diffusion, le gain Raman, le facteur de bruit, et le rapport signal sur bruit. Le chapitre, suivant sera sur la partie simulation par le logiciel OptiSystem pour les différents types de montages.

## Chapitre V

# Simulation et comparaison des résultats

## V.1 Introduction

Notre travail consiste à étudier une liaison de transmission à longue distance dépendant des performances des dispositifs utilisés pour amplifier le signal émis. Pour cela On va diviser le travail en trois parties, une pour les amplificateurs EDFA, la seconde pour les amplificateurs SOA, et la dernière partie pour les amplificateurs Raman.

## V.2 Présentation du logiciel OptiSystem

Dans notre travail nous avons opté pour un logiciel de simulation des systèmes de communications optique innovants qui conçoit, teste et optimise pratiquement n'importe quel type de liaison optique dans la couche physique d'un large éventail de réseaux optiques, il s'agit d'*Optisystem* qui est un simulateur basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communications par fibre optique figure (V.1).

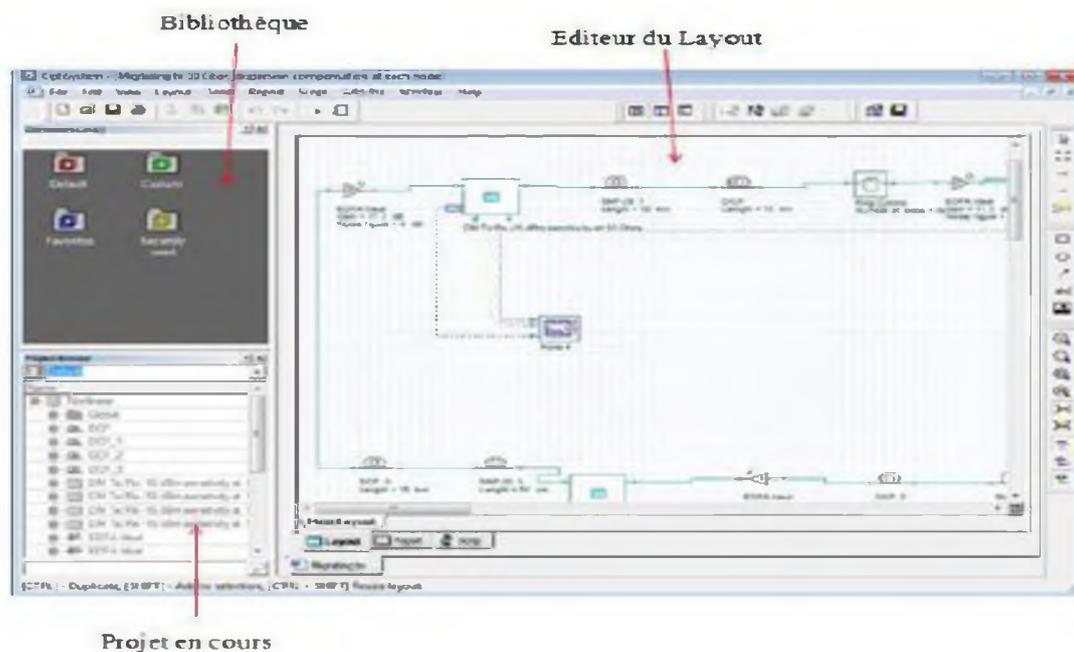


Figure V.1 : Schéma de l'interface OptiSystem

### V.2.1 Applications d'Optisystem

Parmi les diverses applications d'Optisystem nous allons citer les plus utilisées :

- La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- Le calcul du taux d'erreur binaire (BER) et le calcul du bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et optiques passifs (PON).
- L'espace libre pour les systèmes optique (OSA).
- La conception d'anneau SONET/SDH.
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

### V.2.2 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la Bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque des composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, il s'intègre aux équipements de test et de mesurer des différents fournisseurs.
- Les outils de visualisation avancée produisent le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation schémas et beaucoup plus.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire sur le moniteur au même port.

### V.2.3 Avantage du logiciel OptiSystem

Les avantages du logiciel OptiSystem sont:

- Obtenir un aperçu de performances du système de fibre optique.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation du système.
- Présentation virtuelle des options de conceptions.

### V.3.1 Module d'émission

L'émetteur est constitué d'un générateur de séquence binaire qui sert à la génération d'un train binaire d'information à envoyer. Ces données sont codées par un codage de type NRZ (Non Return to Zero) comme dans notre cas. Puis, ces données sont injectées vers un modulateur externe qui possède deux entrées. Une pour les données codées, et l'autre pour le système laser qui sert comme un modulant. Ce système laser est alimenté par une source de courant. Le modulateur utilisé dans notre cas est un modulateur à électro absorbant.

### V.3.2 Support de transmission

Le support de transmission est constitué de trois éléments principaux. Deux fibres optiques l'un qui possède une dispersion positif de longueur 100 km de type SMF (Single Mode Fiber) et l'autre une dispersion négative de longueur 50 km de type DCF (Dispersion Compensating Fiber), et un amplificateur optique. Ces trois composantes sont répétés plusieurs fois jusqu'à l'obtention de la longueur de transmission désirée.

### V.3.3 Module de réception

Le module de réception a pour objectif de convertir l'information provenant de la fibre sous forme des signaux optiques en des signaux électrique par l'utilisation des photodiodes (PIN, APD, DFB, ...). Puis un traitement électronique filtrage, amplification. Enfin, un circuit de décision qui sert à juger oui le bit « 1 » et le bit « 0 ».

Tableau suivant résume les paramètres de la liaison :

<b>Débit binaire</b> = 2000000000 bit/s		
<b>Longueur de séquence de bit</b> = 128 bits		
<b>Temps de window</b> = 5.12e-008		
<b>Emetteur</b>		
<b>Diodes lasers</b>	<b>Fréquence [0]</b> = 193.41 THz	<b>Puissance [0]</b> = 26 ,98dBm
<b>Générateur NRZ</b>	<b>Rise time</b> = 0.05 bit	<b>Fall time</b> = 0.05 bit
<b>Modulateur électro-absorption</b>	Tension de référence -1	
<b>Ligne de transmission</b>		
<b>Fibre optique</b>	L = 100 km et D = 17 Ps/nm.km	
<b>Fibre DCF</b>	L = 50 km et D = -34 ps /nm.Km	<b>Noise figure</b> = 4 dB
<b>Récepteur</b>		
<b>Filtre électrique</b>	<b>Fréquence de la coupure</b> = 0.75 * débit	<b>Ordre de filtre</b> = 2
<b>Photodiode PIN</b>	<b>Réceptivité</b> =0.9 A/W	<b>Courant d'obscurité</b> =10nA
<b>Photodiode PDA</b>	Gain 200	

Tableau Figure V-1 : les paramètres de la liaison.

### ❖ Première simulation avec les amplificateurs dopés erbium

#### ➤ Photodiode PDA

Dans cette partie on insère à chaque 150 km un amplificateur à fibre optique dopée en erbium et on utilise à la réception une photodiode PDA.

La figure IV-2 suivant montre le bloc de liaison qu'on a utilisé dans la simulation

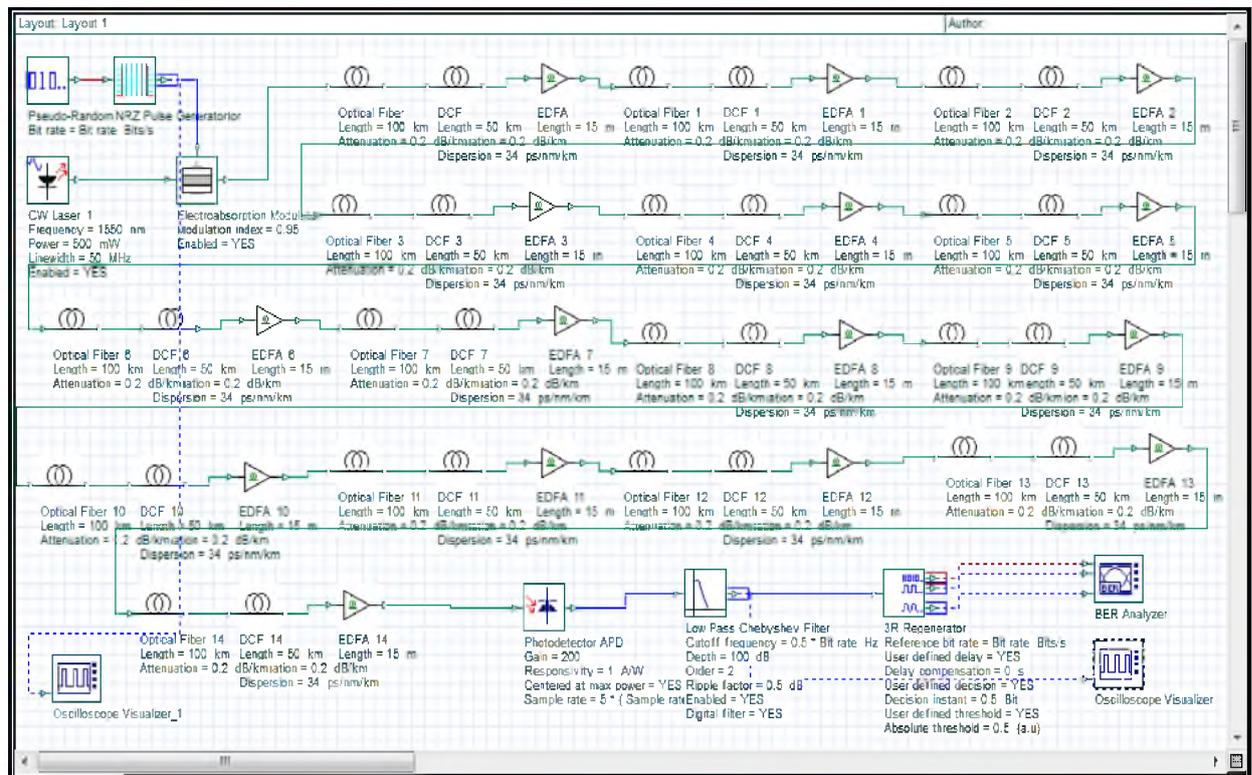


Figure V-2 : Schéma bloc de la liaison de simulation

les fenetres suivantes montrent les proprietes de l'EDFA qu'on a changée à chaque fois jusqu'à remarquer que le signal de sortie s'approche au signal d'entrée.

Main	Pum...	Cros...	Nume...	Polari...	Simul...	Noise	Rand...
Disp	Name		Value		Units	Mode	
<input checked="" type="checkbox"/>	Core radius				1.2	um	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Er doping radius				1.2	um	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Er metastable lifetime				15	ms	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Numerical aperture				0.24		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Er ion density				1e+025	m^-3	Normal
<input type="checkbox"/>	Loss at 1550 nm				0.1	dB/m	Normal
<input type="checkbox"/>	Loss at 980 nm				0.15	dB/m	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length				15	m	Normal

Main	Pum...	Cros...	Nume...	Polari...	Simul...	Noise	Rand...
Disp	Name		Value		Units	Mode	
<input checked="" type="checkbox"/>	Forward pump power				200	mW	Normal
<input type="checkbox"/>	Backward pump power				100	mW	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Forward pump wavelengt				980	nm	Normal
<input type="checkbox"/>	Backward pump waveleng				980	nm	Normal

Figure V-3: le paramétrage de l'amplificateur EDFA.

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

Les figures V-6 et V-7 montrent le signal d'entrée et le signal de sortie respectivement. On voit clairement une diminution du signal au niveau de la sortie (dégradation de signal) qui est due au phénomène d'atténuation et de la dispersion. Aussi, il y a une ambiguïté au niveau du circuit de décision.

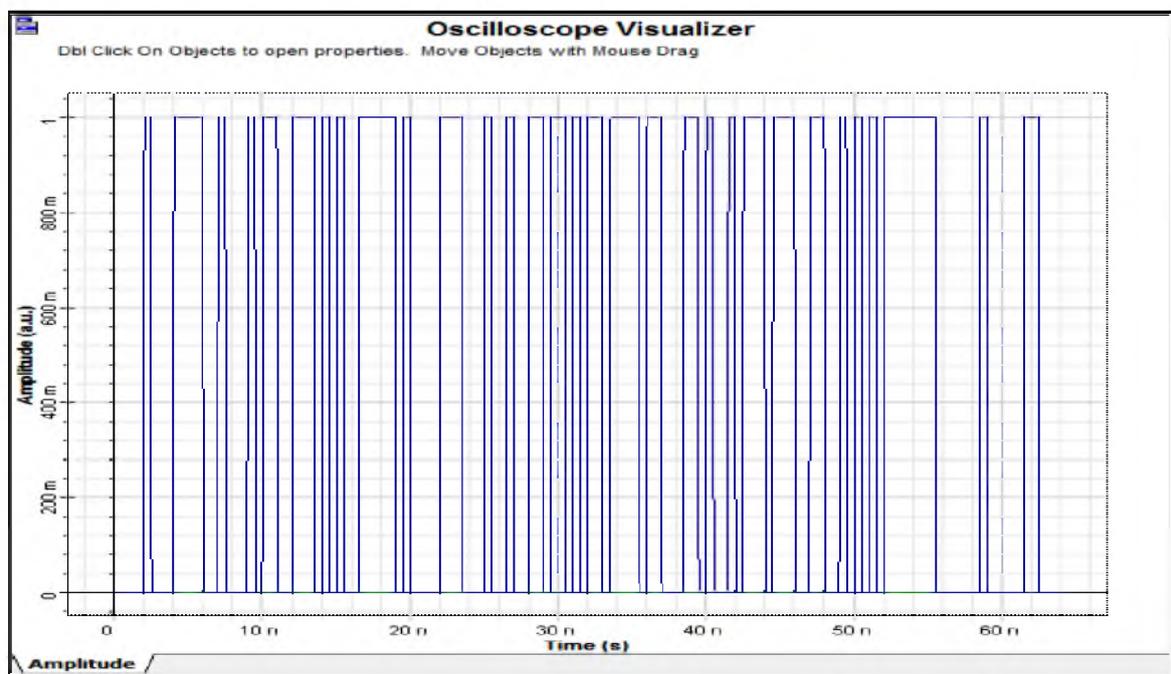


Figure V-4 : Visualisation globale de la puissance d'entrée.

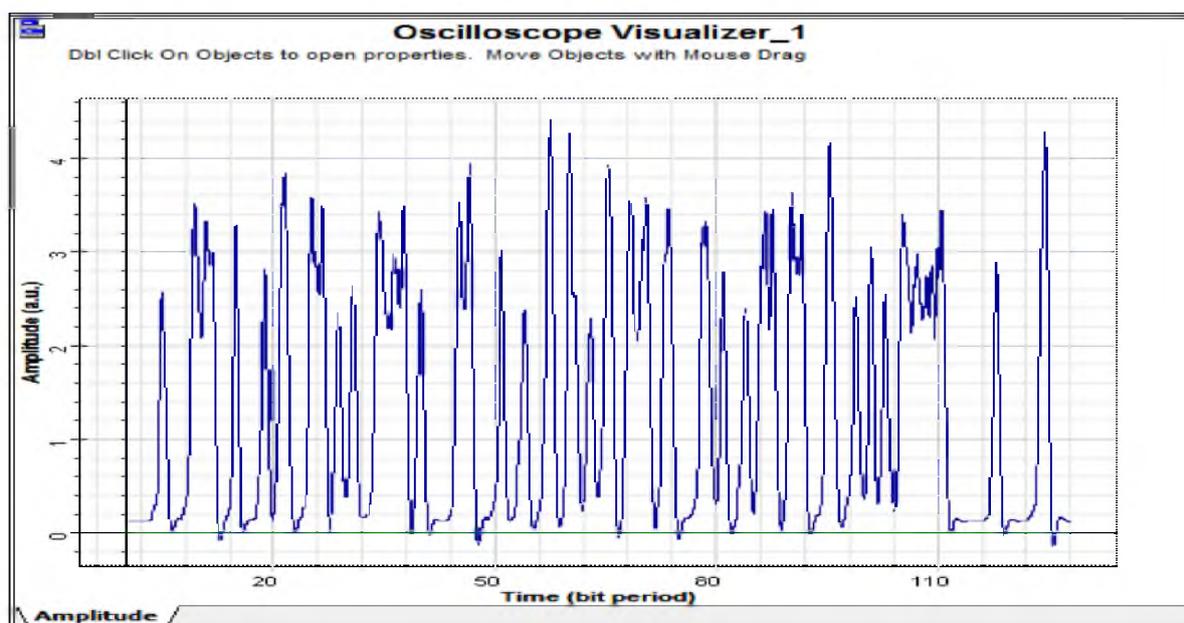


Figure V-5 : Visualisation globale la puissance de sortie

L'étude de tel liaison et peut être effectué à partir des formes temporelles des signaux figure V-6 et V-7. Il est également possible d'utiliser des outils propre à la caractérisation globale des liaisons numériques tels que le diagramme de l'œil ou le calcul de taux d'erreur binaire dans ce cadre nous avons présenté sur la figure V-8 le diagramme de l'œil obtenu dans la première simulation.

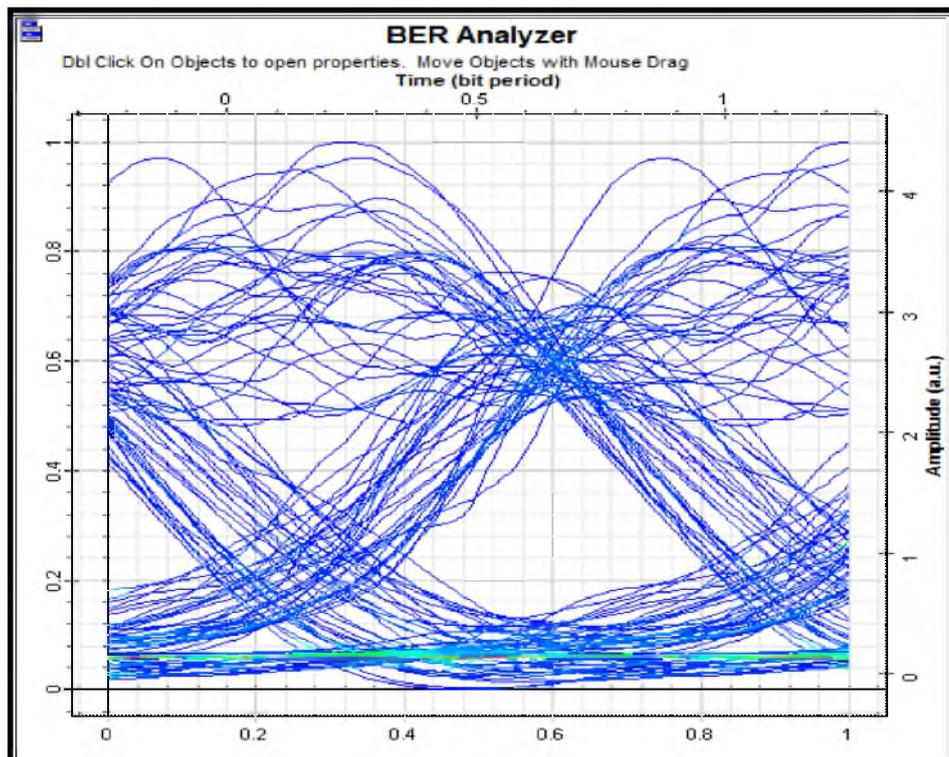


Figure V-6 : diagramme de l'œil

<b>Max. Q Factor</b>	<b>1.56566</b>
<b>Min. BER</b>	<b>0.0440864</b>
<b>Eye Height</b>	<b>-1.68833</b>
<b>Threshold</b>	<b>0.314419</b>
<b>Decision Inst.</b>	<b>0.347368</b>

Figure V-7 : tableau des parametres

D'après la figure V-7 le taux d'erreur binaire est égal à 0.044 donc il ya une faible dégradation de signal.

## ➤ Photodiode PIN

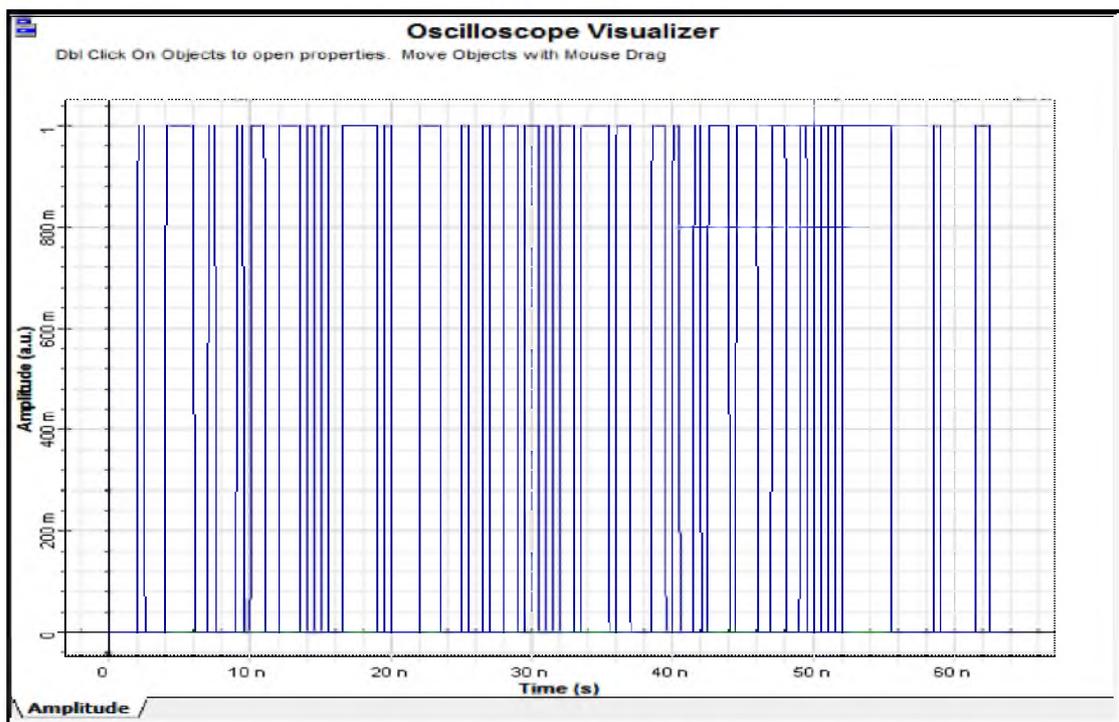


Figure V-8 : Visualisation globale de la puissance d'entrée.

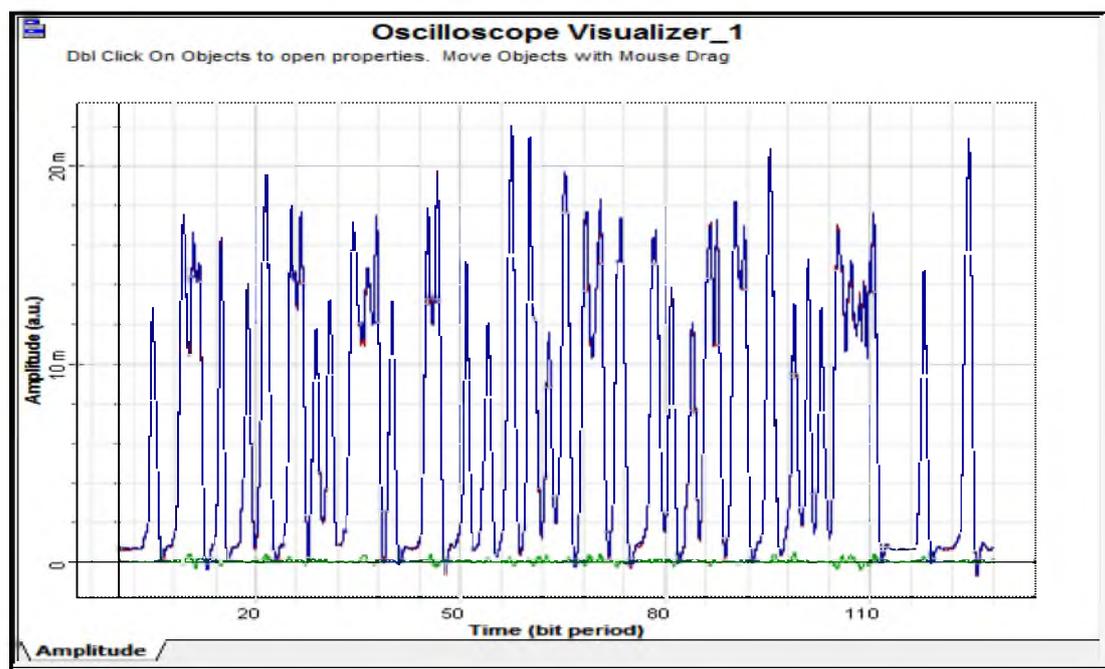


Figure V -9: Visualisation globale de la puissance de sortie.

Le signal à la sortie est dégradé par rapport à l'entrée. Le circuit de décision trouve des difficultés pour la détection des bits « 1 » et des bits « 0 ».

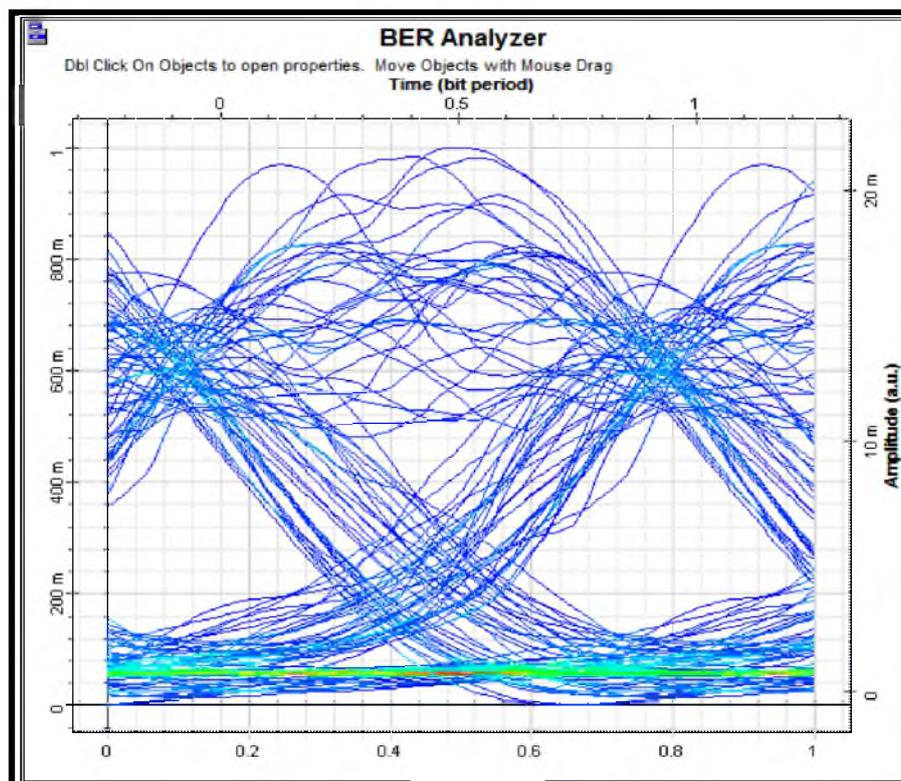


Figure V-10 : Visualisation globale la puissance de sortie

<b>Max. Q Factor</b>	0
<b>Min. BER</b>	1
<b>Eye Height</b>	0
<b>Threshold</b>	0
<b>Decision Inst.</b>	0

Figure V-11 : tableau des paramètres

Dans le diagramme de l'œil dans la Figure V-11 ou on a utilisé la photodiode PIN à la réception le taux d'erreur binaire est égale à 1 par contre le taux d'erreur pour le cas de la photodiode APD est de l'ordre de 0.044 ce qui rend la photodiode à avalanche est plus avantageuse que la photodiode PIN.

❖ Deuxième simulation avec les amplificateurs à base de Semi-conducteur

➤ Avec la photodiode APD

Dans la deuxième simulation on garde le même schéma précédent on remplace juste les amplificateurs EDFAs par des amplificateurs à semi-conducteur. Le schéma de liaison devient comme suit :

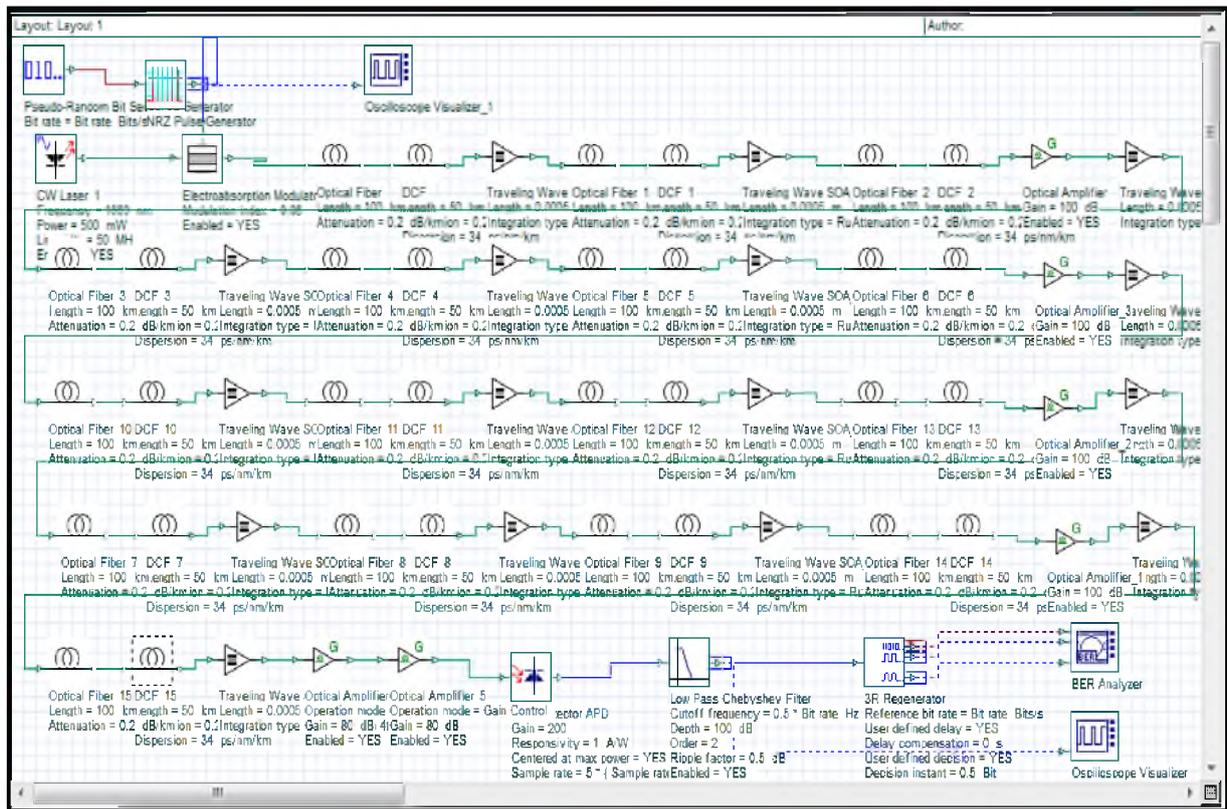


Figure V-12 : Schéma bloc de la liaison de simulation

les fenêtres ci-dessous montre les paramètres de l'amplificateur à base de semi conducteur qu'on a changée à chaque fois on basant sur les caractéristique de ce type d'amplificateur qu'on a étudié dans le troisième chapitre.

Main   Disp...   PMD   Nonl...   Num...   Gr...   Simu...   Noise   Rand...				
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	User defined reference w	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Reference wavelength	1550	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	100	km	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	0.2	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelengt	Attenuation.dat		Normal

Main   Disp...   PMD   Nonl...   Num...   Gr...   Simu...   Noise   Rand...				
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Group velocity dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Third-order dispersion	<input type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dispersion data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Frequency domain param	<input type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dispersion	-17	ps/nm/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion slope	0.075	ps/nm <sup>2</sup> /k	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Beta 2	15	ps <sup>2</sup> /km	Normal
<input type="checkbox"/>	Beta 3	0	ps <sup>3</sup> /km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion file format	Dispersion vs. wavelength		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion file name	Dispersion.dat		Normal

Figure V-13: le paramétrage de l'amplificateur SOA.

Grâce à l'oscilloscope qu'on a placé à l'entrée et à la sortie de notre chaîne on peut déduire les graphes suivants :

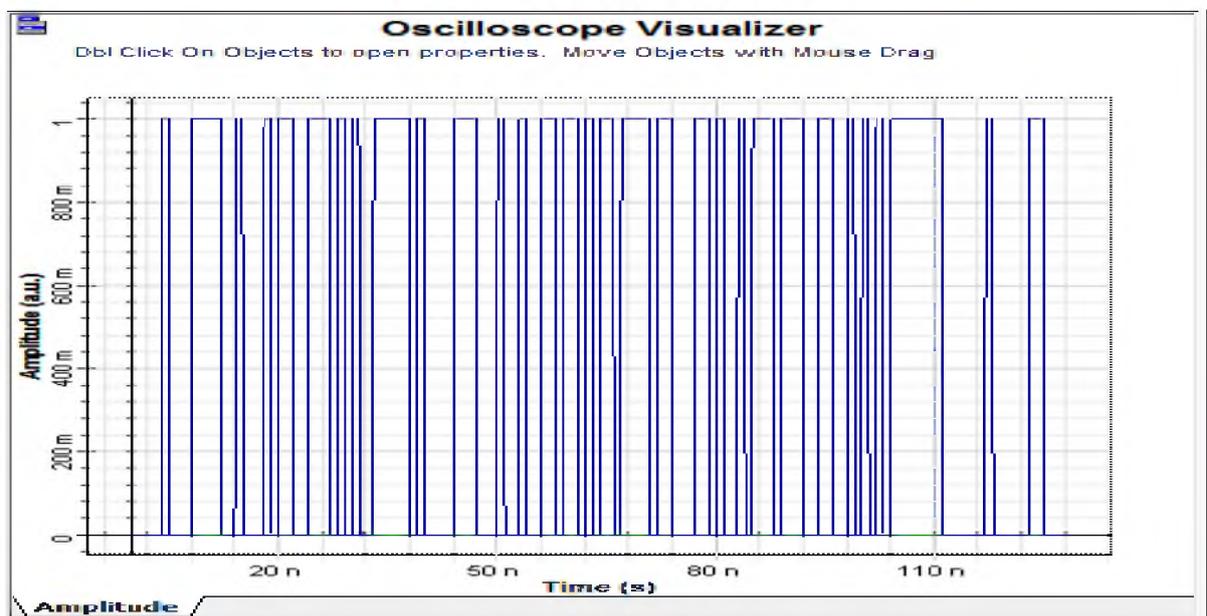


Figure V-14 : visualisation de la puissance de l'entrée

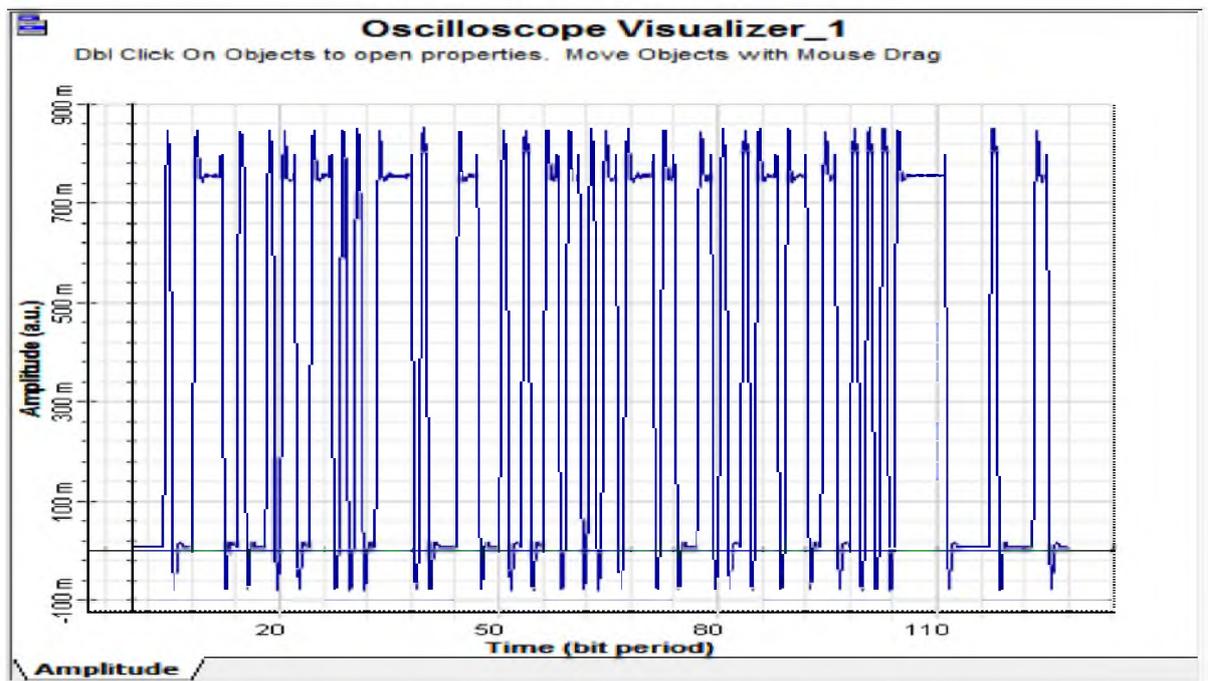


Figure V-15 : visualisation de la puissance de l'entrée

Après simulation, on voit bien que le signal de sortie ressemble bien au signal d'entrée (voir figure V-13 et figure V-14). L'atténuation du signal est améliorée par rapport au précédent. Aussi, on peut faire la différence facilement entre les bits « 1 » et « 0 » clairement par rapport aux amplificateurs EDFA.

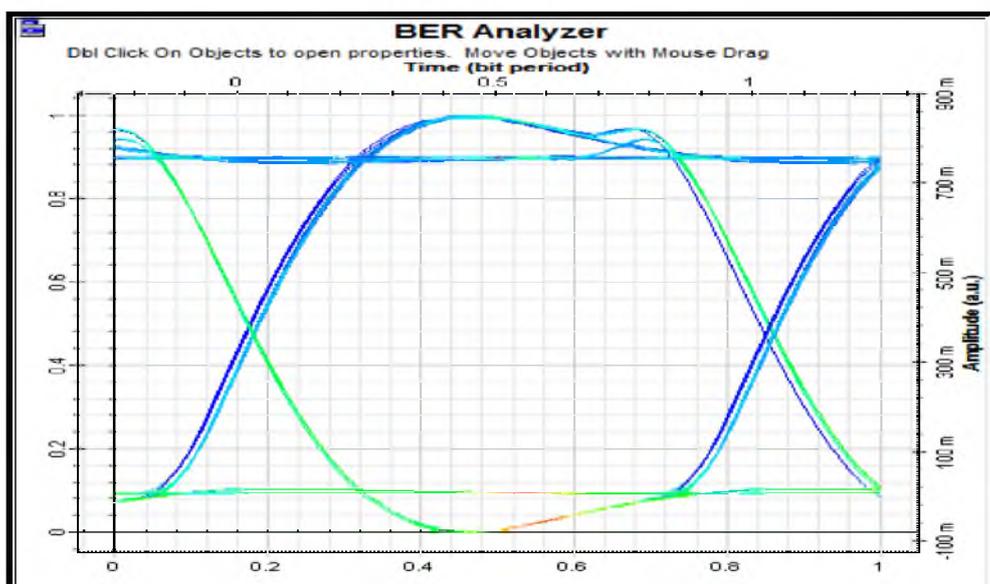


Figure V-16 : diagramme de l'oeil

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

Max. Q Factor	75.5948
Min. BER	0
Eye Height	0.723847
Threshold	0.179416
Decision Inst.	0.236842

Figure V-17 : tableau des paramètres

La figure V-15 montre que le diagramme de l'œil totalement claire et sans bruit avec un taux d'erreur de 0.08.

➤ Avec la photodiode PIN

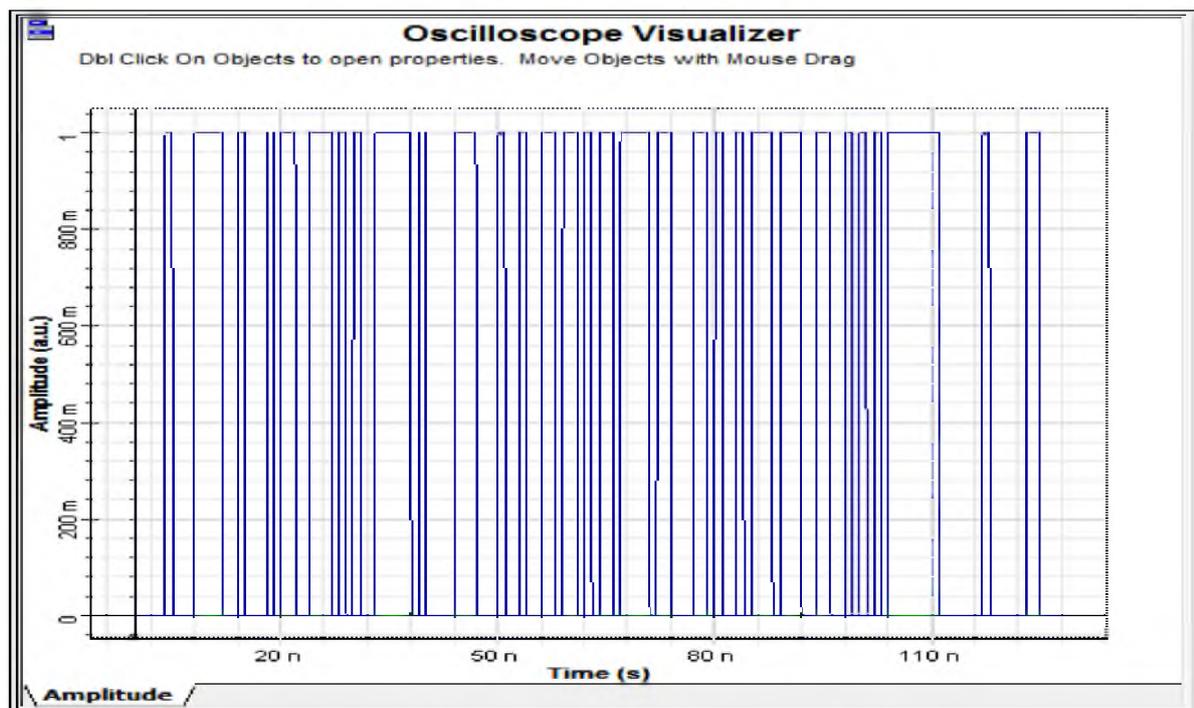


Figure V-18 : visualisation de la puissance de l'entrée.

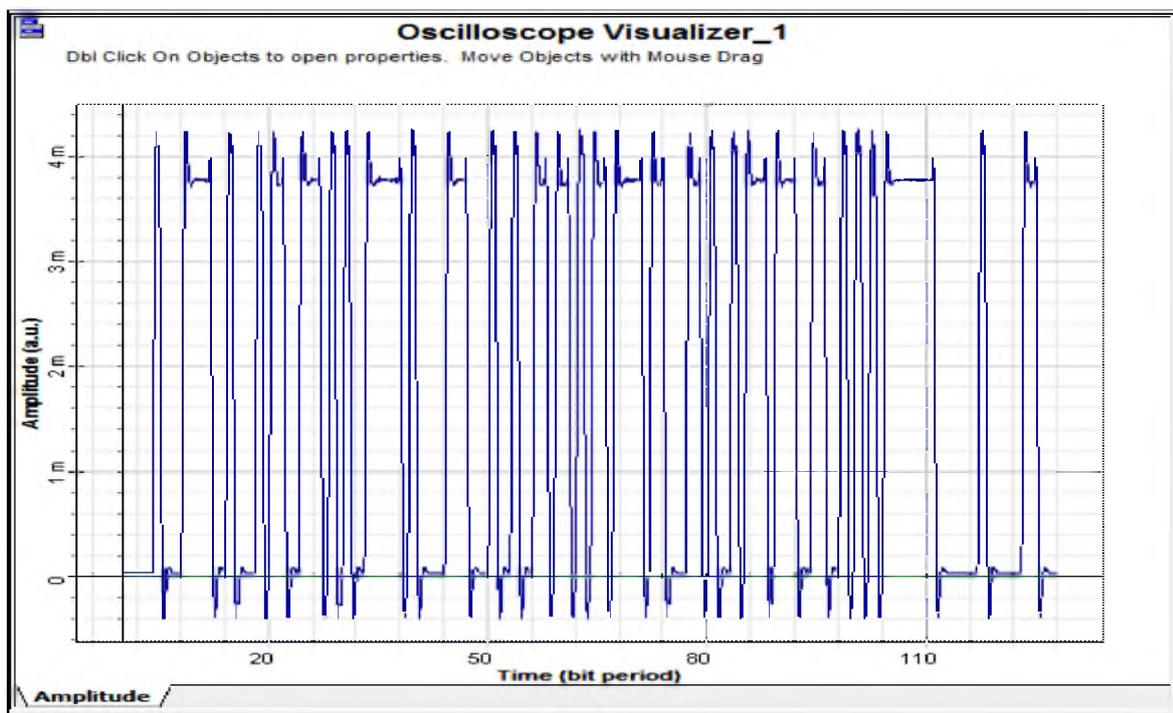


Figure V-19 : Figure : Visualisation globale de la puissance de sortie.

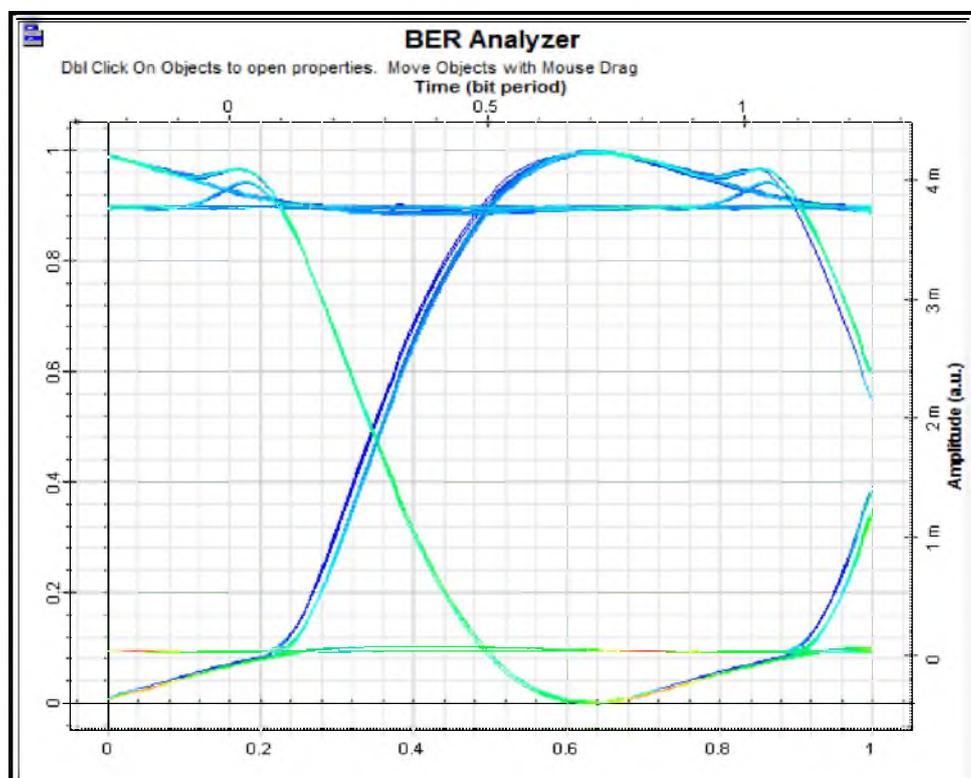


Figure V-20: Diagramme de l'œil.

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

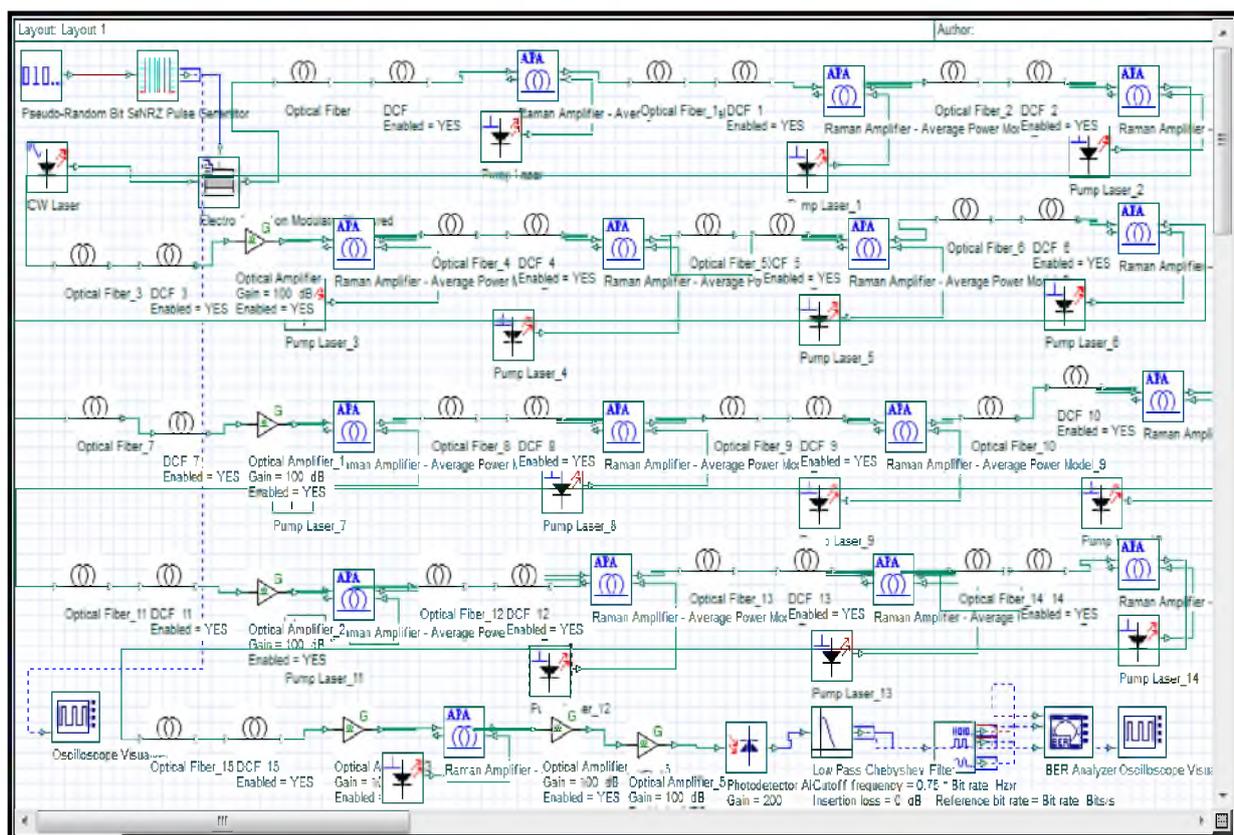
Max. Q Factor	0
Min. BER	1
Eye Height	0
Threshold	0
Decision Inst.	0

Figure V-21: tableau des paramètres

Le taux d'erreur dans ce cas-là est faible par rapport à la photodiode APD. Généralement les deux photodiodes PIN et APD présentent les mêmes résultats, pas grande différence.

❖ **Troisième simulation avec les amplificateurs de type Raman**

Les amplificateurs SOA a été changé par des amplificateurs de type Raman.



FigureV-22: Schéma bloc de la liaison de simulation :

Les tableaux de paramétrages suivants montrent les paramètres de Raman qu'on insérer pour faire la simulation :

Étude et comparaison entre les différents types d'amplificateurs optiques : EDFA, SOA, et Raman

➤ Avec la photodiode APD

Main   Enhanced   Numer...   Graphs   Simula...   Noise   Random...					
Disp	Name	Value	Units	Mode	
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	10	km	Normal	
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal	
<input type="checkbox"/>	Attenuation	0.2	dB/km	Normal	
<input type="checkbox"/>	Attenuation file	FiberLoss.dat	...	Normal	
<input checked="" type="checkbox"/>	Effective area data type	Constant		Normal	
<input checked="" type="checkbox"/>	Effective interaction area	72	um^2	Normal	
<input type="checkbox"/>	Effective interaction area f	EffectiveArea.dat	...	Normal	
<input checked="" type="checkbox"/>	Raman gain type	Raman gain		Normal	
<input checked="" type="checkbox"/>	Raman gain peak	1e-013		Normal	
<input checked="" type="checkbox"/>	Raman gain reference pu	1000	nm	Normal	
<input type="checkbox"/>	Gain X frequency	RG.dat	...	Normal	

Main   Enhanced   Numer...   Graphs   Simula...   Noise   Random...					
Disp	Name	Value	Units	Mode	
<input type="checkbox"/>	Temperature	300	K	Normal	
<input type="checkbox"/>	Polarization factor	2		Normal	
<input type="checkbox"/>	Rayleigh back scattering d	Constant		Normal	
<input type="checkbox"/>	Rayleigh back scattering	5e-005	1/km	Normal	
<input type="checkbox"/>	Rayleigh back scattering fl	Rayleigh.dat	...	Normal	
<input type="checkbox"/>	Upper pump reference	1450	nm	Normal	
<input type="checkbox"/>	Enable dispersion	<input type="checkbox"/>		Normal	
<input type="checkbox"/>	Dispersion	16.75	ps/nm/km	Normal	
<input type="checkbox"/>	Dispersion slope	0.075	ps/nm^2/k	Normal	
<input checked="" type="checkbox"/>	Reference wavelength	1550	nm	Normal	

FigureV-23: le paramétrage de l'amplificateur Raman.

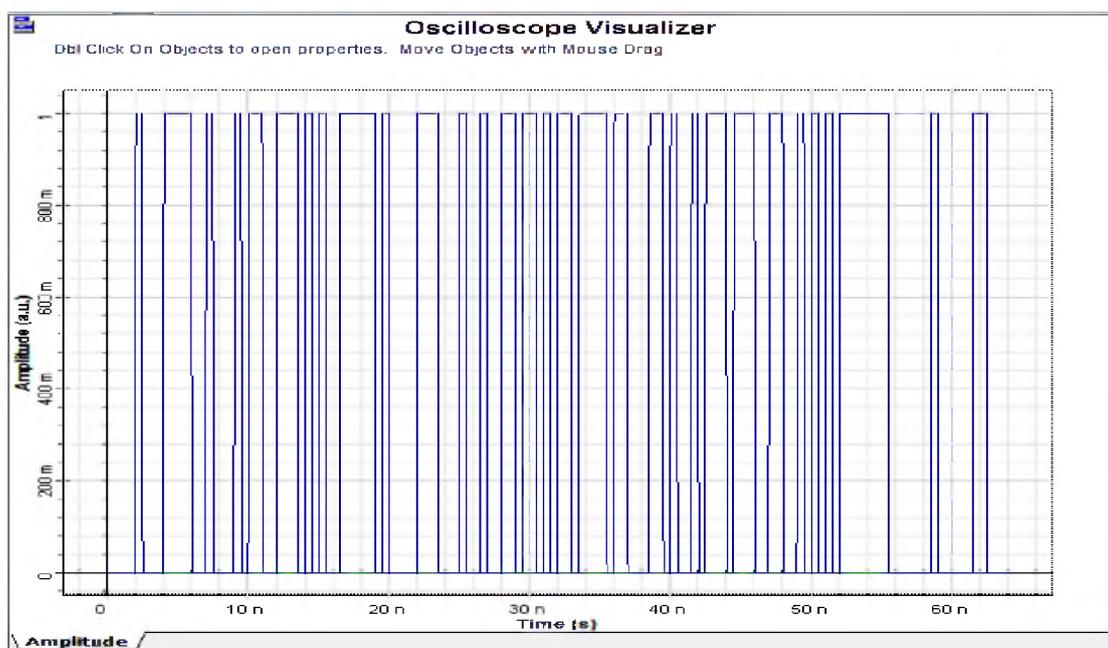
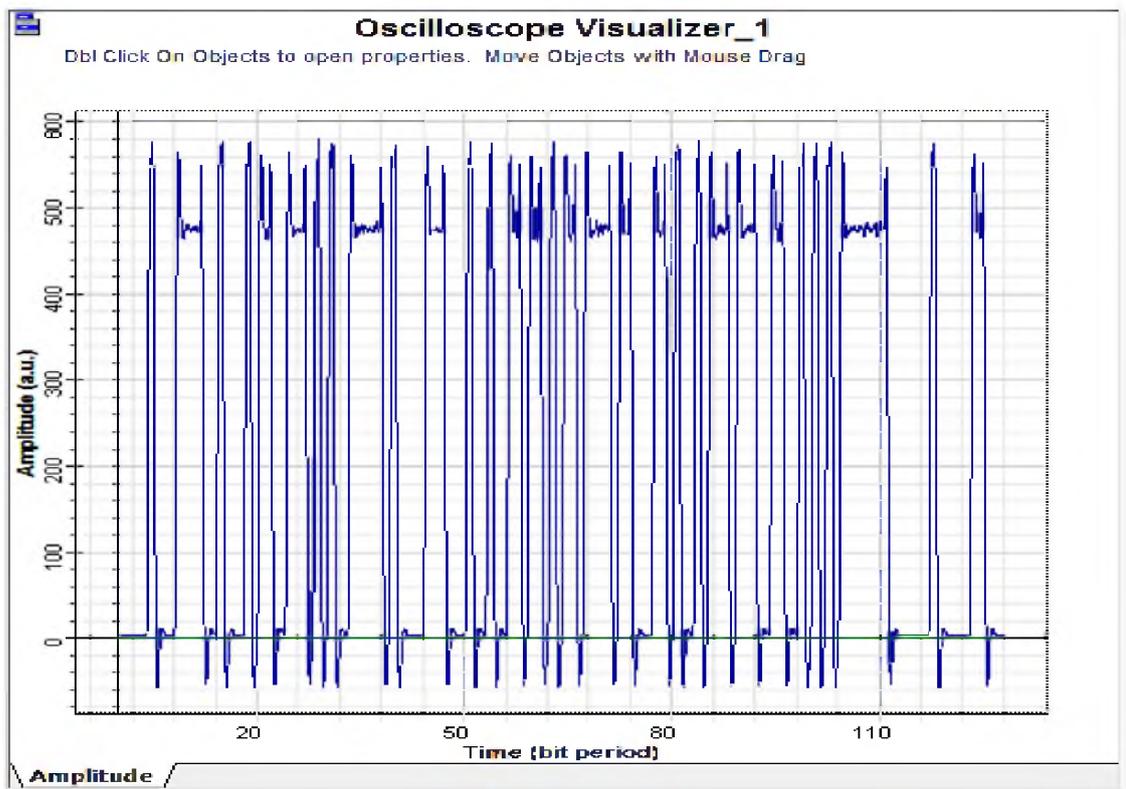


Figure V-24 : visualisation de la puissance de l'entrée

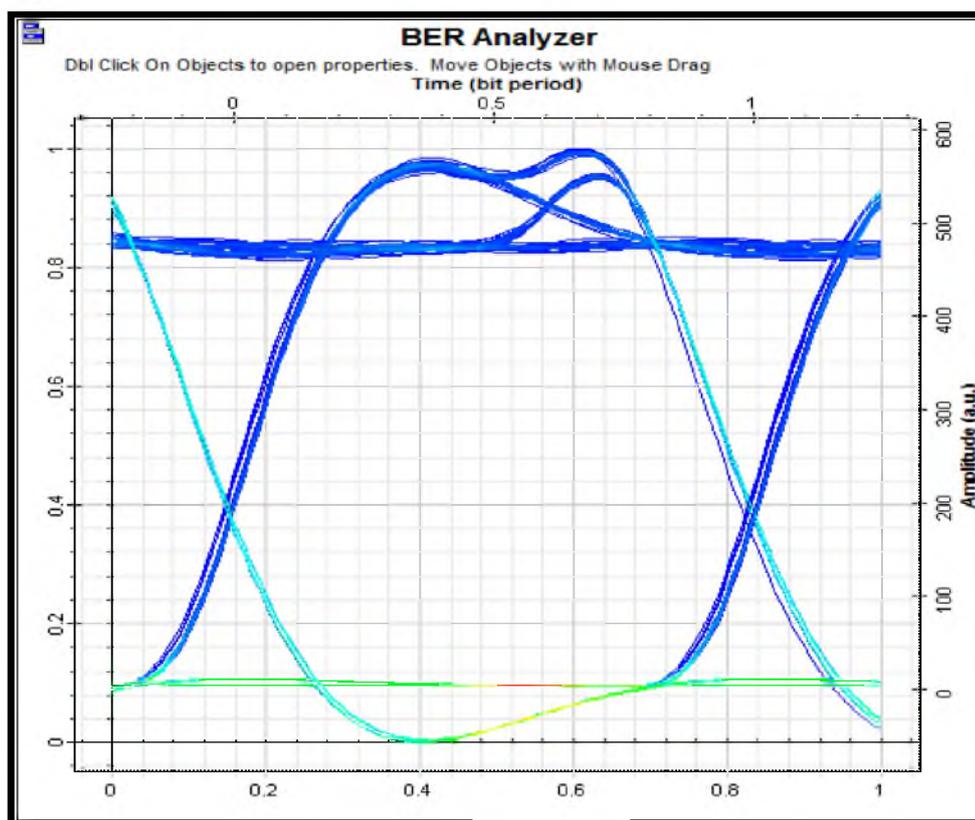
A la sortie on a :



FigureV-25: Puissance de sortie.

Après, simulation avec les amplificateurs Raman on voit clairement que le signal de sortie ressemble beaucoup au signal d'entrée. Presque pas de dégradation de la puissance du signal. Détection des bits était facile et simple pour ce montage.

Concernant le diagramme de l'œil figure V-23 montre un œil bien ouvert c à d taux d'erreur très faible, facteur de bruit aussi négligeable.



FigureV-26: Diagramme de l'œil

➤ Avec la photodiode PIN

La fenetre ci-dessous montre les parametre de la photodiode PIN

Main   Downsampling   Noise   Random numbers				
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Responsivity	1	A/W	Normal
<input type="checkbox"/>	Dark current	10	nA	Normal

FigureV-27: les paramètres de la photodiode PIN

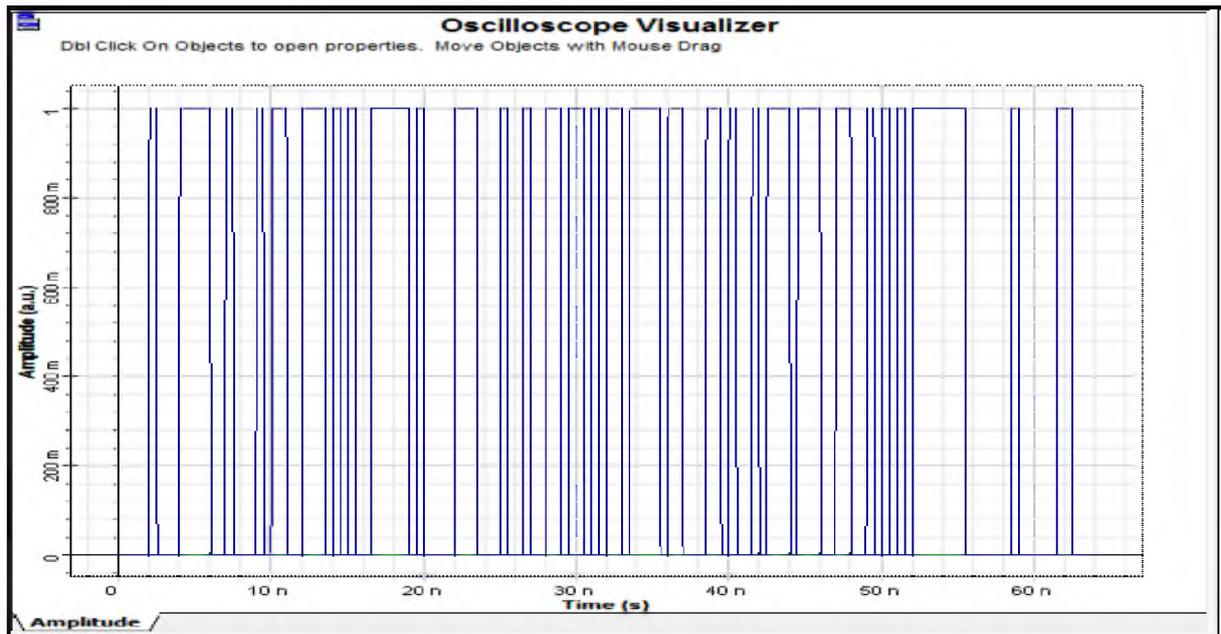


Figure V-28 : visualisation de la puissance de l'entrée

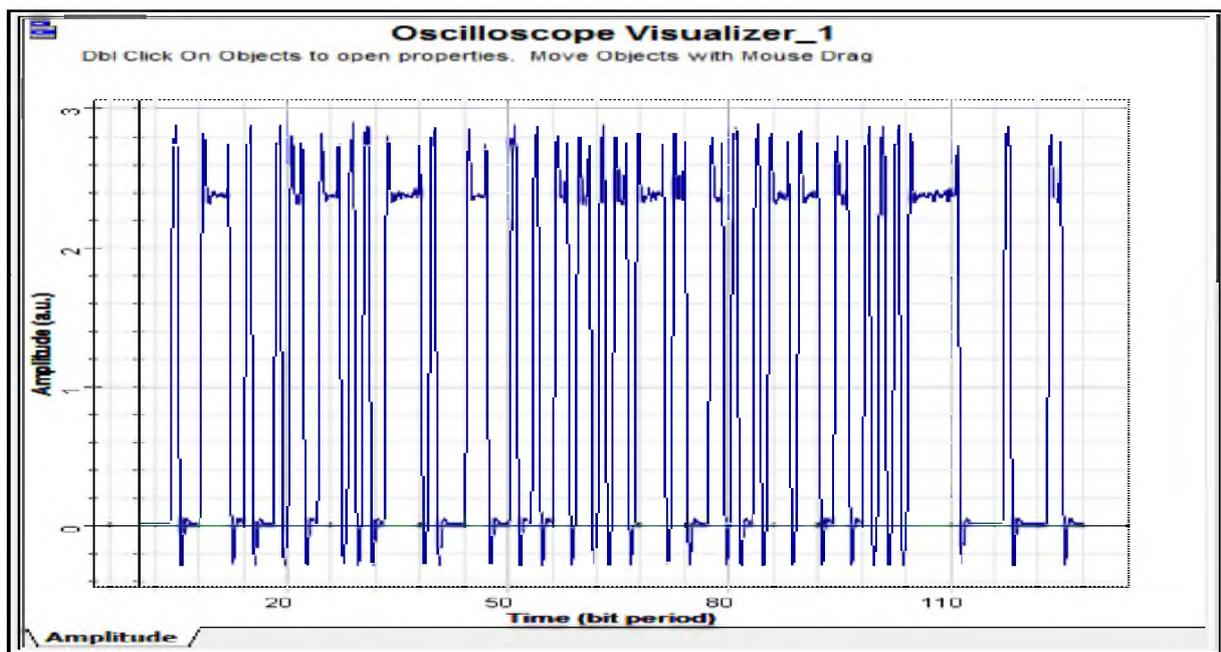
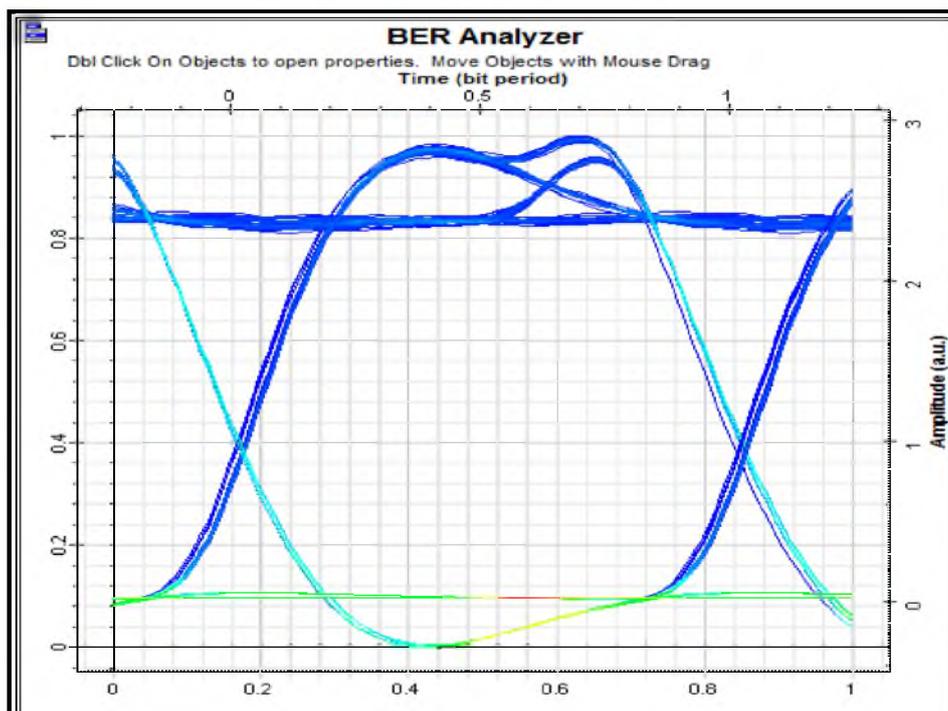


Figure V-29 : Visualisation globale de la puissance de sortie.



FigureV-30: Diagramme de l'œil

Max. Q Factor	80.9758
Min. BER	0
Eye Height	2.30217
Threshold	1.2036
Decision Inst.	0.205283

FigureV-31: Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil présente une ouverture satisfaisante pour un débit de 2 Gbit/s donc l'amplificateur Raman fonctionne dans des conditions pratiquement idéales ce qui est cohérent avec les caractéristique statique de l'amplificateur Raman.

#### V.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré pour tester les trois types d'amplificateurs optiques. Les simulations montrent que l'amplificateur Raman est présent quelques particularités par rapport aux autres amplificateurs optiques comme le signal binaire et moins atténué, le diagramme de l'œil clair et net, le facteur de qualité amélioré pour les amplificateurs Raman.



# Conclusion générale

### Conclusion générale

Notre travail a été porté sur les amplificateurs optiques alors on a la réalisation d'une chaîne de transmission optique de 2400 km avec un débit de 2 Gbit/s par un logiciel de simulation *OptiSystem*. La partie émission utilise un codage de type, NRZ, suivi d'une modulation externe puisqu'il présente beaucoup d'avantages par rapport à la modulation directe. Le modulateur utilisé est de type électro-absorbant. Le support de transmission comporte une fibre de type, SMF, une fibre de type, DCF et un amplificateur optique. Pour avoir répondu au cahier de charge c.-à-d. avoir une longueur de la fibre 2400 km, il faut juste répéter ces trois composantes par un nombre fini de fois. Concernant la partie réception, deux types de photodiodes ont été utilisés.

Notre travail était basé sur l'étude des types d'amplificateurs optiques. Au premier temps, on a commencé par les amplificateurs optiques dopés en erbium. Puis, les amplificateurs à base de semi-conducteurs. Enfin, les amplificateurs de type Raman. Les simulations montrent que l'amplificateur Raman apporte beaucoup d'avantages par rapport aux autres amplificateurs. Néanmoins, les amplificateurs à base de semi-conducteurs sont faciles et compacts pour les utilisations que les amplificateurs dopés en erbium.

Nous souhaitons que nos futurs étudiants continuent d'améliorer la performance du système en augmentant les débits binaires. On sait bien lorsque l'on augmente le débit binaire, il faut prendre en considération les effets non linéaires qui présentent un handicap pour le haut débit.

# Bibliographie

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Pierre locoy, Livre Télécoms sur fibre optiques, lavoisier 2008.
- [2] H.Berahmi, « Etude 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 Toulouse III, Le 13 octobre 2010.
- [3] N. Boudrioua, « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD », pour obtenir le grade de docteur de l'Université Paul Verlaine – Metz, Ecole Doctorale IAEM – Lorraine, 2007
- [4] N. Boudrioua, A. Dandache, A. Boudrioua, R. Kremer, Y. Zouine et C. Aupetit-Berthelemot, 'Effets de la dispersion chromatique et la dispersion de mode de polarisation dans les liaisons numériques optiques à haut débit', JNOG 2005 (Journées Nationales d'Optique Guidée), Chambéry, Novembre 2005 – Communication par affiche.
- [5] A .Bendrihem, « Etude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques », Magistère, Université de Batna, Algérie
- [6] F.Gerome, « Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM », Thèse de doctorat, université de limoges ,2005
- [7] R. SAIDI, « Etude d'une structure de liaison par fibre optique caractérisation de la propagation et bilan énergétique », Mémoire de magister, Université de Biskra, Algérie, 2009
- [8] A.Bouzidi Tani « Effet de l'espacement inter-canal et du débit binaire sur une liaison WDM », Master, Université Abou-Bfekar Blekaid Tlemcen, 2013
- [9] M .Myara « Amplificateur optique », notes de cours, université Montpellier ,2008
- [10] Melle ;H .Billami I et Melle R. Bendahmane, « Etude d'un réseau optique ADM 10 Gbit/s », Mémoire de Master, université abou-bekr Belkaid .
- [11] C. Boiserobert et Z. Toffano, « Cours de DESS et DEA d'Optique et Optoélectronique », Université de Nantes, 2001.

- [12] F.Mdjoub, « optimisation par la simulation system d'une chaine de transmission numérique par fibre optique haut débit », mémoire de magister université abou-bakr Belkaid Tlemcen 2010.
- [13] Mr B .Bousbir « Etude et optimisation des différents paramètres d'un amplificateur à fibre optique dopée avec des ions de terres rares », mémoire de magistère, université de Badji Mokhtar anabas, 2009.
- [14] K.Merzouk, « Etude d'un system bas cout de transmission optique par multiplexage temporel », HAL archives ouvertes 2009
- [15] S .Hilaire, « Conception, fabrication et caractérisation de fibres microstructures dopées erbium pour application aux amplificateurs optiques », Thèse de doctorat, université de LIMOGES, 2004.
- [16] Europeana : [www.europeana.eu/portal](http://www.europeana.eu/portal)
- [17] J .Maury, « Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », université de LIMOGES ,2004.
- [18] M .Baghriche et S. Sabeur, « Caractérisation de Fibres dopées Terres Rares », Rapport de stage tuteuré en laboratoire, Université Nice Sophia-Antipolis 2014.
- [19] j. Maury, « Etude des caractéristiques d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice des systèmes chromatique », thèse de doctorat université de Limog 2003
- [20] J. Wiley ,E. Desurvire , « Erbium Doped Fiber Amplifiers », (1994) .
- [21] W.Kara Mohamed, «Les Structures de bandes électroniques et les propriétés relatives aux semi-conducteurs quasi binaires  $(\text{GaP})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$  », Thèse de doctorat,Univercité Mohamed khider de Biskra,2012 .
- [22] O .Sediki, Optique Fondamentale, Licence L3, Photonique–information–communication–Système , université abou-bakr Belkaid Tlemcen 2010
- [23] A.Aouina « Role du rayonnement dans l'élaboration et l'étude de nanoagrégats semi-conducteur de ZnS », mémoire de magister, Université Mentouri Constantine,
- [24] A.Bechiri, « Effets des ordres et substrat sur la structure électronique dans les alliages semi-conducteur III-V », Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2006

- [25] A.Bechir, « Effet du des orde et du substrat sur la structurelle électrique dans les alliage semiconducteur III-V »,Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine,2006
- [26] P. Morel « Modélisation des amplificateurs optiques à semi-conducteurs : du composant au système», thèse de doctorat, l'Université de Bretagne Occidentale, 2006
- [27] S.Huyghe « Fiabilité des amplificateurs optiques a semi-conducteur 1.55  $\mu\text{m}$  pour des applications de Télécommunication : Etude expérimentale et modélisation physique », L'université Bordeaux 1,2005
- [28] R. H. Stolen et E. P. Ippen, « Raman gain in glass optical waveguides », 1973
- [29] R.Laruinaz, « Biomolécules et system nanostructures : caractérisation par spectrométrie Raman exalté de surface (SERS) », thèse de doctorat université Bourgogne 2014
- [30 ] I.ELMENSOURI , « impulsionnelle picoseconde tout-optique à très haut débit », thèse de doctorat université de Bourgogne
- [31] k.Kafing,«Amplification Raman stimulé de signaux hyperfréquence sur porteuse optique» .thèse de doctorat. de L'université Paris XI ORSAY, 2006 .
- [32] B. Bristiel et p. Gallion. « Bruits d'un amplificateur Raman Transparent a distribution de gain quasi-uniforme », Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications
- [33] Jean-Louis Vetneuil , « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique a 40 Gbits/s, Thèse de doctorat ,université de Limoges,2003.

**Résumé :** Les amplificateurs optiques ont connu un essor important grâce aux télécommunications optiques pour régénérer le signal. Comme elles amplifient toutes les longueurs d'onde dans un domaine, elles ont permis le développement de la technologie DWDM. Les amplificateurs optiques sont utilisés dans le domaine des télécommunications à fibres optiques et dans certaines applications métrologiques de faible flux lumineux. Les matériaux utilisés peuvent être aussi bien des cristaux (semi-conducteurs) que des matériaux amorphes (silice dopée).

Notre travail sera consacré à l'étude des différents amplificateurs optiques et voir l'importance de l'amplification optique dans une chaîne de transmission par fibre optique.

**Mots clés :** Inversion de population, pompage, lasers, fibre optique, amplificateur, EDFA, SOA, dopage, WDM, cristaux.

**Abstract:** Optical amplifiers have boomed thanks to optical telecommunications to regenerate the signal. As they amplify all wavelengths in one area, they have allowed the development of DWDM technology. Optical amplifiers are used in telecommunications optic fiber and some metrological applications of low light output. The materials used can be either crystal (semiconductor) as amorphous material (doped silica).

Our work will be devoted to the study of various optical amplifiers and see the importance of optical amplification in an optical fiber transmission chain.

**Keywords:** population inversion, pumping, laser, optical fiber amplifier, EDFA, SOA, doping, WDM, crystals.