

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université A.MIRA-Bejaia
Faculté De Technologie
Département Génie électrique



MEMOIRE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Télécommunication
Spécialité : Système des Télécommunications

Présenté par
AYAD Tilleli
BENSADI Lilia

Thème

***Modélisation d'un amplificateur optique dopée en
Erbium EDFA***

Soutenue le : 20 juin 2018

Devant le Jury composé de :

M. ALLICHE.A
Mme. BOUNCER.
M. BERRAHS
Mme. BOUCHOUCHA.L

Président
Examineur
Promoteur
Co-Promoteur

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Nous tenons à présenter notre profonde gratitude à nos promoteurs M. BERRAH et Melle. BOUCHOUCHA, qui nous ont accordé l'assurance de suivre notre travail avec bienveillance, en nous apportant conseils et orientations utiles à son élaboration. C'est donc avec reconnaissance que nous les remercions, pour leurs engagements à la réalisation de ce présent mémoire.

Nous remercions également les membres du jury qui ont consacré de leur temps à ce modeste travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements aux enseignants du département du génie électrique de l'université de A/Mira Bejaia, qui nous ont enseigné et dirigés durant tout notre parcours.

Il nous est important de remercier nos collègues des deux sections systèmes des télécommunications et réseaux pour leur aide indéniable.

Il nous tient à cœur de remercier nos parents, nos frères et sœurs qui nous ont apporté soutien et courage pendant toute notre scolarité et en particulier pour la réalisation de ce modeste projet.

Nous n'oublions pas aussi nos amis(es) qui nous ont été d'une aide importante et des conseils perspicaces pour le bon déroulement du modeste travail de recherche accomplie dans ce projet, en particulier Bilal, Seddik, Saludja et Imene.

Nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce projet.

Lilia et Tilleli

Dédicaces

A elle, qui était pluriel.

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Table des matières	
Liste des abréviations	
Liste des variables	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	
Chapitre I: Liaisons en fibre optique	
Introduction	3
I.1. Chaîne de transmission.....	3
I.1.1. Emetteur optique.....	3
I.1.1.1. Les diodes électroluminescentes LED (Light Emitting Diode)	3
I.1.1.2. La diode LASER	4
I.1.1.2.1. Les différents types de modulation.....	4
I.1.1.2.2 Les différents types de LASER	7
I.1.1.2.2.1. Laser Fabry-Pérot	7
I.1.1.2.2.2. Laser VCSEL (cavité verticale).....	7
I.1.1.2.2.3. DFB (Distributed Feed Back)	7
I.1.1.3. Comparaison entre les émetteurs optiques	8
I.1.2. Canal de transmission (fibre optique).....	9
I.1.2.1. Définition	9
I.1.2.2. Fabrication d'une fibre optique.....	9
I.1.2.3 Guidage du signal optique.....	11
I.1.2.4. Types de fibres optiques.....	12
I.1.2.4.1. Fibre optique monomode.....	12
I.1.2.4.2. Fibre optique multimode	12
I.1.2.4.2.1. Fibres optiques à saut d'indice.....	13
I.1.2.4.2.2. Fibres optiques à gradient d'indice	13
I.1.2.5. Comparaison entre les différents types de fibres optique	14
I.1.2.6. Caractéristiques de la fibre optique	15
I.1.2.6.1. L'atténuation.....	15
I.1.2.6.2. La dispersion chromatique	15
I.1.2.6.3. Dispersion de modes de polarisation	15

Table des matières

I.1.2.6.4. Les effets non linéaires dans la fibre optique	16
I.1.3. Les récepteurs optiques.....	17
I.1.3.1. Principe de la photo détection	17
I.1.3.1.1. Les photodiodes PIN	18
I.1.3.1.2. Les photodiodes à avalanche	19
Conclusion.....	20
Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en erbium	
Introduction	21
II.1. Amplification optique	21
II.1.1. Les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (AOS)	21
II.1.2. Amplificateurs à fibres optiques	23
II.1.2.1. Amplificateurs à fibre dopée terres rares.....	23
II.1.2.2. Amplificateurs à effet non-linéaires (Raman ou Brillouin).....	24
II.1.3. Caractéristiques d'un amplificateur optique	25
II.1.3.1.Émission spontanée amplifiée (ASE)	25
II.1.3.2. Différents types de pompage	25
II.2. Fibre optique dopées aux terres rares.....	27
II.3. Spectroscopie de l'ion Erbium.....	28
II.4. L'amplificateur à fibre dopée erbium, l'EDFA	29
II.4.1. Principe de l'amplificateur à fibre dopée erbium, l'EDFA.....	30
II.5. Comparaison des amplificateurs	32
II.6. Comportement spectral des fibres optiques dopées à l'erbium.....	32
II.6.1. Effet stark	32
II.6.2. Élargissement homogène.....	33
II.6.3. Élargissement inhomogène	33
Conclusion.....	34
Chapitre III : Modélisation d'une fibre optique dopée en Erbium	
Introduction	35
III.1. Modélisation de l'amplificateur à fibres dopées erbium	35
III.1.1. Les coefficients de transitions.....	36
III.1.1.1. Les taux de transitions.....	36
III.1.1.1.1. Les équations du taux de transition.....	36
III.1.1.2. Durée de vie des niveaux d'énergie de l'erbium.....	37
III.1.2. Equation d'évolution des densités volumiques de population	38

Table des matières

III.1.2.1. Simplification du modèle à deux niveaux.....	38
III.2. Gain du signal.....	39
III.3. Les expressions de la puissance.....	39
III.4. Rapport signal / bruit.....	40
III.5. Facteur de bruit.....	41
III.6. Simulation de la fibre optique amplificatrice dopée en Erbium.....	41
III.6.1. Les différents paramètres utilisés dans la simulation.....	45
III.6.2. Résultats de simulation et interprétations.....	46
III.6.2.1. Evolution des populations N1 et N2 dans la fibre dopée en Erbium.....	46
III.6.2.2. Evolution du gain.....	46
III.6.2.2.1. Le gain en fonction de la longueur de la fibre.....	46
III.6.2.2.2. Le gain en fonction de la puissance de la pompe.....	47
III.6.2.3. Evolution du facteur de bruit (Noise Figure).....	48
III.6.2.3.1. Facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre dopée.....	48
III.6.2.3.2. Facteur de bruit en fonction de la puissance de la pompe.....	49
III.6.2.4. La puissance spontanée amplifiée (ASE).....	50
Conclusion.....	51
Conclusion générale.....	52
Références bibliographiques.....	54
Résumé	

Liste des abréviations

AOS	Amplificateur optique à semi-conducteur
APD	Avalanche Photodiode
ASE	Amplified Spontaneous Emission
DFB	Distributed Feed Back
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
InGAS	Indium arsenide
Inp	Indium arsenide
LED	Light Emitting Diode
MCVD	Modified Chemical Vapor Deposition
MUX	Multiplexing
PCVD	Plasma Chemical Vapor Deposition
PMD	Polarization Mode dispersion
SNR	Signal to Noise Ratio
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting LASER
WDM	Wavelength-division multiplexing

Liste des variables

h :	Constante de Planck
f :	Fréquence de radiation émise
ON :	Ouverture numérique
n₁ :	Indice de réfraction du cœur
n₂ :	Indice de réfraction du gain
n₀ :	Indice de l'aire
S :	Sensibilité de la photodiode
V :	Fréquence
C :	Vitesse de la lumière
W :	Coefficient de transition
N :	Densité de population
σ :	Section efficace
Γ :	Facteur de confinement
λ :	Longueur d'onde
τ :	Temps de vie
P :	Puissance
r :	Rayon de L'EDFA
A :	Aire de L'EDFA
B₀ :	Largeur de bande optique

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1: Liaison en fibre optique.	3
Figure I.2: Transition radiative	4
Figure I.3: Diagramme de l'émetteur optique	5
Figure I.4: Schéma des différents niveaux.	5
Figure I.5: Schéma des processus d'émission.	6
Figure I.6: Structure de la fibre optique.	9
Figure I.7: Fabrication de préforme par le procédé MCVD.	10
Figure I.8: Schéma d'une tour de fibrage.....	11
Figure I.9: Propagation du signal dans la fibre optique.	12
Figure I.10: Fibre optique monomode.	12
Figure I.11: Fibre optique multimode à saut d'indice.....	13
Figure I.12: Fibre optique multimode à gradient d'indice.	14
Figure I.13: Dispersion de mode de polarisation.....	16
Figure I.14: Coupe transversale d'une photodiode PIN.....	16
Figure I.15: Structure d'une photodiode à avalanche	19
Figure II.1: Structure générale d'un amplificateur optique à semi-conducteur	22
Figure II.2: Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur	22
Figure II.3: Les différentes fenêtres spectrales	24
Figure II.4: différents types de pompage: (1) pompage co-propagatif, (2) pompage contra-propagatif, (3) pompage bidirectionnel.	26
Figure II.5: Niveaux d'énergie mis en jeu pour un pompage: (a) 980nm, (b) 1480nm dans le cas de l'ion Erbium.....	27
Figure II.6: Répartition des ions Al^{3+} et Er^{3+} dans une matrice de silice.....	28
Figure II.7: Tableau périodique des éléments	29
Figure II.8: Schéma synoptique d'un EDFA	30
Figure II.9: Mécanisme d'inversion de population d'un Er^{3+} sous pompage à 980nm.....	31
Figure II.10: processus de désexcitation dans un laser à fibre erbium	31
Figure II.11: Effet Stark sous l'action d'un champ électrique cristallin.....	33
Figure III.1: Diagramme de transition entre les niveaux d'énergie de l'ion erbium.....	35
Figure III.2: Modélisation du gain de la pompe.....	42
Figure III.3: Modélisation du gain du signal.....	43
Figure III.4: Model de simulation de l'EDFA.....	44

Liste des figures

Figure III.5: Evolution des population N1 et N2 en fonction du temps.....	46
Figure III.6: Evolution du gain en fonction de la longueur de la fibre	47
Figure III.7: Evolution du gain en fonction de la puissance de la pompe.....	48
Figure III.8: Evolution du facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre.....	49
Figure III.9: Evolution du facteur de bruit en fonction de la puissance.....	49
Figure III.10: La variation de la puissance ASE en fonction de la puissance de la pompe	50

Liste des tableaux

Liste des Tableaux

Tableau I.1: Comparaison entre les émetteurs optiques	8
Tableau I.2: Comparaison entre les différents types de fibre optiques.....	14
Tableau II.1: Les caractéristiques associées aux différentes techniques d'amplification.....	32
Tableau III.1: Les différents paramètres utilisés dans la simulation de l'EDFA.....	45

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Depuis quelques années la fibre optique est devenue un des supports de transmission les plus utilisés pour transporter tout types de données (audio, vidéo et internet). En effet, l'atténuation intrinsèque dans la bande 0.3 à 1.3 μm est bien plus faible pour la fibre optique. De plus, la fenêtre de transmission d'une fibre est très large ; plusieurs dizaines de THz répartis autour de 1.3 et 1.55 μm [1], correspondant à un minimum d'atténuation pour une fibre de silice et tout cela fait de la fibre optique un moyen idéal pour les besoins multimédia. Cette tendance s'accroît chaque année afin de mettre en place des liaisons intra et inter-systèmes à haut débit.

Mais aujourd'hui l'essor de l'Internet est tel que l'évolution des systèmes de télécommunications tend toujours vers une augmentation des capacités de transmission. La difficulté ne réside plus vraiment sur le support mais sur les modules d'émission et de réception, regroupant l'électronique et les fonctions optoélectroniques.

La progression en matière de rapidité des systèmes optiques est due à deux avancées majeures : le multiplexage en longueur d'onde (WDM) et les amplificateurs optiques à fibre dopée Erbium EDFA.

La technique de multiplexage WDM repose sur la propriété des fibres à pouvoir supporter plusieurs longueurs d'onde, porteuse chacune de signaux indépendants.

Les EDFAs ont, quant à eux, permis de surmonter les limitations des régénérateurs électro-optiques en terme de débit, en raison de la complexité de l'électronique à mettre en œuvre, le cout de ces derniers devenait prohibitif pour des débits supérieurs à 5 Gb/S [2]. Une diode de pompage à 980 nm est néanmoins indispensable pour créer le phénomène d'inversion de population des ions Erbium. De plus le signal de pompage et le signal utile sont combinés dans la fibre par un multiplexeur en longueur d'onde.

Dans cette optique s'intègre notre mémoire de Master, basé sur le développement d'un outil de simulation capable de prédire adéquatement les performances expérimentales d'un amplificateur à fibre dopée Erbium, et d'améliorer les performances de cette dernière en particulier la concentration de l'Erbium ainsi que la puissance de la pompe, utilisées pour obtenir un meilleur gain.

Le premier chapitre de ce mémoire consiste en une étude théorique et bibliographique des notions fondamentales nécessaires à la compréhension d'un système de communication par fibre optique, constitué d'un module d'émission composé d'une diode électroluminescente

Introduction générale

(LED) ou d'une diode LASER et d'un module de réception composé d'une photodiode PIN ou d'une photodiode à avalanche.

A travers, le second chapitre, les amplificateurs optiques des fibres dopées en terres rares et leurs caractéristiques physiques seront abordés, ainsi donc l'EDFA sera détaillé et mieux expliqué.

Le troisième chapitre, quant à lui, sera structuré de la manière suivante : dans un premier temps nous allons développer une modélisation basée sur les équations de population pour représenter le comportement des dopants et les équations différentielles décrivant l'évolution des puissances le long de la fibre optique. Dans le second lieu nous allons proposer un modèle Simulink qui nous conduira à des résultats analytiques et à l'estimation du gain (G) en fonction de la puissance de la pompe pour de différentes longueurs (L) de notre guide d'onde (EDFA).

La conclusion abordera tous les résultats importants issus des mesures effectuées servant à la modélisation de l'EDFA.

I

Liaisons en fibre optique

Introduction

Les technologies de télécommunication par fibres optiques sont en constante amélioration permettant ainsi de transmettre des informations sur de très longues distances et à très hauts débits, surtout avec le développement du LASER dont l'intérêt majeur réside dans le transport de l'information (image, vidéo, son...) sous forme d'un signal lumineux.

Les systèmes de communication par fibre optique sont constitués d'un module d'émission dont la fonction est de transformer l'information sous forme de signal électrique en signal optique, ensuite cette dernière est acheminée dans un canal de transmission qui est la fibre optique. Enfin un module de réception reçoit l'information et la convertit en un signal électrique.



Figure I.1: Liaison en fibre optique.

I.1. Chaîne de transmission

I.1.1. Emetteur optique

L'émetteur optique génère un signal électrique composé d'une séquence pseudo aléatoire et le convertit en un signal optique. Cette conversion utilise principalement deux techniques de modulation : la modulation direct et la modulation externe.

La partie émission d'une liaison optique est composée d'une diode électroluminescente (LED), ou une diode LASER. Nous allons aborder les types d'émetteurs, leurs principes de fonctionnement et leurs caractéristiques.

I.1.1.1. Les diodes électroluminescentes LED (Light Emitting Diode)

Une diode électroluminescente est constituée par un cristal semi-conducteur comportant une jonction PN polarisée en directe et des électrons, qui sont majoritaires dans la région de type N, qui sont injectés dans la région de type P où ils se recombinent avec les trous.

Le passage d'un électron d'un niveau supérieur E_2 à un niveau inférieur E_1 libère de l'énergie comme l'illustre la figure I.2. Cette énergie sera émise sous forme d'un photon (émission spontanée), dont l'énergie hf est égale :

$$h f = E_2 - E_1 \quad (\text{I.1})$$

Tel que : h est la constante de Planck et f est la fréquence de radiation émise.

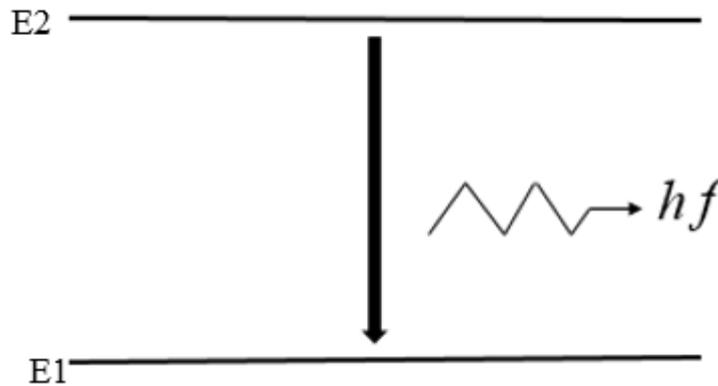


Figure I. 2: Transition radiative.

Les recombinaisons des porteurs excédentaires se présentent dans trois régions différentes qui sont : la zone de charge d'espace qui ne joue pas un rôle important parce qu'elle est étroite, et les régions neutres N et P.

Le taux d'injection d'électrons dans la région P est plus important que le taux d'injection de trous dans la région P en raison de la mobilité des électrons, qui est très importante par rapport à celle des trous.

Les régions N et P de la diode sont très dopées, cependant des dopages importants se traduisent par une diminution du gap, et elle est plus importante dans la région P que dans la région N, et le spectre est conditionné par le gap de matériau de type P et le type du dopant [3].

I.1.1.2. La diode LASER

La diode LASER est un composant optoélectronique à base de matériaux semi-conducteurs, son principe de fonctionnement se base sur l'amplification de la lumière par une émission stimulée. En outre son rôle consiste à générer un signal optique continu, qui peut être modulé, par deux techniques comme l'illustre la figure I.3.

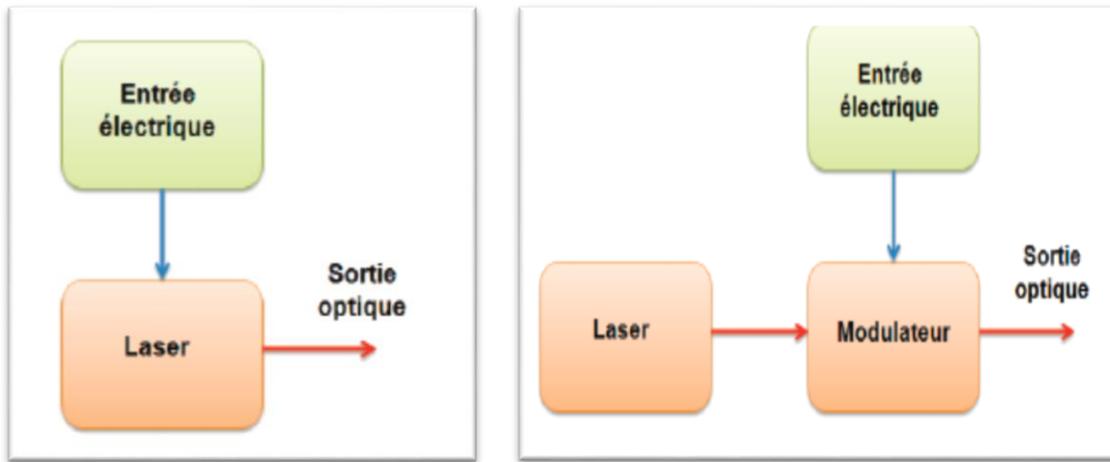
I.1.1.2.1. Les différents types de modulation

a. La modulation externe

La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continue est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du LASER. Cette modulation est effectuée sur une onde constante ainsi que par une composante indispensable qui est le modulateur externe [4].

b. La modulation directe

Dans ce type de modulation les diodes LASERS sont directement modulées, en modulant le courant électrique appliqué sur le dispositif [5]. Cela fournit une méthode simple et efficace pour transmettre les données dans le domaine optique à un débit de quelque Gbit/s [4].



a : modulation interne

b : modulation externe

Figure I. 3: Diagramme de l'émetteur optique.

Le passage d'un électron d'un niveau à un autre, comme le montre la figure I.4, se traduit par les trois manières suivantes :

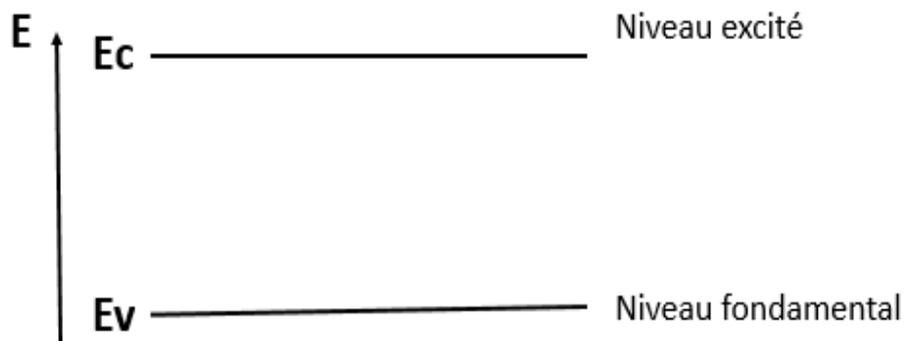


Figure I.4 : Schéma des différents niveaux.

Chapitre I : Liaisons en fibre optique

a) L'émission spontanée

Ce phénomène est décrit lorsqu'un électron passe d'un niveau excité vers un niveau inférieur en émettant un photon d'une manière spontanée, comme le montre la figure I.5.a.

La probabilité d'émission spontanée par unité de temps se décrit sous la forme du coefficient d'Einstein A_{21} qui s'exprime en $(\text{Sec})^{-1}$ et qui est inversement proportionnel à la durée de vie radiative du niveau d'énergie E_2 [6].

$$A_{21} = \frac{1}{\tau} \quad (1.2)$$

Tel que : τ est la durée de vie radiative.

b) L'absorption

L'absorption est décrite par le fait que lorsqu'on fournit assez d'énergie par pompage à l'atome, les électrons passent d'un niveau inférieur (moins énergétique) vers un niveau supérieur (plus énergétique), en absorbant un photon, comme l'illustre la figure I.5.b.

L'échange d'énergie a lieu seulement lorsque l'énergie apportée par le photon est égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux.

c) L'émission stimulée

Dans l'émission stimulée, l'électron qui se trouve dans le niveau supérieur retombe vers le niveau inférieur en émettant un photon stimulé de même longueur d'onde, de même état de polarisation et de même phase que le photon incident.

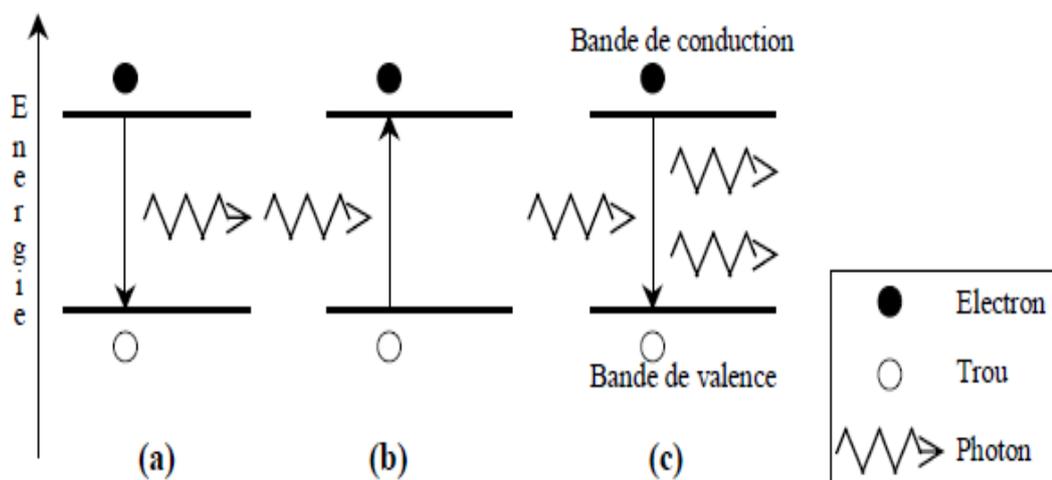


Figure I.5 : Schéma des processus d'émission *spontanée* (a), d'absorption (b) d'émission stimulée (c)

Chapitre I : Liaisons en fibre optique

Pour obtenir l'effet laser et rendre l'émission stimulée prépondérante, deux conditions doivent être réalisées :

- Il faut qu'il y ait une inversion de population réalisée par l'opération de pompage, consistant à fournir de l'énergie aux électrons afin qu'ils passent dans la bande de conduction.
- Il faut qu'il y ait suffisamment de photons excitateurs. Pour cela, on oblige l'énergie lumineuse à s'accumuler sur place en enfermant le semi-conducteur dans une cavité résonante [4].

I.1.1.2.2 Les différents types de LASER

Il existe plusieurs types de LASER, et dans ce qui suit nous allons énumérer les plus importants :

I.1.1.2.2.1. Laser Fabry-Pérot

Le laser Fabry-Pérot est constitué de deux miroirs plans, parallèles et réfléchissants entre lesquels les ondes lumineuses font plusieurs allers retours.

La réalisation pratique d'un résonateur de Fabry-Pérot est relativement simple dans le cas des diodes à semi-conducteurs. En effet, l'indice de réfraction des semi-conducteurs est très élevé par rapport à l'indice de réfraction de l'air [4].

I.1.1.2.2.2. Laser VCSEL (cavité verticale)

Le VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting LASER) ou LASER à émission de surface verticale, généralement utilisée comme un émetteur accordable en modulation directe. L'avantage du LASER VCSEL réside dans la simplicité de la réalisation et du couplage, par contre le débit est limité à 1Gbits/s [7].

I.1.1.2.2.3. DFB (Distributed Feed Back)

La zone active du LASER DFB est structurée périodiquement pour former des réseaux de diffraction qui jouent le rôle de miroirs sélectifs pour la cavité laser. Ces réseaux sont conçus de façon à ne sélectionner qu'un seul mode longitudinal du laser (et donc une seule longueur d'onde), permettant ainsi une émission laser de très bonne qualité spectrale à une longueur d'onde donnée, de plus les lasers DFB émettent dans la longueur d'onde de 1300 nm à 1550nm [7].

Chapitre I : Liaisons en fibre optique

I.1.1.3. Comparaison entre les émetteurs optiques

A travers le tableau I.1 nous allons comparer très brièvement les performances des différents types d'émetteurs.

Composant	Diode LED	Diode LASER		
		VCSEL (cavité verticale)	Fabry-Pérot	DFB(Distributed Feed Back)
Puissance optique	1 mW	Quelque mW		
Spectre et largeur Spectrale	Large, continu 20 à 50nm	Une raie fine < 0,1 nm	Plusieurs raies 5 à 10 nm	Une raie fine < 0,1 nm
Fréquence maximale de modulation	100 à 100 MHz	10 GHz	Plusieurs GHz	
Bruit	Très faible	Très faible	Faible	Faible
Principales longueurs d'onde	0,67 μm 0,8 à 0,9 μm 1,3 μm	0,78 à 0.9 μm	1,3 μm	1,3 μm 1,5 à 1.6 μm
Coût	Faible	Assez faible	Moyen	Elevé
Applications	Transmission à courte distance (fibre multimode)	Capteur, lecteur optique, transmission à haut débit à courte distance (fibre monomode et multimode)	Transmission haut débit à une distance moyenne (fibre monomode)	Transmission très haut débit à longue distance et multiplexage En longueur d'onde (fibre monomode)

Tableau I.1. Comparaison entre les émetteurs optiques.

I.1.2. Canal de transmission (fibre optique)

I.1.2.1. Définition

La fibre optique se présente sous forme cylindrique, elle est constituée d'une couche concentrique (cœur) d'indice de réfraction n_1 , entourée d'une autre couche (gaine) d'indice de réfraction n_2 comme le montre la figure I.6. Tel que n_2 est légèrement supérieur à n_1 . À l'origine cette différence est due au guidage de la lumière dans les fibres optiques à travers le phénomène de réflexion totale à l'interface cœur/gaine, à condition que cette différence soit de l'ordre de 0.3%.

La plupart des fibres sont en verre, c'est-à-dire de silice, et l'indice de réfraction du noyau augmente en dopant la silice avec l'oxyde de Géranium GeO_2 .

Pour les systèmes de transmission à courte distance (<1 km) et à faible débit (~ Mb / s), des fibres en plastiques peuvent être utilisées [8].

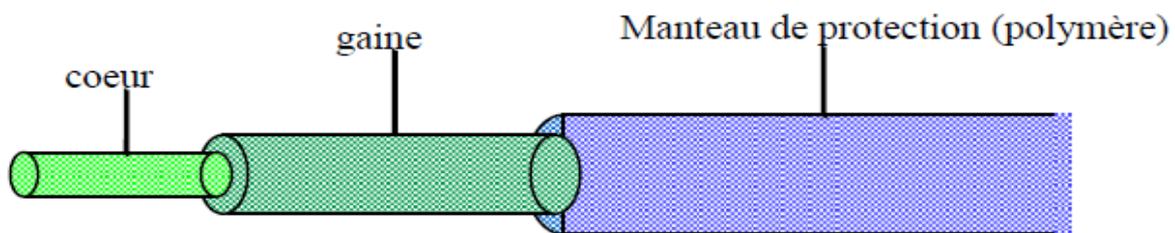


Figure I.6: Structure de la fibre optique.

I.1.2.2. Fabrication d'une fibre optique

La fabrication d'une fibre optique repose sur l'étirage d'une préforme de verre qui est ensuite transformée en fibre optique par un procédé de fibrage. Il existe plusieurs processus pour la conception d'une préforme, des processus internes tel que la méthode PCVD (Pour Plasma Chemical Vapor Deposition). Ce pendant nous allons seulement nous intéresser au procédé interne MCVD car c'est la technique la plus utilisée [9].

a. Méthode de MCVD (Dépôt Chimique en Phase Vapeur)

La réalisation d'une préforme s'effectue à partir d'un tube de silice de haute pureté qui est monté sur un trou verrier puis mis en rotation. Ce tube forme donc la gaine optique de la fibre.

Chapitre I : Liaisons en fibre optique

A l'une des extrémités du tube représenté en figure I.7.a, on injecte un mélange gazeux et on chauffe à haute température. L'opération donne lieu à la formation et au dépôt de suie de silice par couches successives de 5 à 10 μm d'épaisseur. Au passage du chalumeau sur les suies, le dépôt est vitrifié [10].

Une fois le dépôt terminé, on stoppe l'injection de gaz comme illustré en figure I.7.b. Cependant, un trou central subsiste à l'intérieur de la préforme. On augmente donc la température de chauffage jusqu'à atteindre la température de 1800° , ce qui provoque un ramollissement de la silice suffisant pour permettre un rétreint homogène, grâce aux forces dues aux tensions superficielles [10].

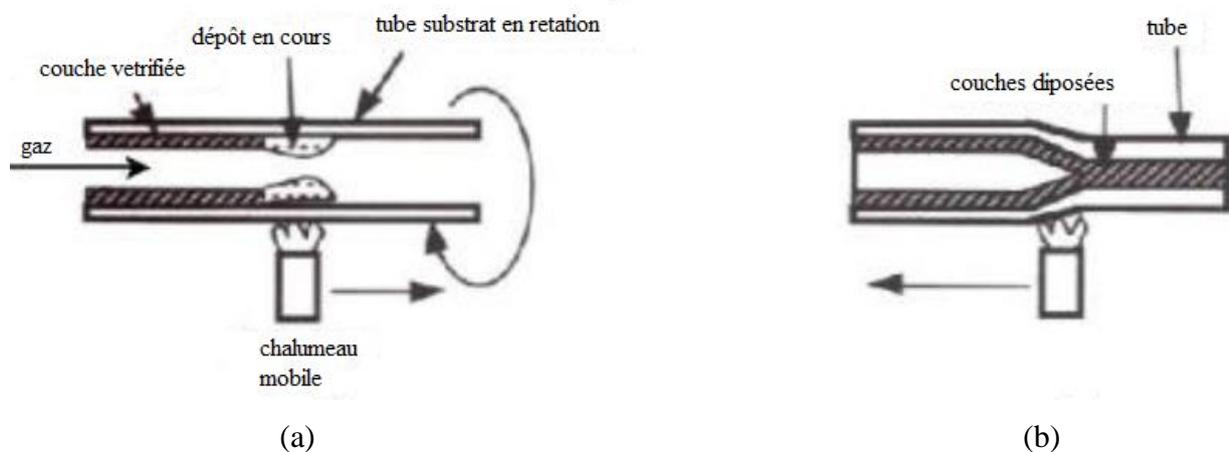


Figure I.7: Fabrication de préforme par le procédé MCVD [10].

Pour la réalisation d'une fibre standard, on dépose des couches de silice pure qui constitueront la gaine optique « déposée » et des couches de silice dopée au germanium qui formeront le cœur. Le rapport entre les rayons de ces couches de la préforme ainsi que leur indice de réfraction sont les mêmes que ceux de la future fibre [10].

b. Fibrage

La préforme subit ensuite un étirage ou fibrage, dans une tour de fibrage, comme présenté sur la figure I.8.

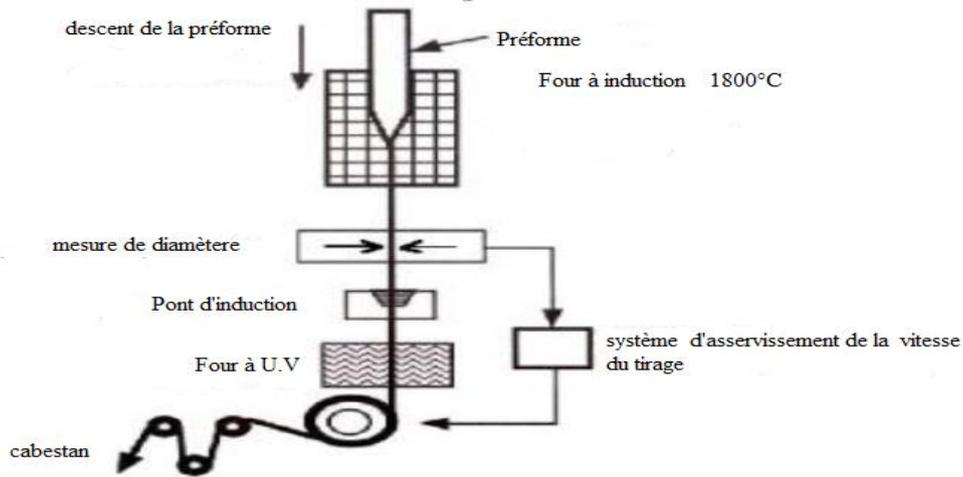


Figure I.8: Schéma d'une tour de fibrage [10].

L'extrémité basse de la préforme est placée dans un four de tirage porté à une température voisine de 2 000 °C. Elle est alors transformée en une fibre de plusieurs centaines de kilomètres, à une vitesse de l'ordre du kilomètre par minute. Ce tirage est contrôlé via divers modules.

La fibre est ensuite revêtue d'une double couche de résine protectrice (cette couche peut être déposée par la tour de fibrage, juste après l'étirement) avant d'être enroulée sur une bobine. Cette couche est particulièrement importante pour éviter toute humidité, car la fibre devient cassante sous l'effet de l'eau : l'hydrogène interagit avec la silice, et toute faiblesse ou micro-entaille est amplifiée [11].

I.1.2.3 Guidage du signal optique

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{I.3})$$

La lumière se propage le long de la fibre par des réflexions successives entre le cœur et la gaine voire la figure I.9.

Pour que le guidage soit possible il faut que le cœur et la gaine soient constitués de matériaux transparents. En outre, il faut envoyer un signal lumineux avec un angle inférieur à l'ouverture numérique [4].

Cette dernière est caractérisée par un angle maximal θ_0 que fait le faisceau, pour assurer la propagation dans la fibre optique et sa formule est la suivante :

$$ON = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad (\text{I.4})$$

Tel que : $n_0 = 1$ (indice de réfraction de l'air).

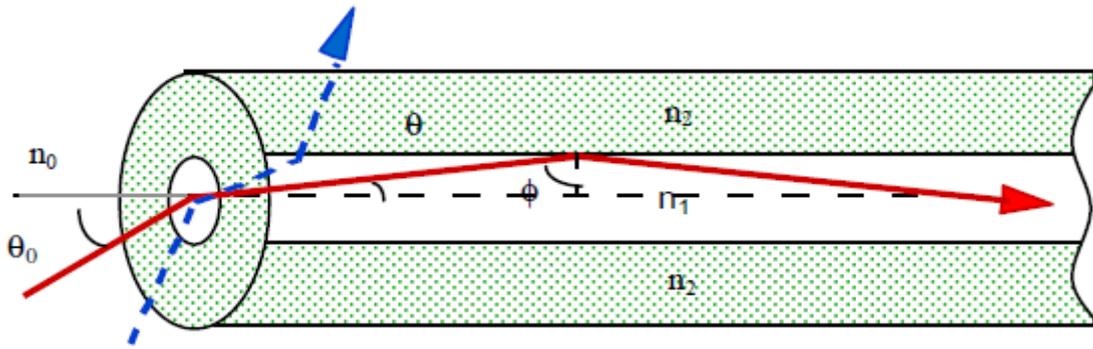


Figure I.9: Propagation du signal dans la fibre optique [4].

I.1.2.4. Types de fibres optiques

Il existe deux types de fibres optiques monomode et multimode que nous définirons comme suit :

I.1.2.4.1. Fibre optique monomode

La fibre optique monomode est caractérisée par un diamètre de cœur ($10\mu\text{m}$) inférieur à celui de la gaine ($125\mu\text{m}$). L'onde se propage sans réflexion et sans dispersion modale. Le diamètre de cœur nécessite une grande puissance qui est délivrée par la diode LASER. Comme l'indique la figure I.10 [3].

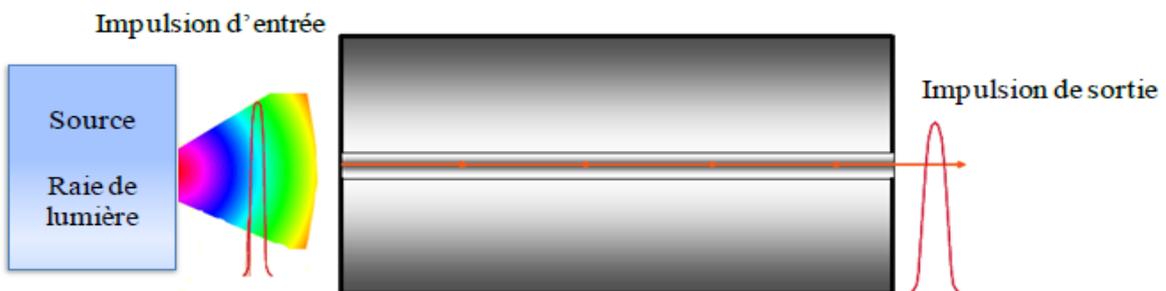


Figure I.10: Fibre optique monomode.

I.1.2.4.2. Fibre optique multimode

Les fibres multimodes sont caractérisées par un diamètre de cœur important (de 50 à $85\mu\text{m}$), et un rayon lumineux pénétrant dans le cœur de la fibre, à l'une de ses extrémités, se propage longitudinalement jusqu'à l'autre extrémité grâce aux réflexions totales qu'il subit à l'interface cœur/gaine [3].

Chapitre I : Liaisons en fibre optique

Plusieurs modes se propagent dans ce type de fibre optique, selon les différentes trajectoires empruntées par les rayons qui arrivent avec des temps différents. Ce qui provoque une forte dispersion du signal lumineux, due à la multiplication des modes de propagations (dispersion modale). Parmi les fibres multimodes, on distingue les fibres à saut d'indice et les fibres à gradient d'indice.

I.1.2.4.2.1. Fibres optiques à saut d'indice

Les fibres à saut d'indice sont constituées d'un cœur cylindrique transparent d'indice constant n_1 , entouré par une gaine concentrique d'indice n_2 . Son principe de fonctionnement est basé sur la réflexion totale interne, l'atténuation est très importante comme on peut le voir sur la différence des impulsions d'entrée et de sortie, et le débit limité à 50 Mb/s.

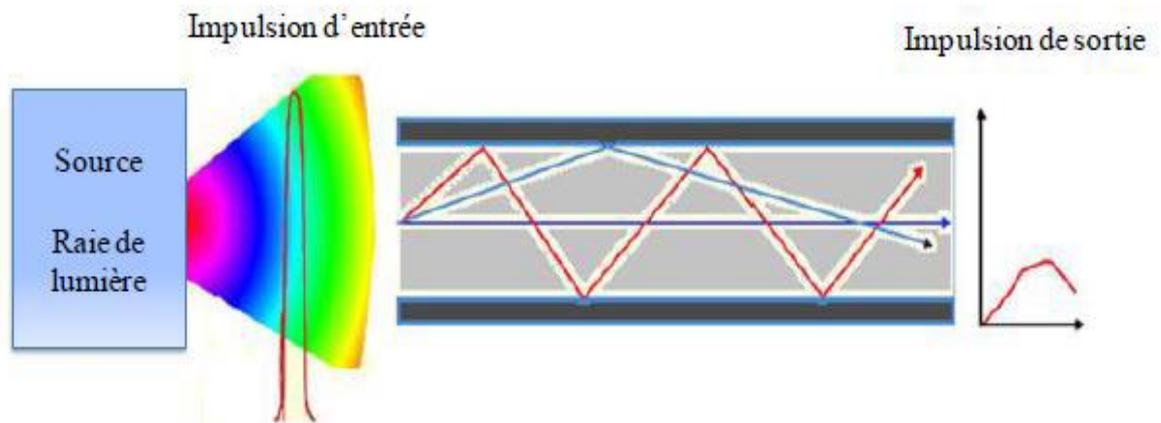


Figure I.11: Fibre optique multimode à saut d'indice.

I.1.2.4.2.2. Fibres optiques à gradient d'indice

Dans ce cas l'indice de réfraction varie peu à peu du centre à la gaine et en formant une trajectoire sinusoïdale car le rayon dévie au fur et à mesure qu'il s'éloigne du centre. La variation du chemin optique dans ce cas est plus faible car le cœur possède un diamètre plus petit, donc l'étalement du signal est moins important grâce à la variation de l'indice. (Débit limité à 1 Gb/s).

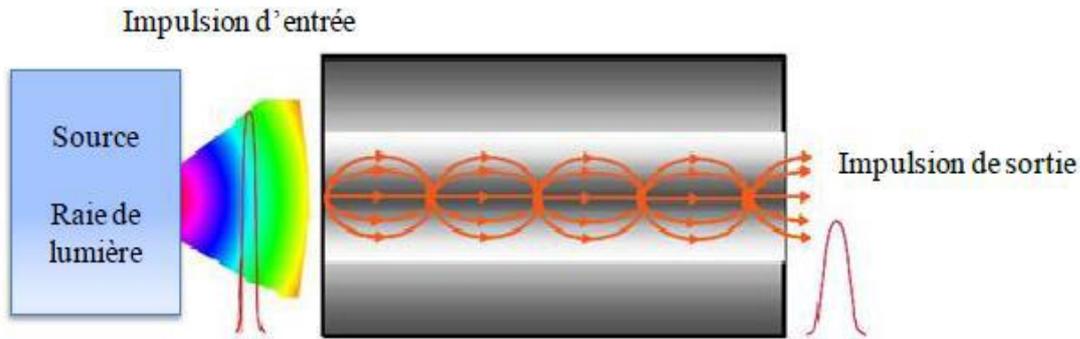


Figure I.12: Fibre optique multimode à gradient d'indice.

I.1.2.5. Comparaison entre les différents types de fibres optiques

A travers le tableau I.2, nous allons comparer très brièvement les avantages, les inconvénients et les domaines d'applications des différents types de fibres optiques.

Types de fibres Optiques		Domaines d'applications	Avantages	Inconvénients
Multimode	à saut d'indice	Communications courtes distances et les réseaux locaux.	Grande ouverture numérique, connexion facile et faible prix.	Pertes, distorsion et dispersion du signal.
	à gradient d'indice	Communications courtes et moyennes distances.	Bande passante raisonnable et bonne qualité de transmission.	Difficile à mettre en œuvre.
Monomode		Communications longues distances.	Bande passante très grande, atténuation très faible et une faible dispersion	Coût très élevé

Tableau I.2 : Comparaison entre les différents types de fibre optiques.

I.1.2.6. Caractéristiques de la fibre optique

Les principales caractéristiques des fibres optiques sont l'atténuation, la dispersion chromatique, la dispersion de modes de polarisation et les effets non-linéaires.

I.1.2.6.1. L'atténuation

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption. De plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh) et les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres, en effet, la courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement. Et les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux, et chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement [12].

Au cours de la propagation dans la fibre, la puissance en dB décroît selon la loi :

$$p_{out} = p_{in} e^{-\alpha l/10} \quad (I.5)$$

P_{in} est la puissance qui a été couplée à l'entrée de la fibre, α est le coefficient d'atténuation en Neper/m, cette atténuation α dépend du matériau et de la longueur d'onde [12].

I.1.2.6.2. La dispersion chromatique

La dispersion chromatique est la somme d'un terme de matériau pur (dispersion matériau) et d'un terme dû au guidage de l'onde (dispersion modale). Cette dernière résulte de la dépendance de l'indice de réfraction « n » à la longueur d'onde qui se traduit par le fait que des signaux de longueurs d'onde différentes se propagent à des vitesses différentes [13].

I.1.2.6.3. Dispersion de modes de polarisation

La dispersion de modes de polarisation (PMD) est une dispersion modale pour laquelle deux modes de polarisation orthogonaux de la lumière à la même longueur d'onde se propagent à des vitesses différentes en raison de la biréfringence de la fibre, provoquant également un élargissement des impulsions optiques. Tel qu'il est illustré sur la figure I.13. [13].

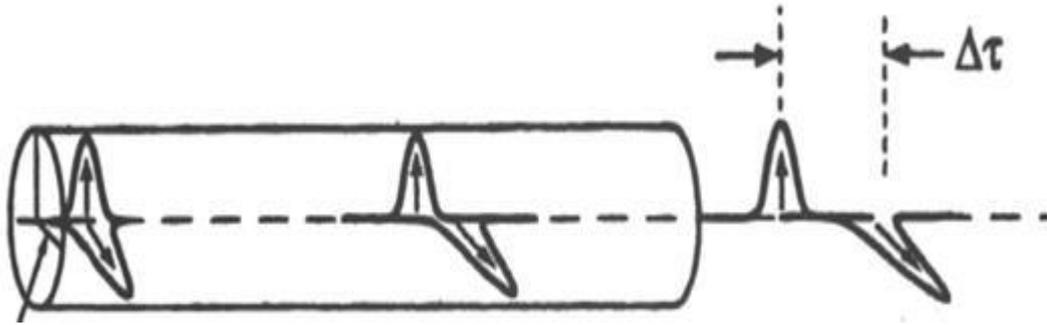


Figure I.13: Dispersion de mode de polarisation [13].

La dissymétrie de la fibre n'est pas constante, elle varie dans le temps sur le long de la fibre de façon aléatoire. Elle se comporte alors comme une succession de lames biréfringentes dont les axes de biréfringence sont orientés aléatoirement [13].

I.1.2.6.4. Les effets non linéaires dans la fibre optique

Les effets non linéaires représentent un des mécanismes fondamentaux qui limitent la quantité de données qui peuvent être transmises sur une fibre optique, et dégradent les performances de la fibre quand les puissances véhiculées deviennent importantes [14].

Les effets non linéaires résultent des deux mécanismes suivants :

a) L'effet Kerr

L'effet Kerr est une extension des lois de la réfraction de la lumière lors de la propagation de cette dernière dans des milieux d'indice variable. L'indice de réfraction peut alors s'exprimer sous la forme d'une équation non linéaire, proportionnellement à la puissance optique [9] :

$$E^2 = n_0 + n_2 \quad (\text{I.6})$$

Avec n_0 une constante et n_2 indice de réfraction non linéaire.

La non linéarité Kerr d'une fibre dépend à la fois de l'indice non linéaire et du confinement de la puissance optique, c'est-à-dire de l'aire effective. Ces deux paramètres sont généralement rassemblés en un seul, le coefficient non linéaire γ de la fibre, exprimé en $\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ par l'équation I.7. Pour une fibre à dispersion décalée standard, le coefficient non linéaire vaut $2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ et pour une fibre dite hautement non linéaire, il peut dépasser $20 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$.

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (\text{I.7})$$

La conséquence de l'effet Kerr se traduit par un phénomène d'auto modulation de phase et par une modulation de fréquence parasite, avec augmentation de la fréquence instantanée à l'avant de l'impulsion ; tandis que les autres en séquences sont visibles si plusieurs ondes se propagent

dans la fibre. Alors, la non-linéarité induit une modulation de phase croisée, ainsi que des phénomènes connus sous le nom de mélange à trois ou quatre ondes [9].

b) Les effets Raman et Brillouin

L'effet Raman est le plus connu des effets non-linéaires. Il s'agit d'un échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau.

L'effet Brillouin est de même nature que la diffusion de Raman, mais l'interaction se fait avec les vibrations d'ensemble du matériau, se propageant à la vitesse des ondes acoustiques.

Ces effets sont sensibles dès que la puissance injectée dépasse un certain seuil. Pour les éliminer nous modulons en amplitude à très basse fréquence le courant d'injection du LASER par un signal sinusoïdal, ce qui provoque une modulation de fréquence du signal optique émis et élargit le spectre jusqu'à quelques GHz [14].

I.1.3. Les récepteurs optiques

De nombreux efforts ont été fournis pour rendre les modules de réception de plus en plus performants, et le rôle d'un récepteur optique est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique.

I.1.3.1. Principe de la photo détection

Les photons transmis par la fibre détectent dans le détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou. Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher l'électron de retomber dans son état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photo courant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés [4].

Pour effectuer la photodétection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large. D'où l'intérêt de la photodiode PIN [15].

I.1.3.1. a. Les photodiodes PIN

La qualité principale d'une photodiode PIN est que la composante d'entraînement du photocourant domine sur la composante diffusive simplement parce que la plupart de la puissance optique incidente est absorbée à l'intérieur de la zone I.

En effet, la zone I est placée entre la zone P et la zone N d'un semi-conducteur différent dont la bande interdite est choisie afin que les photons incidents soient absorbés seulement dans la zone I de la photodiode comme le présente la figure I.14.

Une photodiode PIN utilise généralement du matériau InGaAs pour la région I et du matériau InP pour les couches P et N [16].

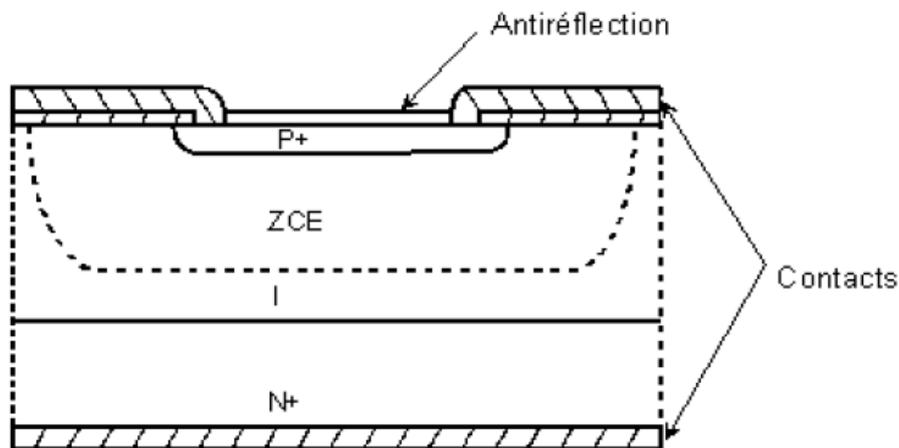


Figure I.14: Coupe transversale d'une photodiode PIN [16].

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

Le photocourant I_{ph} est directement proportionnel à la puissance optique incidente P_{opt} selon la relation suivante :

$$I_{ph} = s \cdot p_{opt} + p_{obs} \quad (I.8)$$

Où S est la sensibilité de la photodiode en A/W , et elle est typiquement proche de 0,9 A/W , mais peut-être un peu plus faible suivant le photodétecteur et la longueur d'onde d'attaque λ . En effet, la sensibilité s'exprime en fonction du rendement quantique η :

$$s = \frac{nq}{hv} + \frac{nq}{hv} \lambda \quad (I.9)$$

I_{obs} est le courant d'obscurité qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairement. Ce courant ne provient donc pas des photons transmis par la fibre. Il peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite... Dans la

plupart des applications ce courant est négligeable ($I_{obs} < 10$ nA). Concernant le temps de réponse, les meilleurs photosdétecteurs actuels sont utilisables jusqu'à plus de 100 GHz [16].

I.1.3.1. b. Les photodiodes à avalanche

Pour que le rapport signal/bruit soit suffisamment important, l'utilisation du phénomène de multiplication interne pour qu'un photon incident engendre plusieurs photo-électron a été soulevée, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique correspondant à une puissance optique incidente donnée. 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. Ce photodétecteur à gain interne est appelé photodiode à avalanche ou PDA (en anglais APD). Le gain de multiplication par ionisation par impact, appelé aussi facteur de multiplication M , est le rapport entre le nombre moyen de porteurs secondaires créés par ionisation et le nombre de porteurs primaires provenant de la photodétection. La valeur du courant relatif au nombre de photons absorbés devient :

$$I_{PDA} = M(V) * S(\lambda) * P_{opt} \quad (I.10)$$

Le gain augmente avec la différence de potentiel appliquée, mais il est limité à une valeur maximale. Si le champ devient trop fort, il y a risque de claquage. Cette valeur limite de tension dépend du matériau et de la structure utilisés. Tout comme pour les photodiodes PIN, il existe plusieurs structures possibles. Voici à titre d'exemple le cas d'une structure dans le Silicium. Elle résulte d'un compromis entre une zone d'absorption large, et une jonction très abrupte pour obtenir un très fort champ électrique [4]. C'est le principe de la structure $p\pi pn$, représenté en figure I.15.

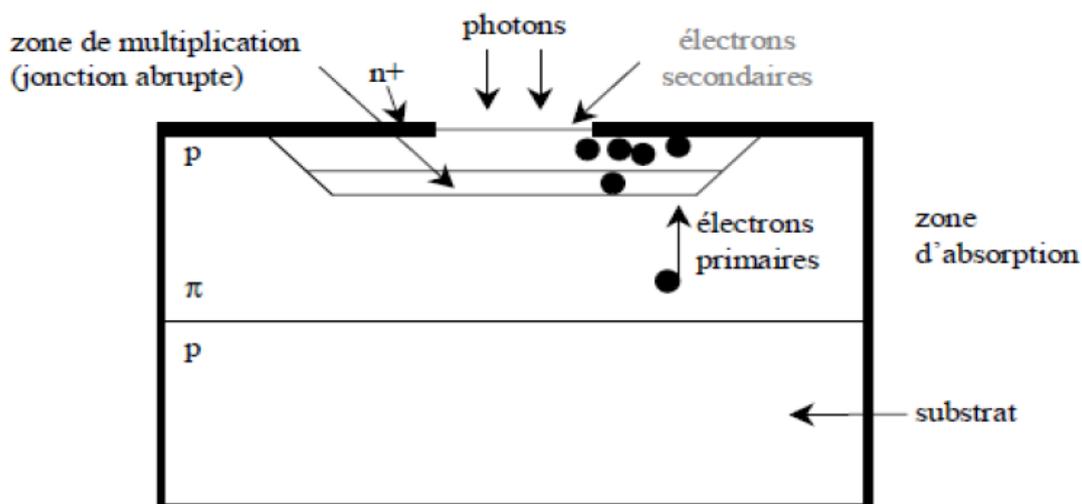


Figure I.15: Structure d'une photodiode à avalanche $p\pi pn$ [4].

Chapitre I : Liaisons en fibre optique

L'absorption a lieu dans une zone large et peu dopée, dite π et la multiplication a lieu dans la jonction abrupte $pn+$. En outre, pour une tension inverse élevée, la zone de charge d'espace s'étend dans la zone π , dont la résistivité va augmenter avec la tension. Ce principe introduit un effet stabilisateur : le champ électrique et le gain augmentent lentement, ce dernier peut atteindre de fortes valeurs tout en le commandant avec précision. Il est plus facile d'éviter le claquage. Le courant d'obscurité observé, I_{obs} , est plus important dans une photodiode en régime d'avalanche, mais il reste en général inférieur au gain, M , multiplié par le courant d'obscurité non multiplié. En effet, toutes les composantes de celui-ci ne subissent pas phénomène d'avalanche [4].

Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de dresser les principes théoriques de fonctionnement d'une liaison en fibre optique. La première partie du chapitre a ainsi rappelé les constituants d'une liaison en fibre optique qui sont : l'émetteur optique, le canal de transmission et le récepteur optique. Nous avons commencé par la description détaillée des différents composants de la partie émission notamment les diodes LASER et diodes électroluminescentes DEL.

La seconde partie a étudié la fibre optique avec ses différents types (monomodes et multimodes), caractéristiques et composants.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons vu le récepteur optique avec le principe de photodétection et une description de deux photodétecteurs : photo diode PIN et avalanche.

Dans le second chapitre, nous allons faire une présentation détaillée du principe des fibres optiques dopées en Erbium.

II

*Présentation du principe des
fibres optiques dopées en
Erbium*

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

Introduction

Dans le début des années 60, les solides dopés aux Terres-Rares ont permis de réaliser les premiers lasers optiquement excités dans le visible, c'est seulement dans les années 85-90 que les premières fibres optiques dopées en terres-rares ont pu être fabriquées de façon fiable [6]. L'intérêt évident que constituent ces nouvelles fibres actives pour les télécommunications optiques a provoqué un très fort engouement de la part des industriels et des équipes de chercheurs. En particulier, l'amplificateur à fibre optique dopée erbium (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier) constitue une technologie majeure pour les télécommunications optiques, il a permis donc de remplacer les amplificateurs électriques à débit limité, constituant un goulot d'étranglement dans les liaisons à haut débit sur de grandes distances.

Nous allons nous intéresser au principe de fonctionnement de l'EDFA qui fonctionne dans la fenêtre des transmissions à 1550 nm qui correspond au minimum d'atténuation.

L'objectif de ce chapitre est de présenter le principe des amplificateurs optiques ainsi que leurs différents types.

II.1. Amplification optique

Lors d'une transmission, le signal est amplifié dans un guide grâce au pompage qui crée une inversion de population et le photon incident provoque la recombinaison électron trou, cette dernière donne naissance à un second photon ayant les mêmes caractéristiques que le photon incident (fréquence, phase et direction). Cette émission est donc appelée émission stimulée (déjà vue dans le premier chapitre).

Il existe plusieurs types d'amplificateurs optiques qui sont réparties, en fonction du milieu qui les compose, en deux catégories : les amplificateurs à semi-conducteurs et les amplificateurs à fibres optiques (amplificateurs à fibre dopée et amplificateurs à effet non-linéaires)

II.1.1. Les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (AOS)

L'amplificateur optique à semi-conducteur est un composant optoélectronique actif, sa structure élémentaire consiste en une diode de type PIN permettant l'amplification de la lumière incidente par une émission stimulée à une longueur d'onde à 1,55 μ m. Afin d'assurer le meilleur rendement possible de cette diode, il est nécessaire de confiner le maximum de porteurs et de photons dans la zone intrinsèque du composant [2].

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

Par sa structure, présentée en figure II.1, et sa fonction, l'AOS est constitué d'une cavité laser (guide d'onde) terminée par deux miroirs. De par sa structure nous remarquons que l'AOS et la diode LASER ont, en première approximation, une architecture relativement proche [2].

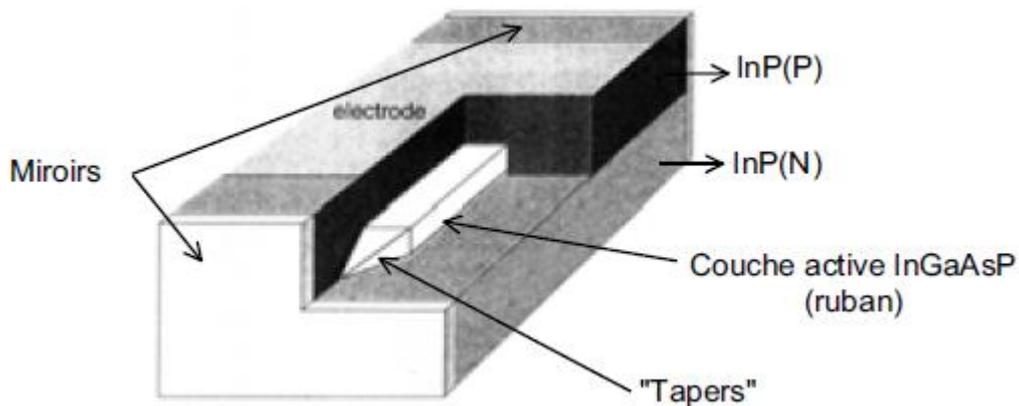


Figure II.1 : Structure générale d'un amplificateur optique à semi-conducteur [2].

Dans la diode LASER, nous retrouvons l'inversion de population, l'émission spontanée et stimulée, les recombinaisons non radiatives, une source externe ... Mais contrairement aux lasers à semi-conducteur, nous ne trouvons pas de miroirs aux extrémités mais un revêtement antireflet déposé sur les faces clivées comme le montre la figure II.2, afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit.

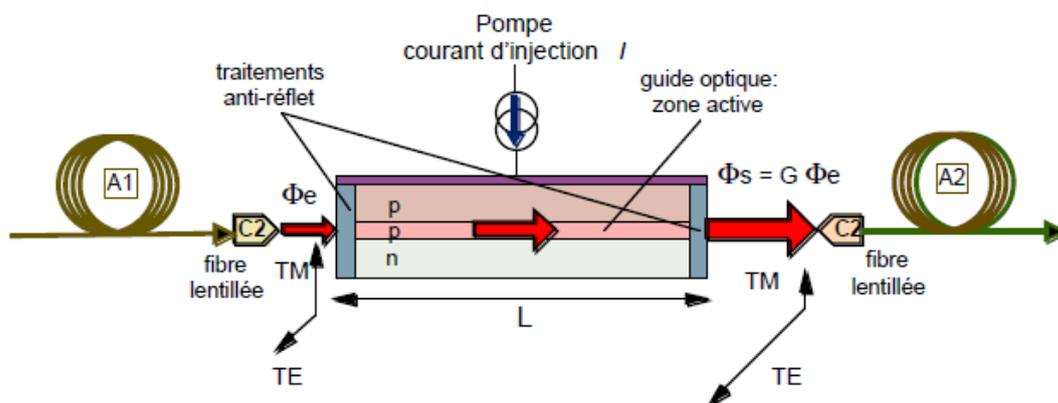


Figure II.2 : Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur [4].

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

La lumière incidente entre dans le circuit, est amplifiée et sort par l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre, comme nous le voyons dans la figure II.2, et le mieux sera de ne pas avoir de réflexion du signal dans l'amplificateur.

Les amplificateurs optiques à semi-conducteurs sont caractérisés : par une puissance de saturation en sortie autour de 5-10mW, une bande passante optique importante, ainsi qu'un gain élevé (jusqu'à 30 dB) selon le semi-conducteur, la longueur d'onde, le courant injecté et la puissance du signal incident.

Dans l'absence des effets non linéaires, de bons amplificateurs à semi-conducteurs vont être obtenus. En effet, la saturation du gain peut être obtenue de façon efficace, néanmoins des distorsions du signal et une diaphonie inter-canal importante dans les systèmes multicanaux sont créés et donc le gain des matériaux dépendra relativement de la température [4].

II.1.2. Amplificateurs à fibres optiques

La recherche d'amplificateurs basés sur les fibres optiques a été favorisée, et les différents travaux ont démontré que l'amplification dans les fibres peut être de type émission stimulée, comme nous l'avons expliqué précédemment, soit elle provient de l'interaction photons/photons (effet Raman) et on définit donc d'amplification non linéaire.

II.1.2.1. Amplificateurs à fibre dopée terres rares

Les amplificateurs à fibres dopées sont des morceaux de fibre optique d'une longueur qui varie entre quelques dizaines de mètres dans le cœur et dans lequel on ajoute des ions de terre rares à une concentration d'environ 0.1%.

Le dopant le plus utilisé est l'Erbium, qui permet d'obtenir un gain sur la fenêtre spectrale «C» qui couvre les longueurs d'onde de 1528 à 1563 nm comme le montre la (figure II.3). Lorsqu'un signal laser, dit signal de pompe de longueur d'onde plus faible (980 ou 1480 nm) est envoyé dans la fibre, les dopants passent dans un état de plus haute énergie, 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 et on retrouve le phénomène d'amplification par émission stimulée [16]. La nature de la radiation fait que la dynamique de ce milieu est généralement plus lente que celle des amplificateurs à semi-conducteur. Cependant, le gain est quasi indépendant de la température.

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

La capacité d'amplification multicanaux de ces amplificateurs et les augmentations du débit de transmission tend à accroître la bande d'amplification et, par conséquent, à développer des amplificateurs à gain plat pour les bandes suivantes :

- La bande L : Sa plage de longueur d'onde varie entre 1569 et 1603 nm. Des solutions prometteuses à base d'ions erbium et de filtres de Bragg utilisant d'autres matrices que la silice [17]. D'autres terres rares ont aussi été incluses notamment les ions praséodyme pour la région autour de 1310 nm,
- La bande S : Sa plage de longueur d'onde varie entre 1460 et 1530 nm, ou pour la région autour de 1310 nm, comme l'illustre la figure II.3 les ions thulium pour la bande «S» [18]. On souligne, de plus, que, par nature, l'émission stimulée amplifie tout signal dont la longueur d'onde est dans la bande de gain. En particulier, les photons produits par la relaxation des atomes excités en l'absence de photon incident (dite émission spontanée) créent un signal en sortie de l'amplificateur appelé émission spontanée amplifiée qui peut pénaliser les transmissions où plusieurs amplificateurs sont mis en cascade.

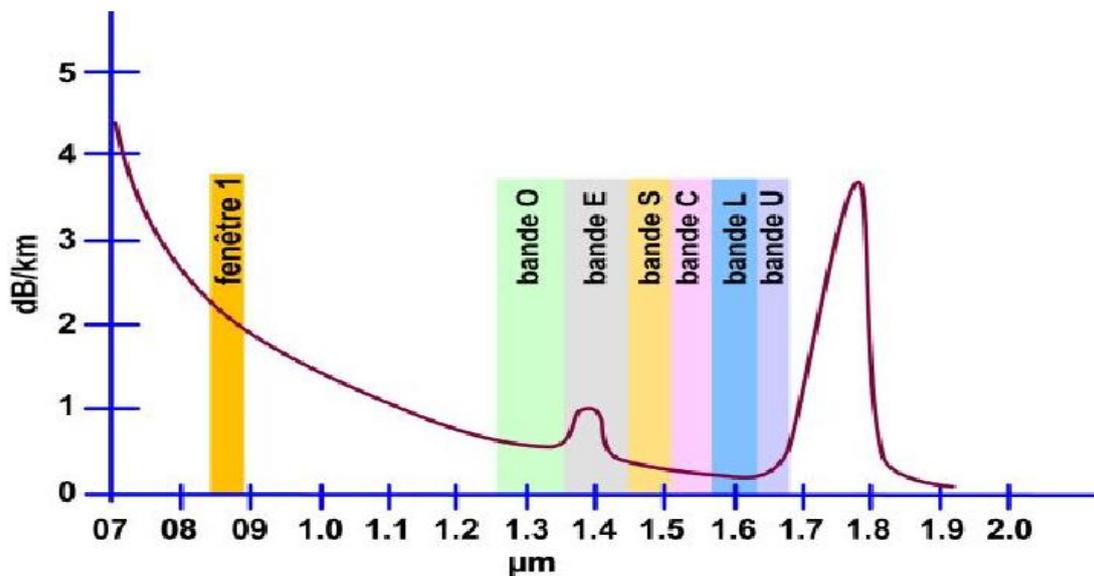


Figure II.3 : Les différentes fenêtres spectrales.

II.1.2.2. Amplificateurs à effet non-linéaires (Raman ou Brillouin)

Contrairement aux deux types d'amplificateurs que nous avons introduits précédemment, l'amplification à effet non-linéaires ne se repose pas sur une émission stimulée mais sur l'utilisation d'un des phénomènes NL non-résonnants : les effets Raman ou Brillouin.

L'utilisation volontaire d'un laser de pompe émettant un signal de forte puissance dont la direction et la longueur d'onde sont choisies en fonction du type d'amplification (Raman ou

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

Brillouin) désiré permet de provoquer les transferts d'énergie et conduit à la réalisation d'amplificateurs optiques non-linéaires. Cependant, la faible efficacité de la conversion de puissance fait que de grandes distances de propagation (>1 km) sont généralement requises.

L'écart de 11 GHz entre la longueur d'onde de la pompe et du signal (dans le cas d'une diffusion Brillouin) a restreint l'utilisation des amplificateurs à effet Brillouin au développement de quelques sources optiques. Au contraire, les amplificateurs à effet Raman sont des alternatives intéressantes aux amplificateurs à fibre dopée tant pour l'amplification à $1,3 \mu\text{m}$ qu'à $1,55 \mu\text{m}$ et font partie de l'arsenal des techniques utiles, entre autre, pour l'aplanissement du gain d'amplificateurs large bande ou la compensation des effets Raman dans les réseaux WDM à $1,55 \mu\text{m}$. Leur pompage est souvent réalisé en combinant l'émission laser de plusieurs lasers à semi-conducteurs de longueurs d'onde différentes afin d'obtenir la distribution spectrale du gain désirée (uniforme ou non) [9].

II.1.3. Caractéristiques d'un amplificateur optique

Nous avons défini le principe et les mécanismes de l'amplificateur optique. Nous allons maintenant nous intéresser plus précisément à ses caractéristiques.

II.1.3.1.Émission spontanée amplifiée (ASE)

Tous les ions excités peuvent faire une transition spontanée vers l'état fondamental en émettant un photon. Une partie de l'émission spontanée générée dans un EDFA est contenue et guidée par le cœur de la fibre. Cette émission spontanée est ensuite amplifiée par l'ion erbium à mesure qu'elle se propage dans la fibre et stimule l'émission d'autres photons de même caractéristiques que le photon spontané incident. Cet effet parasitique est une source de bruit importante générée sur toute la largeur du spectre de fluorescence d'ion erbium ce qui entraîne une détérioration des performances de l'EDFA [19].

II.1.3.2. Différents types de pompage

Il existe plusieurs types de pompage que nous allons le représenter par la figure II.4 :

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

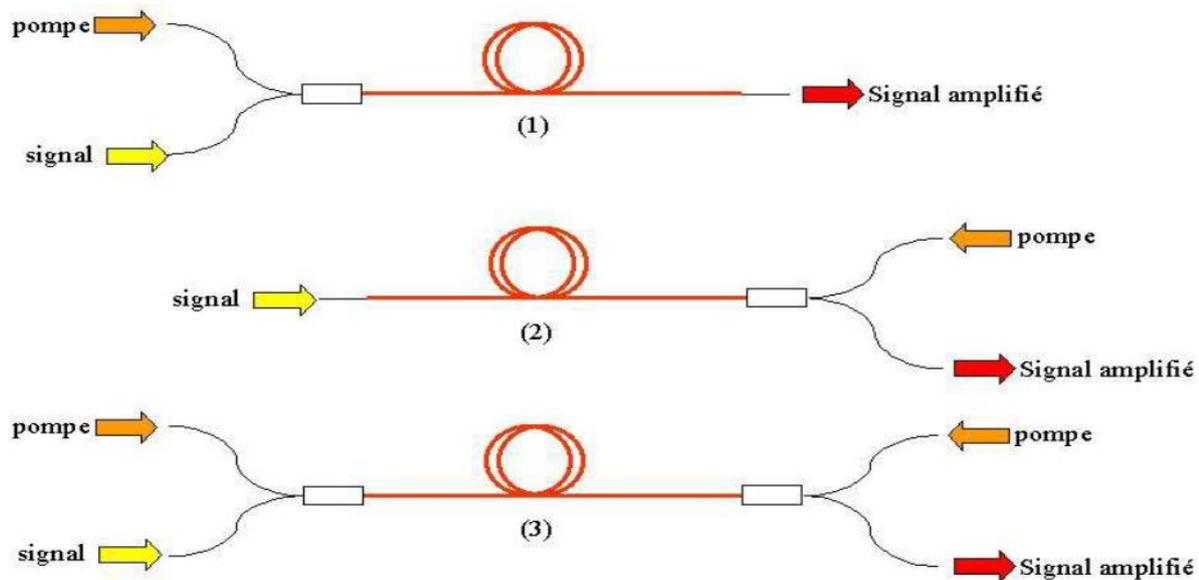


Figure II.4 : Différents types de pompage : (1) pompage co-propagatif, (2) pompage Contra-propagatif, (3) pompage bidirectionnel [20].

Dans le cas du pompage co-propagatif représenté en figure II.4.1, la puissance de la pompe est suffisamment forte au début de la fibre amplificatrice pour exciter une forte proportion des ions de terres rares et créer une forte inversion de population. Au cours de la propagation, la puissance de la pompe disponible décroît et l'inversion de population diminue. Au-delà d'une certaine longueur de fibre, l'inversion de population n'est plus suffisante pour permettre l'amplification, le signal sera donc absorbé.

Ce type de pompage est obtenu avec un faisceau ayant une longueur d'onde de 980nm représenté en figure II.5.a. Dans ce cas, on est en présence d'un système à trois niveaux. Un photon de pompe à 980 nm permet d'exciter un électron du niveau $^4I_{15/2}$ vers le niveau $^4I_{11/2}$. La durée de vie de ce niveau est très faible et un électron présent sur ce niveau se désexcite très rapidement vers le niveau métastable $^4I_{13/2}$ lors d'une transition non radiative [18].

L'ion Erbium présente une faible section efficace d'émission autour de 980 nm ce qui permet de réaliser presque complètement l'inversion de population. Avec ce type de pompage, la dégradation du rapport signal à bruit à la traversée de l'amplificateur est minimale, à condition que la puissance d'entrée soit suffisamment importante.

Un ion excité au niveau $^4I_{13/2}$ peut se désexciter spontanément pour accéder au niveau $^4I_{15/2}$ et peut s'amplifier le long de la fibre.

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

Dans le cas d'un pompage contra-propagatif représenté en figure II.4.2 où la pompe et le signal ont des directions de propagation opposées, l'inversion de population est plus grande en fin de fibre, le signal est alors amplifié progressivement au cours de la propagation.

Cette configuration est plus favorable à l'obtention de forts gains. Cependant, le rapport signal/bruit se trouve dégradé. Les deux types de pompages peuvent être utilisés simultanément afin d'obtenir des performances optimales.

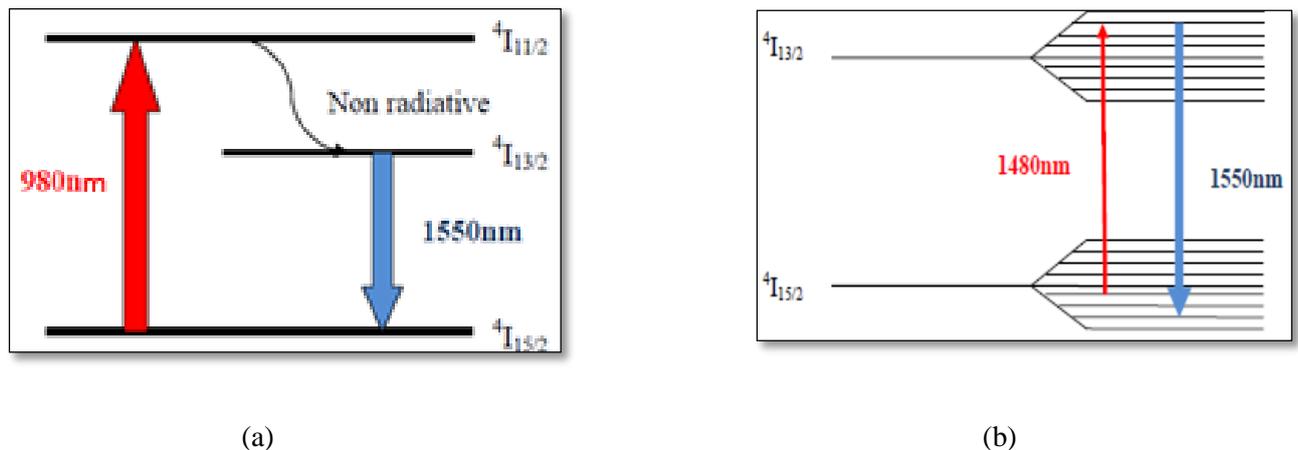


Figure II.5 : Niveaux d'énergie mis en jeu pour un pompage : (a) 980 nm, (b) 1480nm dans le cas de l'ion Erbium.

Le troisième type est un pompage à 1480 nm représenté en figure II.5.b. En première approche, il semble que l'on se trouve alors en présence d'un système à deux niveaux. Cependant, l'éclatement des niveaux discrets en sous niveaux Stark fait apparaître un fonctionnement de type quasi 3 niveaux. Les ions au niveau fondamental sont directement excités vers le niveau métastable $4I_{13/2}$. Ce type de pompage permet lui aussi d'obtenir de fortes valeurs de gain ; mais étant donné que les niveaux sont de plus en plus proches, conduise à l'augmentation de l'ASE (l'émission spontanée amplifiée).

II.2. Fibre optique dopées aux terres rares

Dans le cadre des fibres optiques dopées aux terres rares, La matrice hôte des fibres optiques dopées Terres-Rares est fabriquée à partir des mêmes verres que ceux utilisés pour la fabrication des fibres optiques. La préforme est en général fabriquée par la méthode MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition). Il existe plusieurs types de fibres optiques : qui sont fabriqués à partir de la silice. Leur structure est composée d'un atome de Silicium lié à 4 atomes Oxygène sous forme d'un tétraèdre SiO_4 [21].

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

En plus des dopants classiques, comme le germanium, le phosphore, on ajoute de l'aluminium pour la réalisation de la préforme de la fibre destinée à contenir des Terres-Rares. L'ajout de cet élément permet de modifier le réseau de la matrice hôte, et créer ainsi des sites pour accueillir les ions erbium représentés en figure II.6. Ces derniers sont incorporés à la fin du dépôt permettant la réalisation du cœur de la préforme [21].

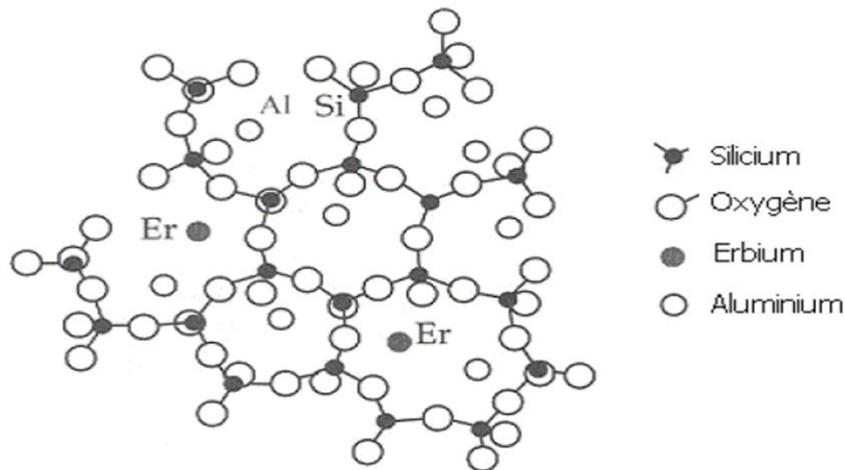


Figure II.6 : Répartition des ions A^{3+} et Er^{3+} dans une matrice silice.

II.3. Spectroscopie de l'ion Erbium

L'élément erbium fait partie de la famille des terres-rares, appelée également les Lanthanides. Cette famille appartient au tableau de Mendeleïev voir la figure II.7, leur numéro atomique allant de 58 à 71, nous nous intéressons à l'atome Erbium qui porte le numéro 68, qui contient un nombre important de niveaux par rapport à les autres atomes (Ytterbium, Cérium), la configuration électronique des Terres-Rares est de la forme suivante :



Où N est le nombre d'électrons de la couche 4f et varie entre 1 et 14 selon la Terre Rare.

La particularité de cette famille réside dans le fait que les sous-couches $5s^2$ et $5p^6$ sont complètes, par contre la couche électronique profonde $4f$ est incomplète. Cette répartition électronique écarte les électrons de la sous-couche 4f optiquement actifs et les transitions électroniques entre les sous-niveaux de cette couche ne sont ainsi que modérément affectées par l'introduction de l'atome dans une matrice hôte.

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
V	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B	VIII B	VIII B	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VI A	VII A	VIIIA
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* Lanthanides	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	** Actinides	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
			* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Métaux alcalins	Métaux alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition
Métaux pauvres	Métalloïdes	Non-métaux	Halogènes	Gaz rares

Figure II.7 : Tableau périodique des éléments.

Sous sa forme trivalente, l'ion erbium perd les deux électrons de la couche 6s et un de la couche 4f. Par contre, les électrons des couches 5s² et 5p⁶ demeurent et servent d'écran à ceux de la couche 4f siégeant des transitions intraconfigurationnelles. Ce dernier est caractérisé par une spectroscopie complexe vis-à-vis du nombre des niveaux qu'il possède. Son utilisation est motivée par le fait qu'il permet l'amplification dans la bande des télécommunications optiques longues distances.

II.4. L'amplificateur à fibre dopée erbium, l'EDFA

Le rôle des EDFA est d'augmenter la puissance du signal, leur principe de fonctionnement est celui présenté sur la Figure II.8 [22].

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

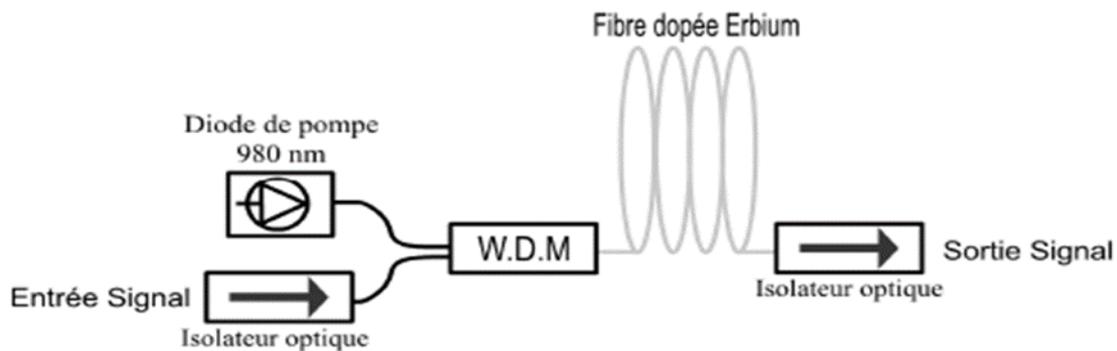


Figure II.8 : Schéma synoptique d'un EDFA [22].

Le signal de télécommunication passe à travers un isolateur, il est ensuite couplé au faisceau de la diode de pompe fonctionnant à 980 nm via un multiplexeur en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexer WDM ou MUX) puis introduit dans la fibre dopée erbium, enfin le signal sort de l'amplificateur via un second isolateur et un MUX (qui n'est pas représenté sur le schéma) de découplage du faisceau de la pompe restante.

Le signal optique est un laser de longueur d'onde environ 1,5 μm , sa fréquence de modulation varie actuellement de 2,5 GHz à 40GHz.

La diode de pompe à 980 nm (de puissance allant de 10 mW pour certains systèmes mono canal, à plus de 500 mW pour des systèmes multicanaux) fournit la puissance optique nécessaire au fonctionnement de l'amplificateur.

Les isolateurs servent à minimiser le bruit provenant principalement de l'émission stimulée amplifiée envoyée sur la ligne et à empêcher un éventuel effet laser dans la fibre dopée. Le coupleur (MUX) permet d'introduire quasiment sans perte ($<0,3\text{dB}$) le faisceau signal et le faisceau pompe dans la même fibre optique. C'est dans la fibre dopée erbium que l'énergie du faisceau de la diode laser de pompe est absorbée par les ions erbium qui la transmettent au signal via de l'émission stimulée [22].

II.4.1. Principe de l'amplificateur à fibre dopée erbium, l'EDFA

Les fibres optiques dopées erbium sont utilisées dans les amplificateurs optiques et les lasers à fibres optiques comme milieu actif propice à une inversion de population. En effet, le niveau métastable $^4I_{13/2}$ de l'erbium possède une durée de vie relativement longue. En pompant la fibre à 980 nm, les ions erbium sont excités dans le niveau $^4I_{11/2}$. Depuis ce niveau, une partie des ions se désexcite de façon non radiative sur le niveau $^4I_{13/2}$ comme illustré en figure II.9

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

permettant, sous pompage adéquat, de réaliser une inversion de population correspondant à une population du niveau $^4I_{13/2}$ supérieure à celle du niveau $^4I_{15/2}$ [21].

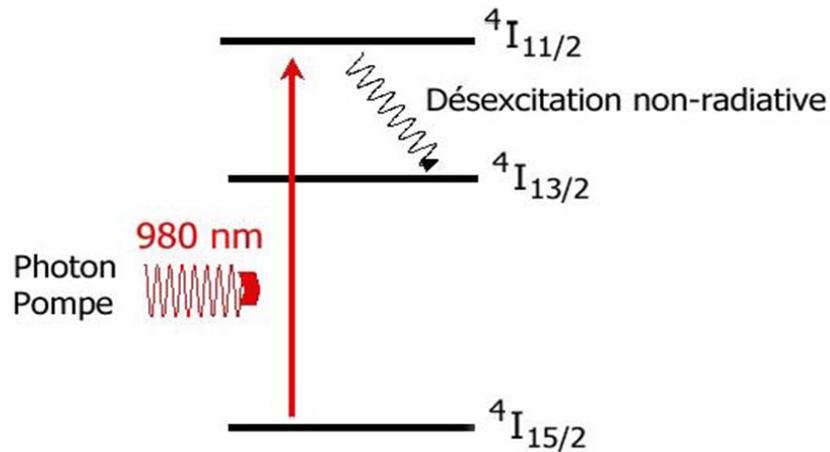


Figure II.9 : Mécanisme d'inversion de population d'un ion Er^{3+} sous pompage à 980 nm.

Cette inversion de population est à la base du principe de l'amplificateur optique. Une fois cette inversion réalisée, le signal injecté dans la fibre autour de 1550 nm stimule la transition $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ voire la figure II.10 et se trouve de cette manière amplifié.

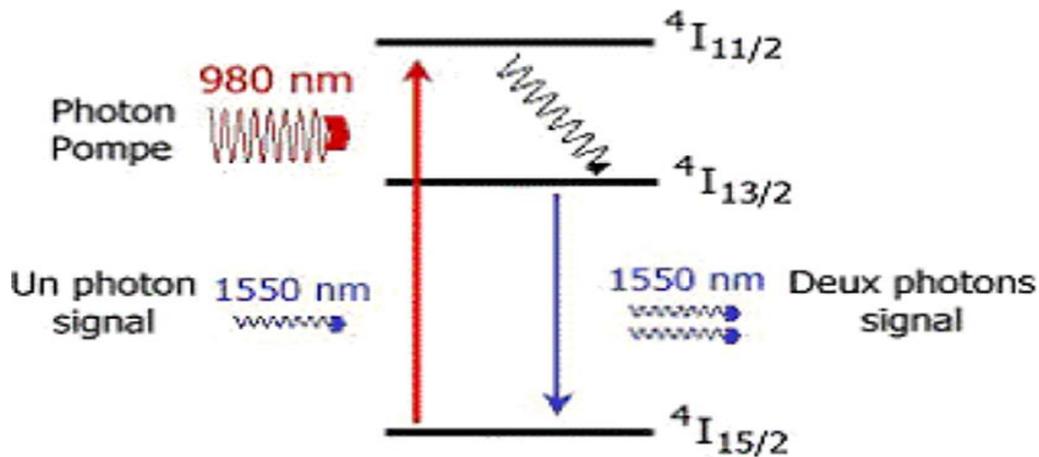


Figure II.10 : Processus de désexcitation dans un laser à fibre erbium.

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

II.5. Comparaison des amplificateurs

A travers le tableau II.1, nous allons effectuer une comparaison sur les différentes caractéristiques des amplificateurs optiques, que nous avons introduits précédemment.

	AOS	RAMAN	EDFA
Taille moyenne [par rapport à celle de l'AOS]	×1	×200	×100
Gain maximum	20dB	11dB	35dB
Rapport signal/bruit	8dB	4dB	4dB
Puissance de saturation en sortie	10dBm	Egale à la puissance de l'onde de pompe	13dBm
Bande spectrale	60nm	50nm	30nm
Densité d'intégration	forte	Faible	Faible

Tableau II.1 : Les caractéristiques associées aux différentes techniques d'amplification Optique.

II.6. Comportement spectral des fibres optiques dopées à l'erbium

Les interactions lumière-matière s'effectuent entre des niveaux discrets d'énergie, et tout niveau d'énergie correspondant à un état excité d'une durée de vie finie. Or la largeur d'une raie du spectre de transitions optiques est inversement proportionnelle à la durée de vie de l'état considéré.

Le comportement des ions terres rares est influencé par l'effet Stark, et l'augmentation des raies est provoquée par l'élargissement homogène et l'élargissement inhomogène.

II.6.1. Effet Stark

Tout ion introduit dans un matériau hôte est soumis à un champ électrique permanent généré par la distribution de charges appelé champ cristallin. Il subit l'effet Stark qui provoque une dégénérescence de ses niveaux d'énergie en multiplets [20].

La figure suivante nous montre l'éclatement des niveaux d'énergie initiaux i et j en multiplets comprenant respectivement g_1 et g_2 sous niveaux, sous l'effet d'un champ électrique. Il en résulte donc $g_1 \times g_2$ transitions possibles entre les deux multiplets [9] [10].

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

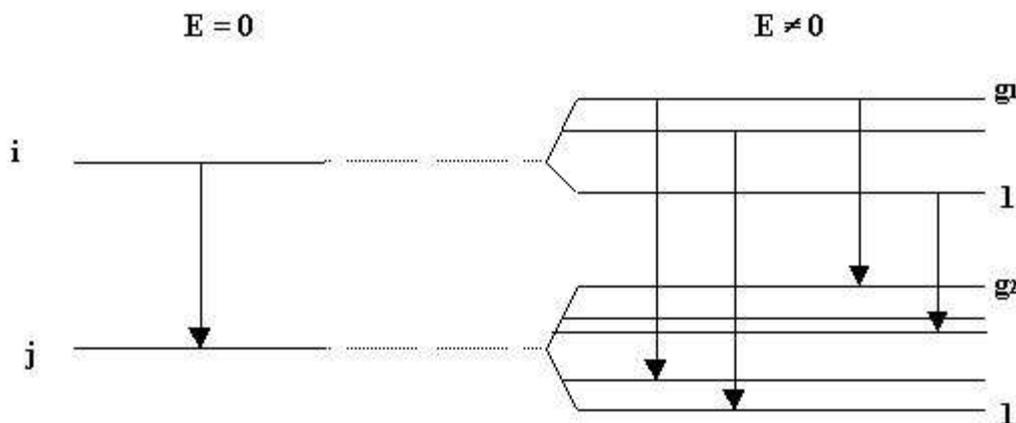


Figure II.11 : Effet Stark sous l'action d'un champ électrique cristallin [9].

Dans le cas de l'ion erbium, à température ambiante, l'effet Stark provoque la dégénérescence des niveaux $^4I_{15/2}$ et $^4I_{13/2}$ en respectivement 8 et 7 sous-niveaux, ce qui autorise 56 transitions possibles.

II.6.2. Élargissement homogène

Chacune des $g_1 \times g_2$ transitions possibles présentées au dernier paragraphe subit un élargissement spectral induit par des transitions par phonons entre des niveaux d'un même multiplet.

Cette augmentation est homogène car tous les atomes du milieu subissent les mêmes effets. En revanche cet élargissement dépend de la matrice hôte, des ions terres rares et est d'autant plus important que la température est élevée.

Les raies élargies par ce phénomène ont la forme d'une fonction lorentzienne [20].

II.6.3. Élargissement inhomogène

Chaque ion occupe un site particulier dans la matrice hôte, leur répartition spatiale étant irrégulière, voire la figure II.6.

Cette situation implique donc que chaque ion possède un champ cristallin qui lui est propre. En conséquence chaque ion subit l'effet Stark de manière différente, et donc chaque ion possède des raies de fréquences qui diffèrent les unes des autres [20].

L'élargissement inhomogène est très peu dépendant de la température et se caractérise par des raies de forme gaussienne. L'allure d'une raie spectrale correspondant à une transition optique est le produit de convolution des allures lorentziennes et gaussiennes des raies élargies de façon homogène et inhomogène. On appelle cette forme la forme de Voigt [20].

Chapitre II : Présentation du principe des fibres optiques dopées en Erbium

Conclusion

Les amplificateurs à semi-conducteur ainsi que les amplificateurs à effet non-linéaires (Raman ou Brillouin) n'apparaissent que très peu dans les systèmes de transmissions, car ils présentent aujourd'hui des caractéristiques assez peu favorables, au regard des EDFA. On notera cependant qu'il est le meilleur à 1,55 μm toute en remédiant à l'atténuation du signal dans les fibres optiques.

A travers ce chapitre, nous avons présenté le principe des amplificateurs optiques ainsi que leurs différents types, et nous avons mis en avant les propriétés des amplificateurs dopés Erbium, qui assure une transmission des signaux avec de meilleures performances.

III

Modélisation d'un amplificateur à fibres dopées en Erbium

Introduction

Les EDFA placés directement dans la ligne de transmission permettent de compenser, par une voie purement optique, les pertes dues à l'atténuation dans la fibre, et ils sont en phase de remplacer la majeure partie des régénérateurs grâce à leurs intégrations faciles dans la liaison en fibre optique.

Ce chapitre est structuré de la manière suivante : dans un premier temps nous allons développer une modélisation basée sur les équations de population pour représenter le comportement des dopants et les équations différentielles décrivant l'évolution des puissances le long de la fibre optique. Dans le second lieu nous allons proposer un modèle Simulink qui nous permettra de résoudre l'équation différentielle de densité de population, avec une meilleure précision et qui nous conduira à des résultats analytiques finalement, nous allons estimer le gain (G) en fonction de la puissance de la pompe pour de différentes longueurs (L) de notre guide d'onde (EDFA). Aussi le facteur de bruit et la puissance (ASE).

III.1. Modélisation de l'amplificateur à fibre dopée erbium

Dans le cadre de notre étude, nous considérons le cas des fibres optiques dopées en erbium (Er^{3+}) destinées à l'amplification de la fibre dopée autour de la longueur d'onde du signal à 1550 nm. Nous allons déterminer les équations qui régissent l'évolution des densités volumiques de populations, dans le cas du pompage à 980 nm.

Tout en utilisant un système à trois niveaux de l'erbium (Er^{3+}) connu en communication optique, représenté dans la figure III.1.

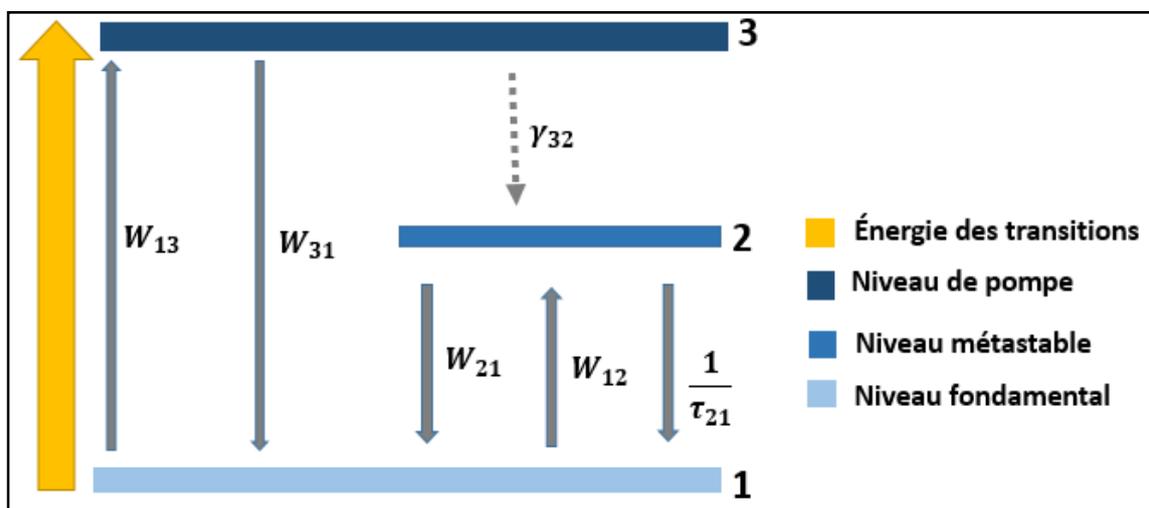


Figure III.1: Diagramme de transition entre les niveaux d'énergie de l'ion erbium.

Chapitre III : Modélisation d'un amplificateur à fibres dopées en Erbium

Les niveaux (1), (2) et (3) correspondent respectivement aux niveaux ${}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{13/2}$ et ${}^4I_{11/2}$.

Avec :

${}^4I_{15/2}$ correspond à la densité de population du niveau de pompe.

${}^4I_{13/2}$ correspond à la densité de population du niveau métastable.

${}^4I_{11/2}$ correspond à la densité de population du niveau fondamental.

III.1.1. Les coefficients de transitions

- γ_{32} représente une transition non radiative.
- $1/\tau_{21}$ est une transition spontanée.

III.1.1.1. Les taux de transitions

- Le paramètre W_{13} représente le taux d'absorption d'un photon de pompe par un ion de niveaux N_1 .
- W_{31} est le taux d'émission stimulée à la longueur d'onde de pompe.
- W_{12} représente le taux d'absorption d'un photon du signal par un ion du niveau N_1 ,
- W_{21} est le taux d'émission stimulée à la longueur d'onde du signal.

Pour obtenir de meilleures performances en terme d'amplification, il faut chercher une inversion de population la plus grande possible. Pour cela les ions actifs doivent avoir une forte valeur de W_{13} et un taux W_{31} faible, afin qu'une proportion maximale entre eux soit excitée par la pompe vers le niveau N_3 et qu'il puisse participer au processus d'amplification [23].

III.1.1.1.1. Les équations du taux de transition

Les équations qui déterminent le taux de transition sont :

$$\begin{aligned}w_{12} &= \frac{I_s \sigma_{12}}{h\nu_s} \\w_{21} &= \frac{I_s \sigma_{21}}{h\nu_s} \\w_{13} &= \frac{I_p \sigma_{13}}{h\nu_p}\end{aligned}\tag{III.1}$$

Tel que: I_i , est l'intensité d'émission du signal ou de la pompe :

$$I_i = \frac{P_i}{A}\tag{III.2}$$

Avec : σ_{13} est la section efficace d'absorption du pompage, σ_{12} est la section efficace d'absorption du signal, σ_{21} la section efficace d'émission du signal et A la surface de la fibre dopée qui est égale à πa^2 , où a : est le rayon du cœur de la fibre dopée.

Les flux des photons sont donnés par [10]:

Chapitre III : Modélisation d'un amplificateur à fibres dopées en Erbium

$$\Phi_j = \frac{\Gamma P}{Ah\nu} \quad (\text{III.3})$$

Avec : Φ_j est le flux de pompe ou du signal.

L'intensité en fonction du flux est la suivante :

$$I = \frac{\Phi}{h\nu} \quad (\text{III.4})$$

Les équations du taux de transition se simplifient à :

$$\begin{aligned} w_{12} &= \frac{\Gamma_s \sigma_{12} P_s}{A} \\ w_{21} &= \frac{\Gamma_s \sigma_{21} P_s}{A} \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

$$w_{13} = \frac{\Gamma_p \sigma_{13} P_p}{A}$$

Γ_j : est le facteur de confinement du signal ou de la pompe.

La puissance du signal et la puissance de la pompe équation III.6 s'expriment en photons/seconde et sont reliées à la puissance en milliwatts par la relation suivante [24]:

$$P_j (\text{photon}/S) = \frac{P_j (\text{en mW})}{h\nu_j} \quad (\text{III.6})$$

Tel que : h est la constante de Planck, et ν_j est la fréquence normalisée qui égale à :

$$\nu_i = \frac{c}{\lambda_i} \quad (\text{III.7})$$

Tel que : c est la vitesse de la lumière qui est égale à $3 \cdot 10^8$ m/s, et λ_p , λ_s sont les longueurs d'onde du pompage et du signal respectivement.

III.1.1.2. Durée de vie des niveaux d'énergie de l'erbium

Une fois que l'électron est excité, la probabilité pour qu'il redescend à l'état fondamental dépend du niveau sur lequel il se situe, cette probabilité est appelée « temps de vie » du niveau. Le niveau métastable (N_2) se caractérise par une durée de vie longue notée τ , approximativement égale à 10 [ms]. La transition qui nous intéresse se produit entre les niveaux N_1 et N_2 . Il est important de s'intéresser à ces temps de vie, en effet on remarque en particulier que le temps de vie d'un électron sur le niveau N_3 à 980 nm est très court par rapport au temps de vie d'un électron situé sur le niveau N_2 à 1530 nm (1000 fois environ....) .ainsi on peut considérer qu'un électron absorbé à 980 nm en N_3 se trouve instantanément sur le niveau N_2 à 1550 nm [11].

III.1.2. Equation d'évolution des densités volumiques de population

L'évolution des populations atomiques (N_i) est définie avec une équation différentielle pour chaque niveau, et on appelle N_1 , N_2 et N_3 les densités volumiques de population des niveaux d'énergie (1), (2) et (3).

Les variations de densités de population des différents niveaux sont données par les relations suivantes :

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{13}N_1 + W_{31}N_3 + W_{21}N_1 + W_{12}N_2 + \frac{1}{\tau_{21}}N_2 \quad (\text{III.8})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \gamma_{32}N_3 - W_{21}N_2 + W_{12}N_1 - \frac{1}{\tau_{21}}N_2 \quad (\text{III.9})$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\gamma_{32}N_3 + W_{13}N_1 - W_{31}N_3 \quad (\text{III.10})$$

$$N_t = N_1 + N_2 + N_3 = \rho \quad (\text{III.11})$$

Tel que : ρ est la densité volumique de l'ion erbium contenue dans l'amplificateur.

Beaucoup d'amplificateurs et de lasers opèrent en régime continu ou en régime pulsé à très haute cadence. Alors, l'évolution des populations des niveaux électroniques atteint un régime stationnaire et conserve cet état permanent, pour tels systèmes, la dérivée temporelle de chaque population est nulle [6].

$$\frac{dN_i}{dt} = 0 \quad (\text{III.12})$$

III.1.2.1. Simplification du modèle à deux niveaux

La durée de vie des ions erbium dans le niveau (3) est très faible et donc on peut négliger N_3 [1], et puisque $\gamma_{32} \ll \tau_{21}$ et $W_{31}=0$ [23] ; à partir de l'équation (3.6) nous aurons $\gamma_{32}N_3 = W_{13}N_1$.

Le système utilisé est un système laser, il est fermé et conserve le nombre d'atomes, seulement deux des trois équations (III.8) à (III.10) sont utiles et la troisième est redondante. Nous allons définir les différentes densités de populations des niveaux atomiques N_i en fonction des taux de transitions stimulées W_{ij} et des temps de vie spontanés τ_{ij} .

Les équations (III.8), (III.10) et (III.11) se simplifient à :

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{13}N_1 + W_{21}N_1 - W_{12}N_2 + \frac{1}{\tau_{21}}N_2 \quad (\text{III.13})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{13}N_1 + W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - \frac{1}{\tau_{21}}N_2 \quad (\text{III.14})$$

Chapitre III : Modélisation d'un amplificateur à fibres dopées en Erbium

$$\rho = N_1 + N_2 \quad (\text{III.15})$$

$$N_2(\rho) = \rho \frac{W_{13} + W_{12}}{W_{21} + W_{12} + W_{13} + \frac{1}{\tau_{21}}} \quad (\text{III.16})$$

D'après l'équation III.15, nous avons obtenu :

$$N_1 = \rho - N_2 \quad (\text{III.17})$$

D'où :

$$N_1 = \rho \frac{W_{21} + \frac{1}{\tau_{21}}}{W_{21} + W_{12} + W_{13} + \frac{1}{\tau_{21}}} \quad (\text{III.18})$$

La somme des densités de population est donnée par [24] :

$$N_t = N_1 + N_2 = \rho LA \quad (\text{III.19})$$

Tel que : L est la longueur de la fibre et A est la surface de la fibre.

III.2. Gain du signal

Pour quantifier les performances d'un amplificateur nous définirons le gain comme étant le rapport de puissance du signal en sortie du dispositif P_s et la puissance de signal injectée P_e . La relation entre ces deux puissances est donnée par la formule suivante [4].

$$G(w) = \frac{p_s}{p_e} \quad (\text{III.20})$$

En décibels (dB), le gain s'exprime comme étant :

$$G(dB) = p_s - p_e \quad (\text{III.21})$$

Le gain de la pompe et du signal de la source s'exprime comme suit [24] :

$$\begin{aligned} G_p &= \frac{\Gamma_p \sigma_p^a N_2}{A} - \Gamma_p \sigma_p^a \rho L \\ G_s &= \frac{\Gamma_s \sigma_s^e N_2}{A} - \frac{\Gamma_s \sigma_s^a N_2}{A} \end{aligned} \quad (\text{III.22})$$

III.3. Les expressions de la puissance

La puissance dépend de z qui correspond à la distance de propagation et elle est déterminée par les relations suivantes [25] :

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial z} &= -\Gamma_p \sigma_{13} N_1 P_p - \gamma_p P_p \\ \frac{\partial P_s}{\partial z} &= -\Gamma_s \sigma_{12} N_1 P_s + \Gamma_s \sigma_{21} N_2 P_s - \gamma_s P_s \end{aligned} \quad (\text{III.23})$$

Avec γ_s est le facteur de perte qu'est nulle.

L'équation III.23 devient :

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_p}{\partial z} &= -\Gamma_p \sigma_{13} N_1 P_p - \gamma_p P_p \\ \frac{\partial P_s}{\partial z} &= -\Gamma_s \sigma_{12} N_1 P_s + \Gamma_s \sigma_{21} N_2 P_s\end{aligned}\quad (\text{III.24})$$

Nous remplaçons l'équation III.24 dans l'équation III.14 et nous la multiplions avec la surface de la fibre (A), ainsi nous obtenons :

$$\frac{\partial}{\partial t} (N_2 A) = -\frac{\partial P_s}{\partial z} - \frac{\partial P_p}{\partial z} - \frac{N_2 A}{\tau} \quad (\text{III.25})$$

Nous intégrons l'équation III.25 par rapport à z dans l'intervalle $[0, L]$ et nous aurons :

$$\frac{\partial}{\partial t} N_2 = P_s(0, t) - P_s(L, t) + P_p(0, t) - P_p(L, t) - \frac{N_2}{\tau} \quad (\text{III.26})$$

$P_s(0, t)$ et $P_p(0, t)$ représentent respectivement la puissance du signal et de la pompe en fonction du temps. A la sortie de la pompe $P_s(L, t)$ et $P_p(L, t)$ sont des fonctions de N_2 , comme nous le montrons ci-dessous [25]:

$$\begin{aligned}\frac{P_p(L, t)}{P_p(0, t)} &= \exp(G_p) \\ \frac{P_s(L, t)}{P_s(0, t)} &= \exp(G_s)\end{aligned}\quad (\text{III.27})$$

Nous remplaçons l'équation III.27 dans III.26 nous aurons :

$$\frac{\partial}{\partial t} N_2 = P_s(0, t)(1 - \exp(G_s)) + P_p(0, t)(1 - \exp(G_p)) - \frac{N_2}{\tau} \quad (\text{III.28})$$

Pour une amplification multicanal, la modélisation des équations peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} N_2 = \sum_{\lambda}^{\lambda} P_s(0, t)(1 - \exp(G_s)) + P_p(0, t)(1 - \exp(G_p)) - \frac{N_2}{\tau} \quad (\text{III.29})$$

III.4. Rapport signal / bruit

Le rapport signal/bruit, noté SNR (Signal to Noise Ratio), exprime la quantité de bruit optique générée 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 $d\lambda$ [4].

$$SNR = \frac{p_s}{p_{ASE}} \quad (\text{III.30})$$

Avec : p_{ASE} est la puissance de l'émission spontanée amplifiée.

$$p_{ASE} = N_{SP} h\nu (G - 1) B_0 \quad (\text{III.31})$$

D'où : B_0 est la largeur de bande utilisée pour déterminer la puissance de bruit.

Tel que : N_{SP} représente le facteur de l'inversion de population, il dépend des populations relatives N_1 et N_2 des états stables et excités suivant la relation :

$$N_{SP} = \frac{\sigma_s^e N_2}{\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1} \quad (\text{III.32})$$

III.5. Facteur de bruit

Le facteur de bruit est une caractéristique qui détermine l'apport du bruit de l'amplificateur au sein du système. Il correspond en régime linéaire au rapport entre le rapport Signal / bruit en entrée et en sortie de la fibre amplificatrice. Il s'exprime en décibels et son équation est la suivante [26].

$$F = \frac{SNR_e}{SNR_s} = n_{sp} \frac{G-1}{G} + \frac{1}{G} \quad (\text{III.33})$$

III.6. Simulation de la fibre optique amplificatrice dopée en erbium

Cette simulation établie avec le logiciel MATLAB/ Simulink concerne les différentes caractéristiques de la fibre optique dopée en erbium, permettant de modéliser l'équation III.28. La figure III.2 relève notre modèle de simulation schématisé par de différentes couleurs pour mieux distinguer chacun de ces derniers. La longueur d'onde de notre signal de source est de 1550 nm et d'une puissance du signal fixe de 0.1 mW tandis que la longueur d'onde de signal de pompe est de 980nm et sa puissance est variable.

Les données requises pour exécuter la simulation sont indiquées dans le tableau III.1, et les lectures sont faites directement dans les blocs d'affichage (Display).

Pour une meilleure compréhension on a utilisé un seul canal et nous avons supposé la densité de dopage de l'Erbium constante. Toutes fois, nous pouvons élargir notre simulation pour plusieurs sources en utilisant des Switches.

Notre modèle de simulation est fourni pour calculer le gain du signal (G_s) et le gain de la pompe (G_p) tout en utilisant les équations III.22 comme indiquent les figures III.2 et III.3.

La seconde section de la simulation est mise en œuvre pour résoudre notre équation différentielle de densité de population du niveau 2 équation III.28, avec une meilleure précision en convertissant la puissance en mW, après avoir fait le calcul en termes de photon/sec.

Les paramètres d'observation sont extraits directement à l'aide du bloc d'affichage Display et importés dans l'espace de travail WORKSPACE, afin de générer les graphes.

Nous allons également créer des fonctions sur Matlab, afin de calculer la puissance d'émission spontanée amplifiée selon l'équation III.31, qui est une source de détérioration des performances de l'EDFA, ainsi que le facteur de bruit (Noise Figure) qui détermine l'apport du bruit de l'amplificateur à fibres dopées en Erbium selon l'équation III.33.

Chapitre III : Modélisation d'un amplificateur à fibres dopées en Erbium

a- Modélisation du gain de la pompe G_p

A partir de nos équations démontrées au-dessus, nous avons conçu un modèle sous Matlab/Simulink qui nous permettra de calculer le gain de la pompe.

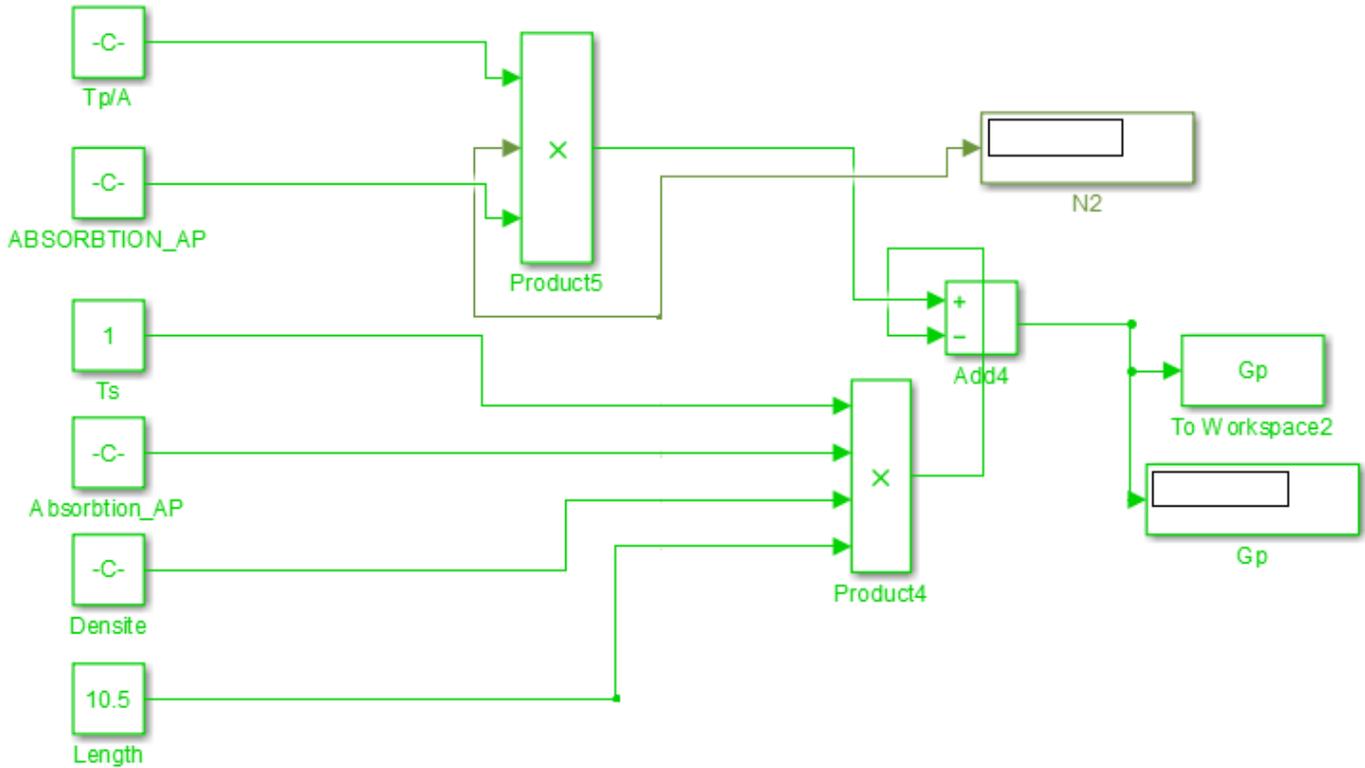


Figure III.2: Modélisation du gain de la pompe.

b- Modélisation du gain du signal G_s

De la même manière pour le gain de la pompe, nous avons procédé, pour effectuer un modèle sous Matlab/ Simulink qui nous permettra de calculer le gain de la pompe.

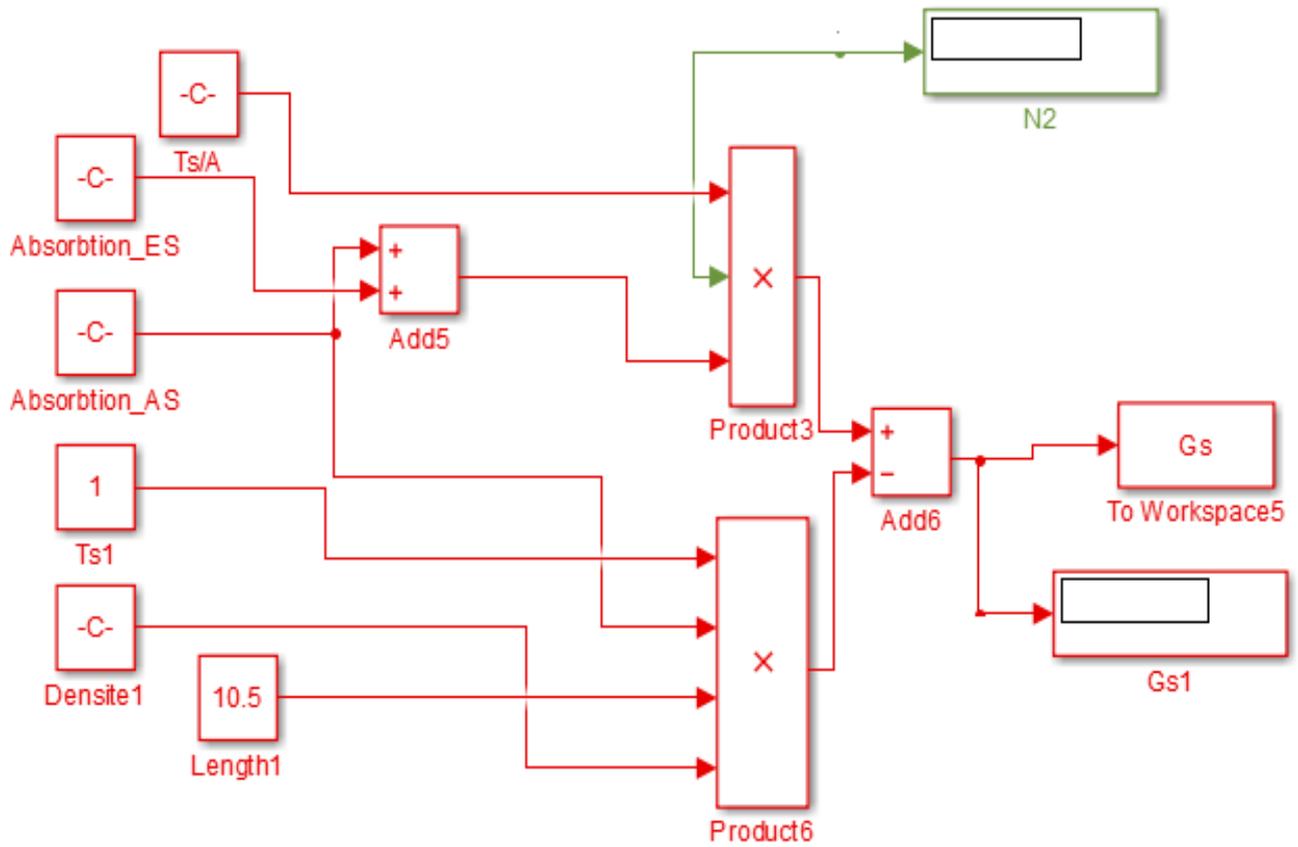


Figure III.3: Modélisation du gain du signal.

A travers la figure III.4. Nous allons présenter notre schéma bloc et l'ensemble des paramètres utilisés.

Chapitre III : Modélisation d'un amplificateur à fibres dopées en Erbium

III.6.1. Les différents paramètres utilisés dans la simulation

A travers le tableau III.1. Nous allons présenter les différents paramètres utilisés dans la simulation.

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Longueur d'onde de pompage	λ_p	980	nm
Longueur d'onde de signal	λ_s	1550	nm
Temps de vie	τ	10	ms
Section efficace d'absorption de pompe	σ_p^a	$0.75e^{-25}$	m^2
Section efficace d'absorption de signal	σ_s^a	$2.40e^{-25}$	m^2
Section efficace d'émission du signal	σ_s^e	$3.80e^{-25}$	m^2
Facteur de confinement de pompe	Γ_p	1	-
Facteur de confinement de signal	Γ_s	1	-
La densité volumique des ions erbium	ρ	$6.3e^{24}$	ions/ m^3
Rayon de l'EDFA	a	2	um
Aire de l'EDFA	A	$12.56e^{-12}$	m
La densité volumique de niveau 1	N_1	Simulation	ions
La densité volumique de niveau 2	N_2	Simulation	ions
Constante de Planck	h	$6.62e^{-34}$	Js
La vitesse de la lumière	C	$3e^8$	m/s
la largeur de bande optique.	B_0	25	nm
La puissance de la pompe	P_p	variable	mw
Longueur de la fibre	L	Variable	m
La puissance du signal	P_s	100 uw	mw

Tableau III.1 : Les différents paramètres utilisés dans la simulation de l'EDFA

III.6.2. Résultats de simulation et interprétations

III.6.2.1. Evolution des populations N1 et N2 dans la fibre dopée en erbium

La figure III.5 montre l'évolution des populations en fonction du temps pour une puissance de pompage 30mw, à longueur d'onde 980 nm. Et une puissance du signal qui égal à 0.1 mW.

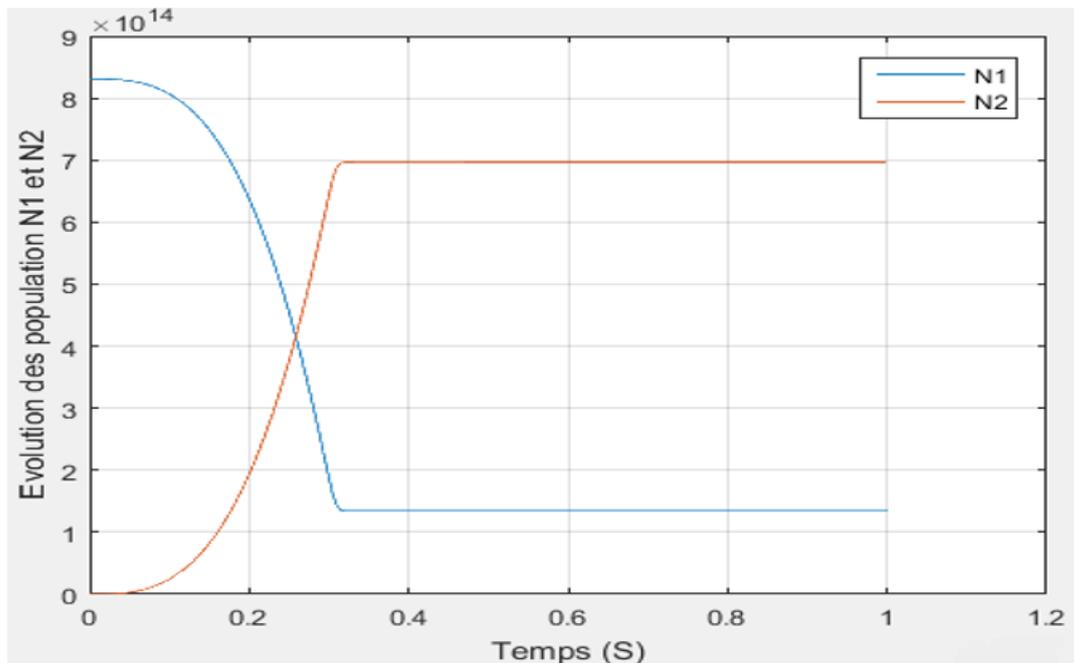


Figure III. 5 : Evolution des populations N1 et N2 en fonction du temps.

Nous constatons dans les premiers temps que la puissance fournie par la pompe est absorbée par le matériau.

On remarque que la densité de population du niveau N1 diminue et celle de N2 augmente avec le temps, la densité de population N2 est supérieure à celle de N1 on parle donc d'une inversion de population qui est presque totale à partir de 0.4 (s) pour une puissance de (30 mW).

L'ion erbium présente une section efficace d'émission faible autour de 980nm, ce qui permet d'avoir une inversion de population.

III.6.2.2. Evolution du gain

Après la simulation de notre schéma bloc sous Matlab / Simulink nous allons relever les différentes évolutions du gain toute en tenant compte des nombreux paramètres, tel que la longueur de la fibre dopée en Erbium et la puissance d'entrée de la pompe toute en fixant la puissance du signal à $100 \mu\text{W}$ et la densité de dopage de l'ion Erbium.

III.6.2.2.1. Le gain en fonction de la longueur de la fibre

La courbe III.6 montre la variation du gain en fonction de la longueur de la fibre dopée pour de différentes puissances de la pompe variant de (10 mW à 50 mW).

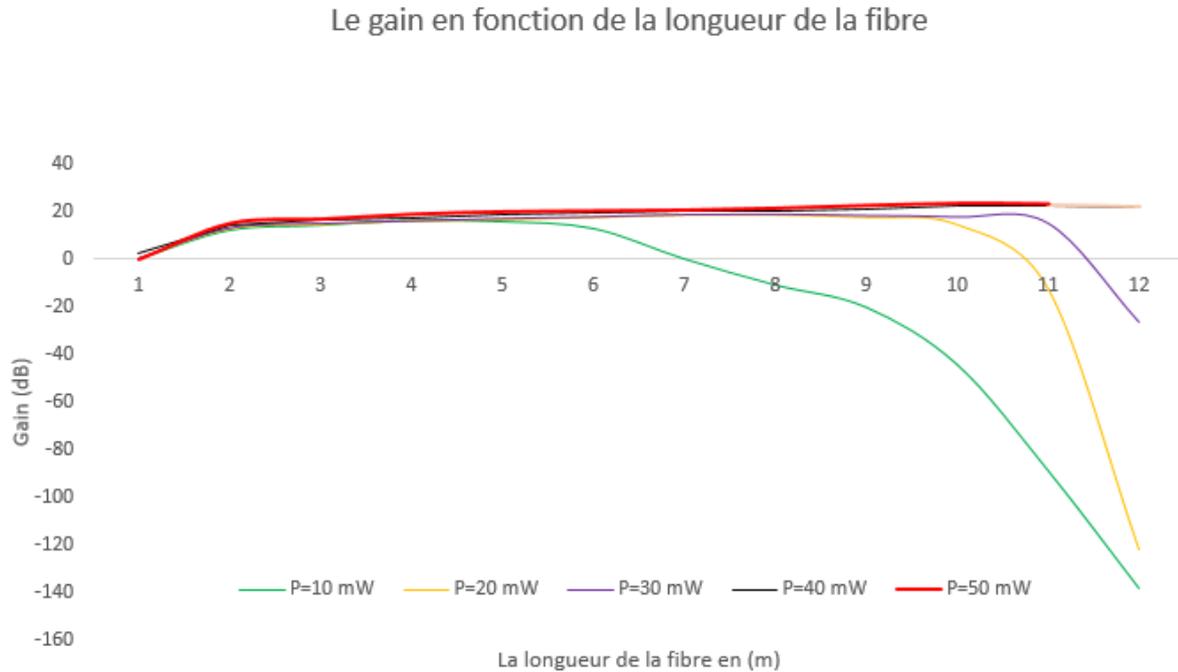


Figure III.6: Evolution du gain en fonction de la longueur de la fibre.

On observe que le gain varie avec la variation de la puissance de la pompe, pour des longueurs allant de 1 à 12m, et augmente tout en augmentant la puissance de la pompe pour atteindre la saturation à 10m, en raison de la limitation des ions dopés.

Pour certaines puissances de la pompe (de 10 à 30 mW) le gain diminue jusqu'à -140 dB, en raison de la forte absorption de la pompe, qui s'use avec le temps car les ions sont inversés dans la pompe.

Le gain est optimal à partir d'une puissance de 30mW.

III.6.2.2.2. Le gain en fonction de la puissance de la pompe

La figure III.7 illustre la variation du gain (dB) en fonction de la puissance de la pompe pour les différentes longueurs de la fibre dopée allant de 0 à 50m.

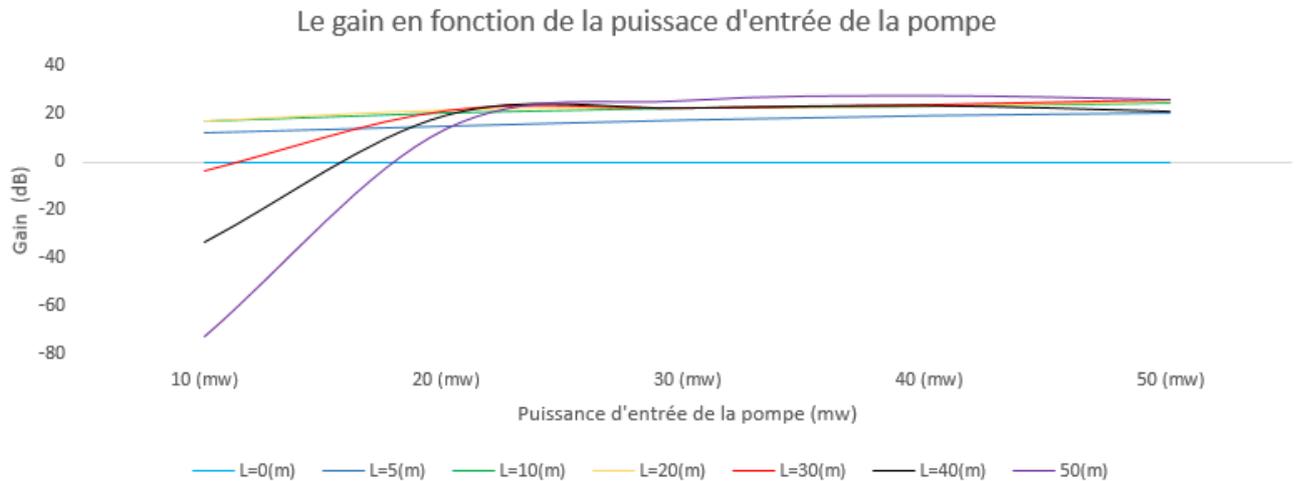


Figure III.7: Evolution du gain en fonction de la puissance de la pompe.

D'après la figure ci-dessus, on remarque que le gain augmente rapidement pour un pompage inférieur à 20 mW, au-delà ce dernier varie lentement pour atteindre une valeur de 25 dB du fait que tous les ions Erbium sont inversés.

Pour une puissance de 30mW, la puissance de la pompe devient suffisamment forte, donc le gain atteint la saturation indépendamment de la longueur de la fibre dopée.

Nous remarquons également que plus la longueur de la fibre dopée est grande, plus le gain est meilleur.

III.6.2.3. Evolution du facteur de bruit (Noise Figure)

Le facteur de bruit détermine l'apport du bruit de l'amplificateur au sein du système, et nous allons le déterminer après la simulation sous Matlab / Simulink, en fonction de la longueur de la fibre dopée ainsi que la puissance de la pompe.

III.6.2.3.1. Facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre dopée

La figure III.9 montre la variation du facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre variable avec une puissance de pompe allant de 10 à 50 mW, tandis que la puissance d'entrée du signal et la densité d'ions erbium demeurent constantes.

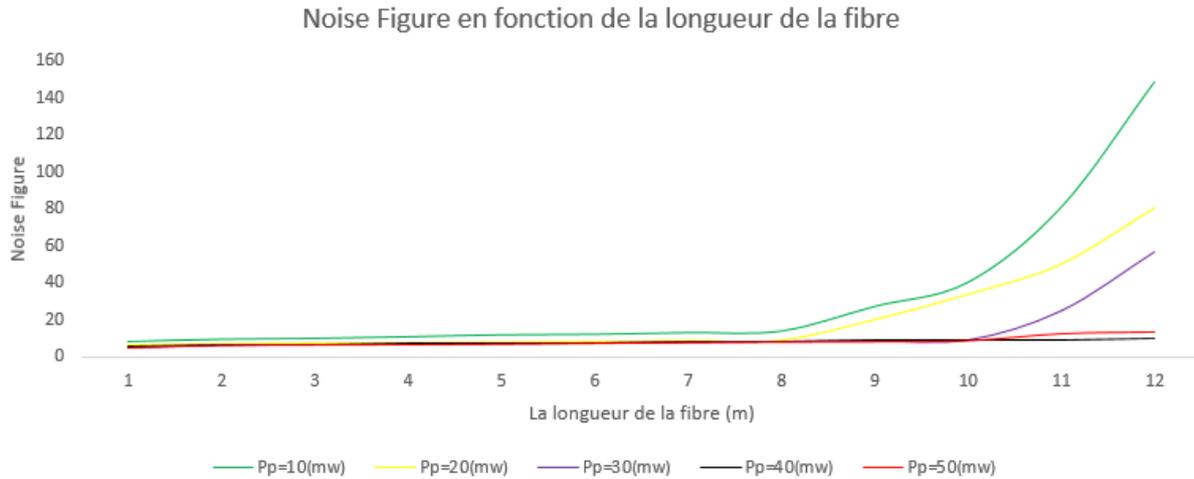


Figure III.8: Evolution du facteur de bruit en fonction de la longueur de la fibre.

D'après la figure III.8 nous remarquons que dans les premiers mètres de la fibre, le facteur de bruit est stable et à partir d'une certaine distance ; plus exactement 8m ; l'augmentation de ce dernier est clairement remarquable et cela se produit en raison de la diminution du gain avec une déplétion excessive de la pompe.

III.6.2.3.2. Facteur de bruit en fonction de la puissance de la pompe

La figure III.9 montre la variation du facteur de bruit en fonction de la puissance de la pompe toute en variant la longueur de la fibre de 5 à 70m, tandis que la puissance d'entrée du signal et la densité d'ions erbium demeurent constants.

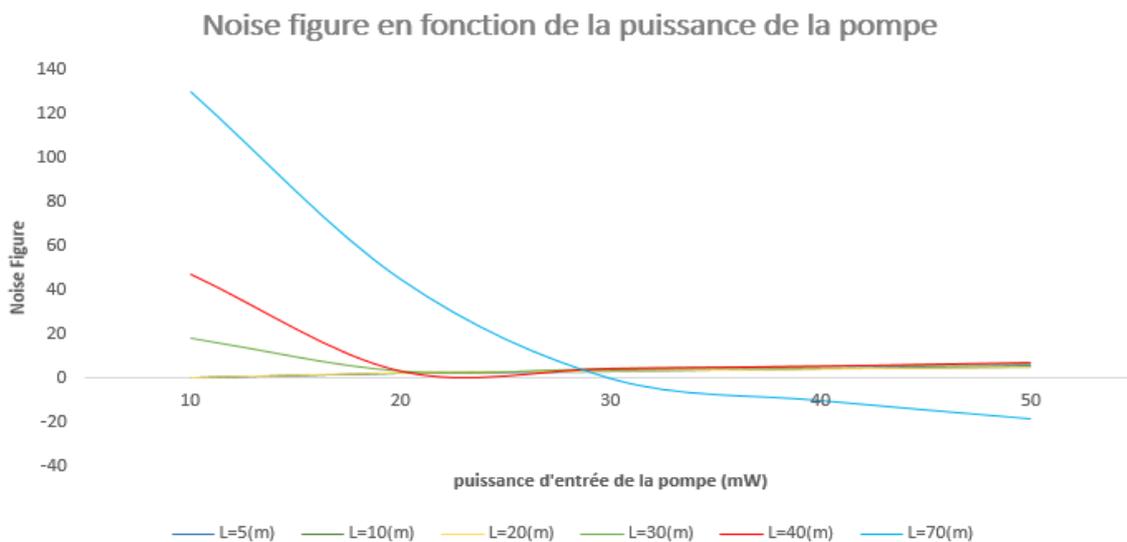


Figure III.9: Évolution du facteur de bruit en fonction de la puissance.

Chapitre III : Modélisation d'un amplificateur à fibres dopées en Erbium

On remarque que le facteur de bruit est proportionnel à la longueur de la fibre, c'est-à-dire plus la fibre est longue plus le facteur de bruit est grand, on remarque aussi que ce dernier diminue avec l'augmentation de la puissance de la pompe.

De plus, la valeur du bruit varie de façon linéaire par rapport à la puissance ASE, ce qui indique un gain de comportement inverse de l'amplificateur. Apparemment, à mesure que le gain augmente, le facteur de bruit a tendance à être minimum pour l'EDFA.

On conclut, que le facteur de bruit est réduit à un niveau minimal avec l'augmentation du gain.

III.6.2.4. La puissance spontanée amplifiée (ASE)

Il est indispensable de tracer la courbe de la puissance spontanée amplifiée, qui est un effet parasite et une source de bruit importante, générée sur toute la largeur du spectre de l'ion Erbium ce qui entraîne une détérioration des performances de l'EDFA.

Les (courbes III.10), montrent l'allure de la puissance spontanée amplifiée en fonction de la puissance de la pompe, pour de différentes longueurs de la fibre.

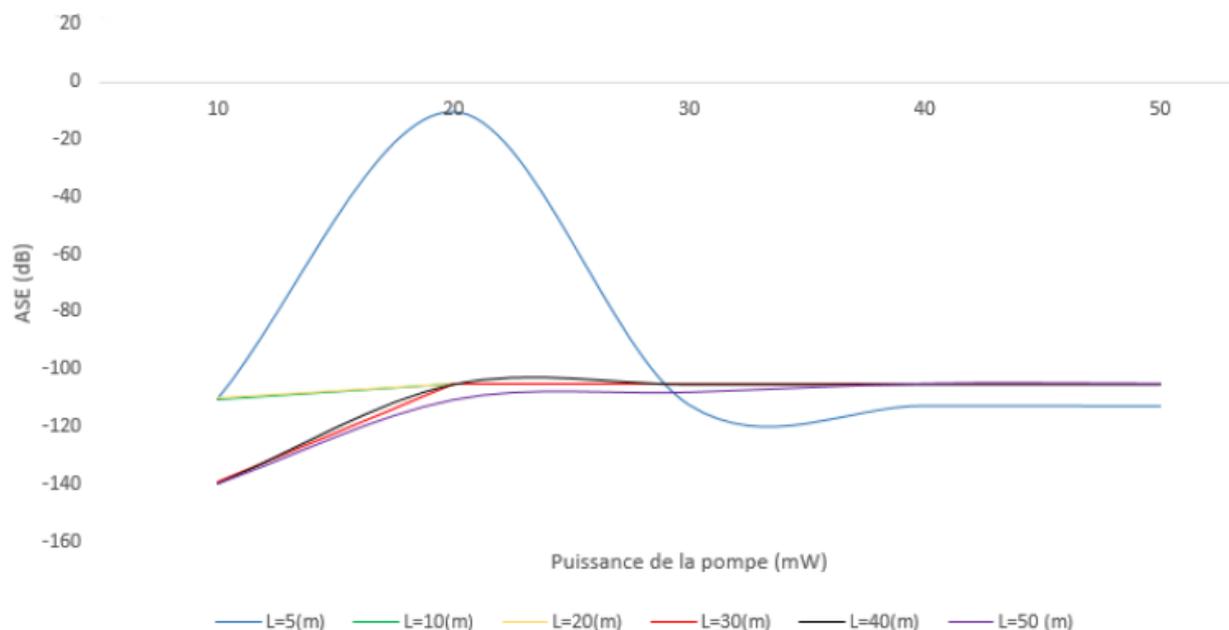


Figure III.10: La variation de la puissance ASE en fonction de la puissance de la pompe.

Chapitre III : Modélisation d'un amplificateur à fibres dopées en Erbium

D'après la figure III.10 on observe que la puissance ASE augmente avec l'augmentation de la longueur de la fibre, quoique pour une puissance allant de 10 à 30mW et une longueur de 5m, atteint un maximum de -60dB et diminue par la suite.

A partir d'une puissance de 30mw, on remarque que la puissance ASE demeure constante du fait que la puissance soit suffisamment élevée. On la considère donc comme une puissance optimale.

On conclut donc, que le facteur de bruit varie linéairement avec la puissance ASE, et inversement avec le gain de notre amplificateur optique.

Conclusion

Ce chapitre a établi la modélisation d'une fibre optique dopée en Erbium, qui fonctionne dans une fenêtre à faible atténuation autour de 1550 nm dans le cas de dopage à 980 nm. La première partie de ce chapitre a déterminé l'équation d'évolution des densités volumiques des populations, ainsi nous avons défini le gain du signal, les expressions de la puissance et le facteur de bruit, dans la seconde partie nous avons opté pour une simulation d'une fibre optique amplificatrice dopée en erbium tout en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink., cette simulation nous a permis de montrer les différentes variations du gain en fonction de la puissance de la pompe et la longueur de la fibre dopée, l'évolution du facteur de bruit (Noise figure) ainsi que la puissance spontanée amplifiée (ASE). Elle nous a également permis de déduire que plus la longueur de la fibre amplifiée est grande plus le gain est meilleur, et que le gain atteint la saturation quand la puissance de la pompe devient suffisamment forte et ceci indépendamment de la longueur de la fibre dopée.

En fin, on conclut que le facteur de bruit varie linéairement avec la puissance ASE, et inversement avec le gain de notre amplificateur optique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Les progrès réalisés dans le domaine des télécommunications sont tellement importants et rapides, que les structures des systèmes de transmission connaissent de véritables bouleversements.

Notre étude a pour but d'aboutir à une meilleure compréhension du système dopé par des ions d'erbium (Er^{+3}) en vue d'améliorer les amplificateurs optiques utilisés dans les télécommunications. Pour cela, nous avons abordé trois volets qui nous ont parus nécessaires : les liaisons en fibres optiques, Principe de l'amplification par fibre optique dopée à l'Erbium, modélisation d'une fibre optique dopée Erbium.

Nous avons utilisé un modèle théorique d'amplification dans une fibre optique dopée Erbium. Ce modèle, est basé sur des équations d'évolution des populations des niveaux électroniques des dopants.

Pour résoudre le système d'équation de ce modèle, nous avons effectué la résolution des systèmes d'équation sous MATLAB/ Simulink

Nous avons commencé notre travail par une étude théorique sur la fibre optique qui nous a permis de décrire sa fabrication, ces différents types, ainsi que les causes de son atténuation. Nous avons aussi mis en évidence les pertes causées par cette dernière en terminant par citer quelques applications. En outre ce chapitre nous a permis de dresser les principes théoriques de fonctionnement d'une liaison en fibre optique.

A travers le second chapitre 2, nous avons présenté le principe des amplificateurs optiques ainsi que leurs différents types, et nous avons mis en avant les propriétés des amplificateurs dopés Erbium, qui assure une transmission des signaux avec de meilleures performances.

Et pour finir nous avons développé un modèle de simulation sur Matlab/ Simulink qui nous a permis de : vérifier la validité de nos résultats théoriques, en nous offrant des résultats de simulation graphiques ainsi que d'effectuer une série de simulation toute agissant sur des facteurs de liaison optique comme la longueur de la fibre, la puissance du signal ainsi que la puissance de la pompe cette simulation nous a permis donc de montrer les différentes variations du gain en fonction de la puissance de la pompe et la longueur de la fibre dopée, l'évolution du facteur de bruit (Noise figure) ainsi que la puissance spontanée amplifiée (ASE). Nous avons également démontré que le facteur de bruit varie linéairement avec la puissance ASE, et inversement avec le gain de notre amplificateur optique.

Conclusion générale

En perspectives, il serait intéressant d'installer un filtre qui possède une certaine fonction de transfert permettant d'obtenir la meilleure platitude du gain sur la bande d'amplification.

Ce modeste travail, nous a permis d'acquérir un savoir tant technique que théorique dans le domaine étudié, nous espérons qu'il servira tout individu intéressé par ce domaine.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] GHOUMAZI Mehdi. Optimisation des performances d'une fibre optique dopée à l'erbium. UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2009.
- [2] HUYGHE Sarah. Fiabilité des amplificateurs optiques à semi-conducteur 1,55 μm pour des applications de télécommunications : Etude expérimentale et modélisation physique, L'UNIVERSITE BORDEAUX 1, 2005.
- [3] SAIDI Riadh. Etude d'une structure de liaison en fibre optique. Université de BISKRA, 2009.
- [4] VERNEUIL Jean-Luis. Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s. Université de LIMOGES, 2003.
- [5] KHALEGHI Hamidreza Influence des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sur la transmission cohérente de signaux optiques à format de modulation multi-porteur (CO-OFDM). ÉCOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE BREST, 2012.
- [6] AOUDIA Hakim. Modélisation et optimisation des paramètres d'une liaison de télécommunication optique. UNIVERSITE A.MIRA BEJAIA, 2017.
- [7] BENAMEUR Sarah. La mise en œuvre dans chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable. Université DJILALI LIABES, SIDI BEL-ABBES, 2015.
- [8] SHIVA Kumer. Fiber optic communications fondamentales and applications, 2014, Edition WELEY.
- [9] BOUBIR Badreddine. Etude et optimisation des différents paramètres d'un amplificateur à fibre optique dopée avec des ions de terres rares. BADJI MOKHTAR ANNABA, 2009
- [10] PAUL L.KELLY, IVAN KAMINOW, GOVIND AGRAWAL, ET all 'Erbium-Doped Fiber Amplifier' 1999, Edition AP.
- [11] MOULOUA Rafik. Étude d'une liaison de télécommunication à base d'une fibre optique dopée en erbium. UNIVERSITE A.MIRA DE BEJAIA, 2013.

Références bibliographiques

- [12] LOCOY Pierre. Principes et technologies des télécoms, 2005, Edition DUNOD.
- [13] LEGRAND Anne. Etude des amplificateurs paramétriques à fibre optique pour leur utilisation pour les systèmes de transmission optiques Haut débit multiplexes en longueur d'onde. Université de LIMOGES, 2005.
- [14] FRANÇOIS P.L, Bayon J.F et ALARDE. Caractérisation procedure of fiber pachaking relative tomicobends, 1985.
- [15] BRAHIMI Houda. Étude en bruit de system optique hyper fréquence. UNIVERSITE PAUL DABATIER-TOULOUSE 3, 2011.
- [16] KOESTER, C. J.; SNITZER, E. A. "Amplification in a fiber laser", Applied Optics, Vol .3, N10,pp1182, 1964.
- [17] OHISHI, Y.; Mori, A.; Yamada, M.; ONO, H.; NISHIDA, Y. et OIKAWA, K. Gain "characteristics of telluride-based erbium-doped fiber amplifiers for 1.5 mm broadband amplification", Optics Letters, Vol. 23,N4, pp 274-276, 1998.
- [18] YAMADA, M.; SHIMIZU, M.; YOSHINAGA, H.; KIKUSHIMA, K.; KANAMORI, T.; OHISHI, Y.; OIKAWA, K. et SUDO, S. "Low noise Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifler", IEEE Electronics Letters, Vol. 31, pp 806-807, 1995.
- [19] Léonard Gagné-Godbout. Modélisation, fabrication et caractérisation d'un amplificateur à fibre optique à sept cœurs dopés à l'erbium. UNIVERSITE DE LAVAL, 2014.
- [20] MAURY Julien. Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique. UNIVERSITE DE LIMOGES, 2003.
- [21] BLANDINE Tortech. Effets des radiations sur les fibres optiques dopées erbium : influence de la composition. UNIVERSITE DE JEAN MONNET DE SAINT-ETIENNE, 2008.
- [22] PERETTI Romain. Saturation spectrale de gain dans les amplificateurs à fibres dopées erbium : Largeurs homogène et inhomogène et approche des nanomatériaux. UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON, 2009.

Références bibliographiques

- [23] DESURVIRE Emmanuel and N ZERVAS Michael. Erbium-doped amplifiers principles and application, 1995.
- [24] SANJEEV Kumar, RAGHU Wanshi REENA Sharma, Modeling of forward pump EDFA under pump power through MATLAB, INT NANO LETT, 5:155-160 DOI 10.1007/s40089-015-0149-4, 2015.
- [25] NOVAK Stephanie and MOESLE Adolph. Analytic Model for Gain Modulation in EDFAs, JOURNAL OF KIGHTWAVE TECHNOLOGIE, Vol. 20, N0. 6, 2002.
- [26] HANNA Ali. Les amplificateurs optiques. UNIVERSITÉ IBN-ZOHR AGADIR.2015.

Résumé

Les communications par fibres optiques actuelles sont caractérisées par une demande croissante en termes de capacités de transmission.

Ce présent travail porte sur l'étude d'un amplificateur à fibres dopées en Erbium qui est basé sur des équations dévolution de population modélisé grâce à une simulation sous Matlab/ Simulink, qui prouve que le gain de cet amplificateur est affecté par certains paramètres tels que la longueur de la fibre, la puissance de la pompe et la densité des ions Erbium.

Abstract

Current fiber optic communications are characterized by increasing demand in terms of transmission capacity.

The present work focuses on the study of a doped fiber amplifier Erbium which is based on population devolution equations modeled through a simulation in Matlab / Simulink, which proves that the gain of the amplifier is affected by certain parameters such that fiber length, pump power and density of Erbium ions.

ملخص

تتميز اتصالات الألياف الضوئية الحالية بزيادة الطلب من حيث سعة الإرسال. يركز هذا العمل على دراسة مضخم الألياف المضاعف بالاربيوم الذي يعتمد على المعادلات الانتقالية التي تم تصميمها من خلال محاكاة في Matlab / Simulink، والتي تثبت أن مكاسب المضخم تتأثر بمعلمات معينة مثل طول الألياف، قوة المضخة وكثافة أيونات الإربيوم.