

*Ministère de l'enseignement supérieur et de
La recherche scientifique*

Université de Bejaia - Abderrahmane Mira-

Faculté de technologie, Département de

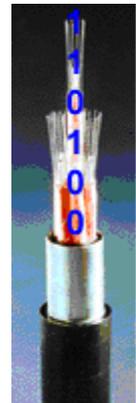
« Génie électrique »

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en

Télécommunication

Thème :

*Etude d'une liaison de télécommunication à base d'une
fibre optique dopée en erbium*



Présenté par :

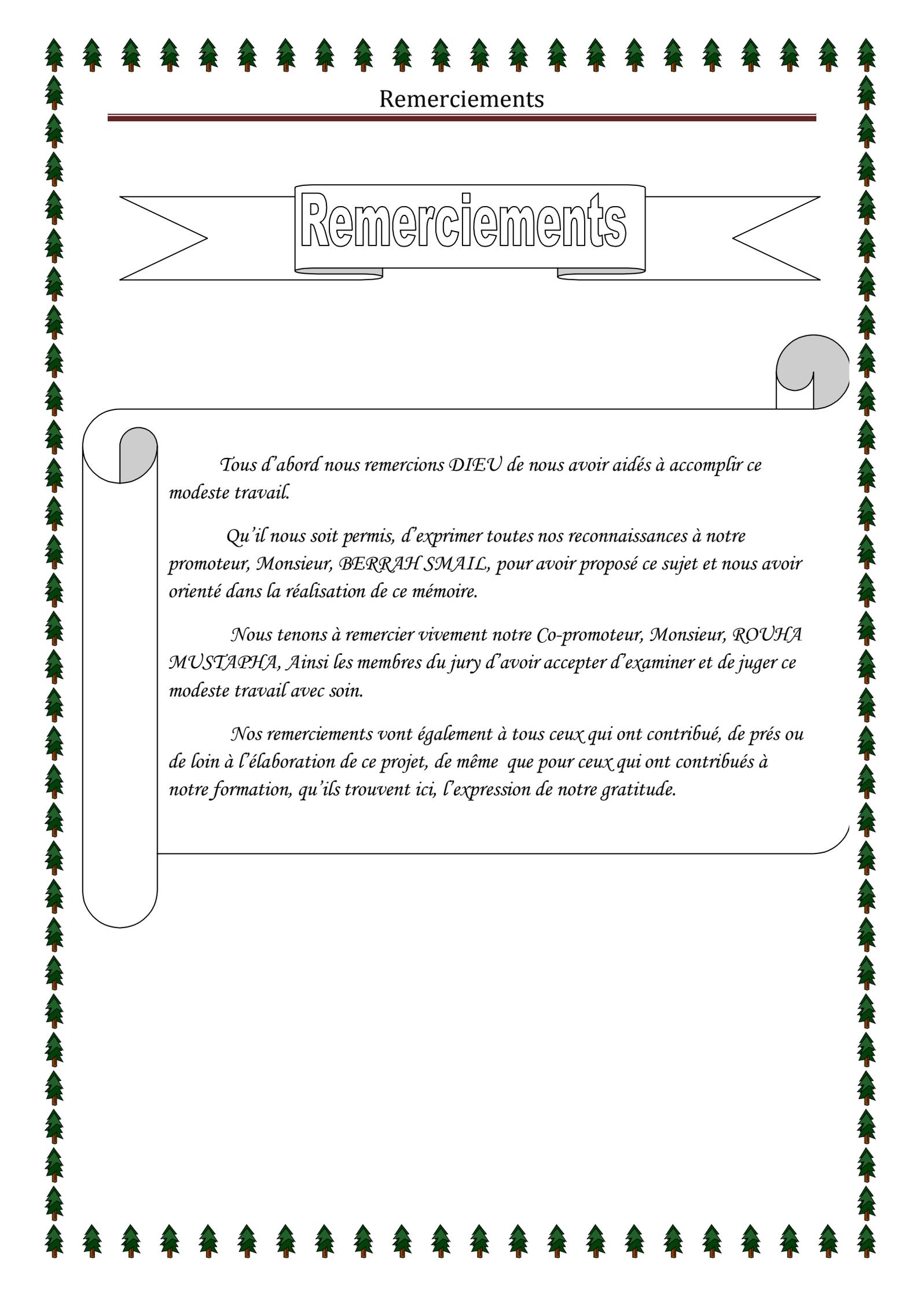
M^r Mouloua Rafik

Encadré par :

M^r Berrah. Smail

M^r Rouha. Mustapha

« Juin 2013 »



Remerciements



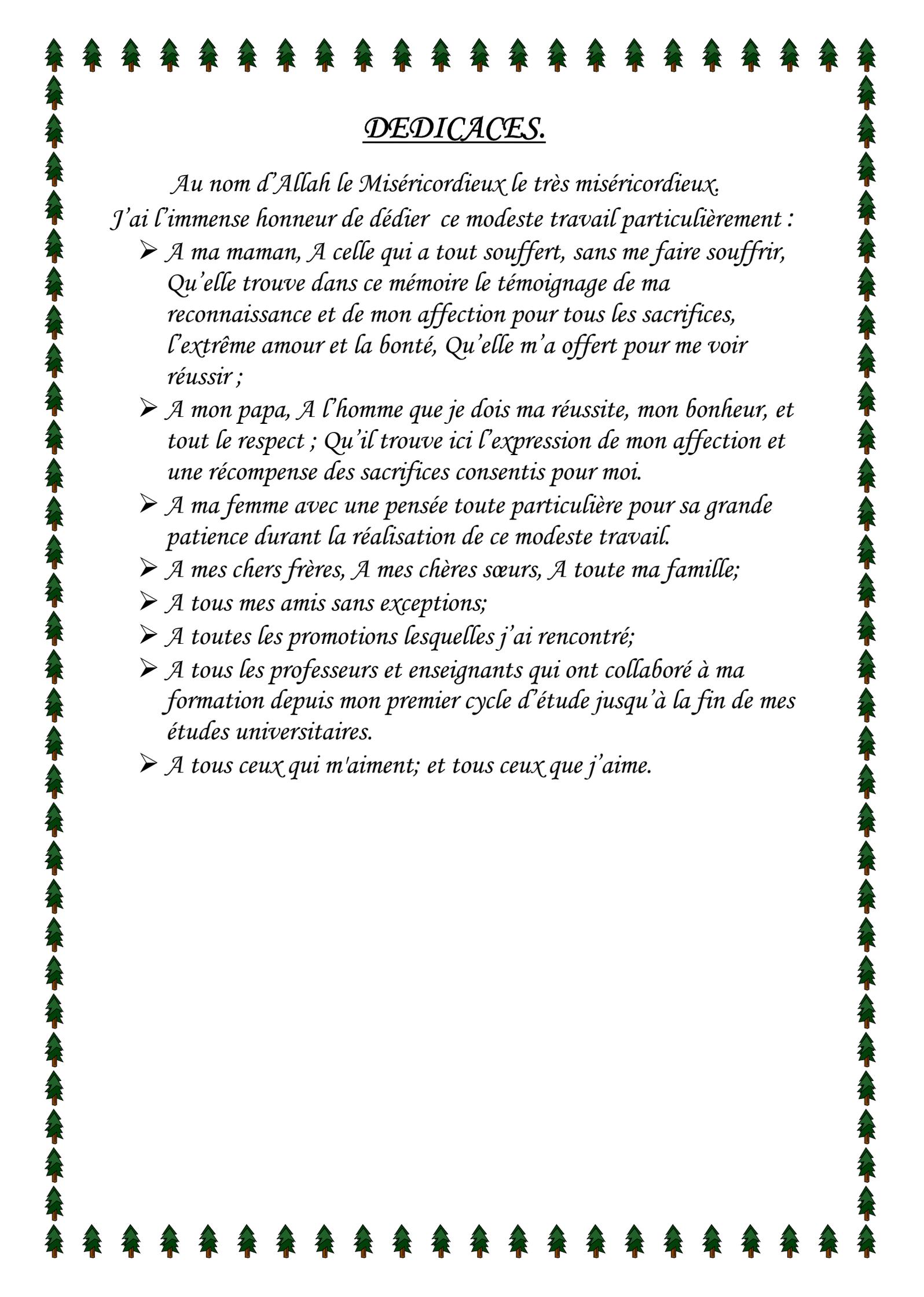
Remerciements

Tous d'abord nous remercions DIEU de nous avoir aidés à accomplir ce modeste travail.

Qu'il nous soit permis, d'exprimer toutes nos reconnaissances à notre promoteur, Monsieur, BERRAH SMAIL, pour avoir proposé ce sujet et nous avoir orienté dans la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier vivement notre Co-promoteur, Monsieur, ROUHA MUSTAPHA, Ainsi les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et de juger ce modeste travail avec soin.

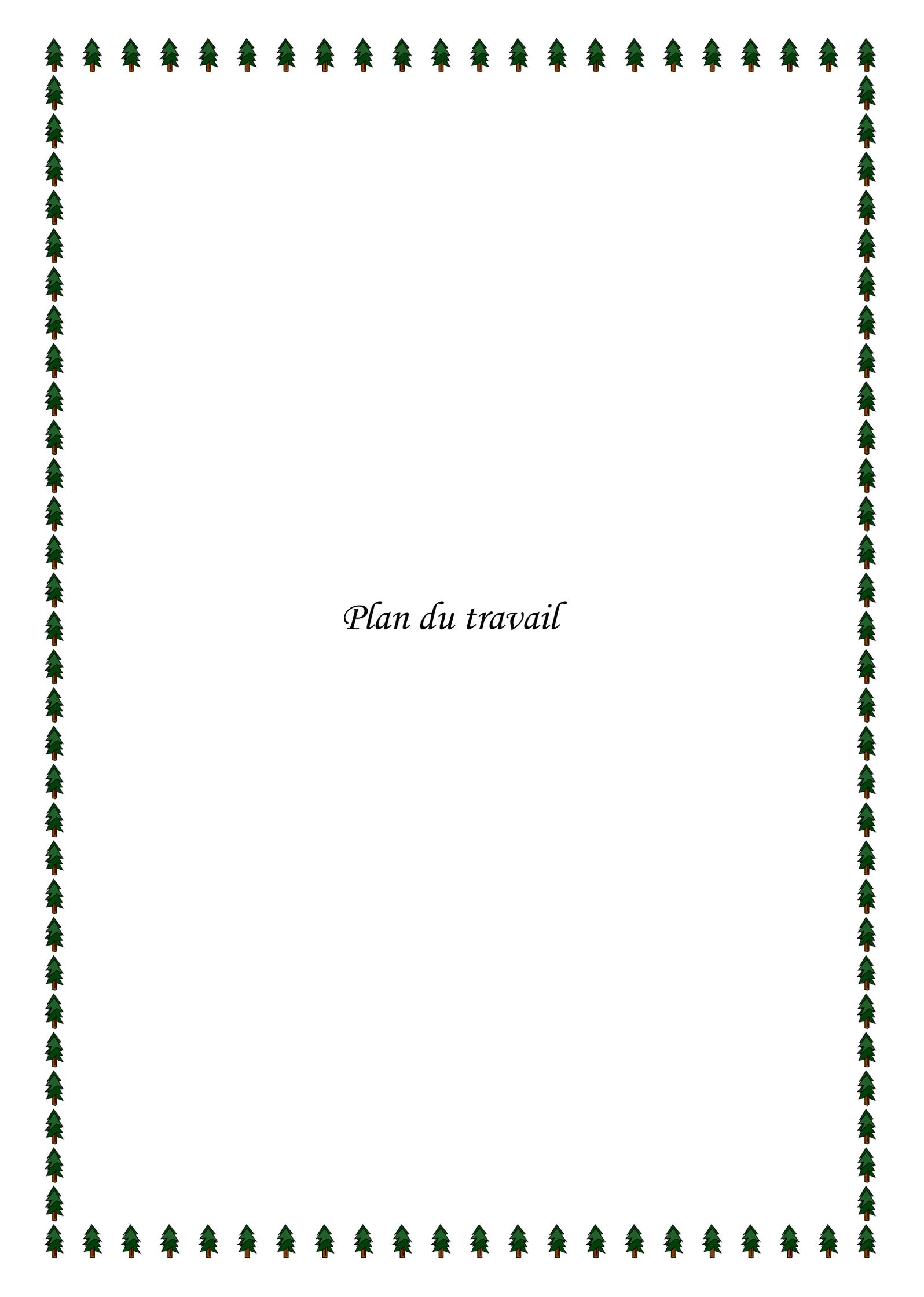
Nos remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce projet, de même que pour ceux qui ont contribué à notre formation, qu'ils trouvent ici, l'expression de notre gratitude.



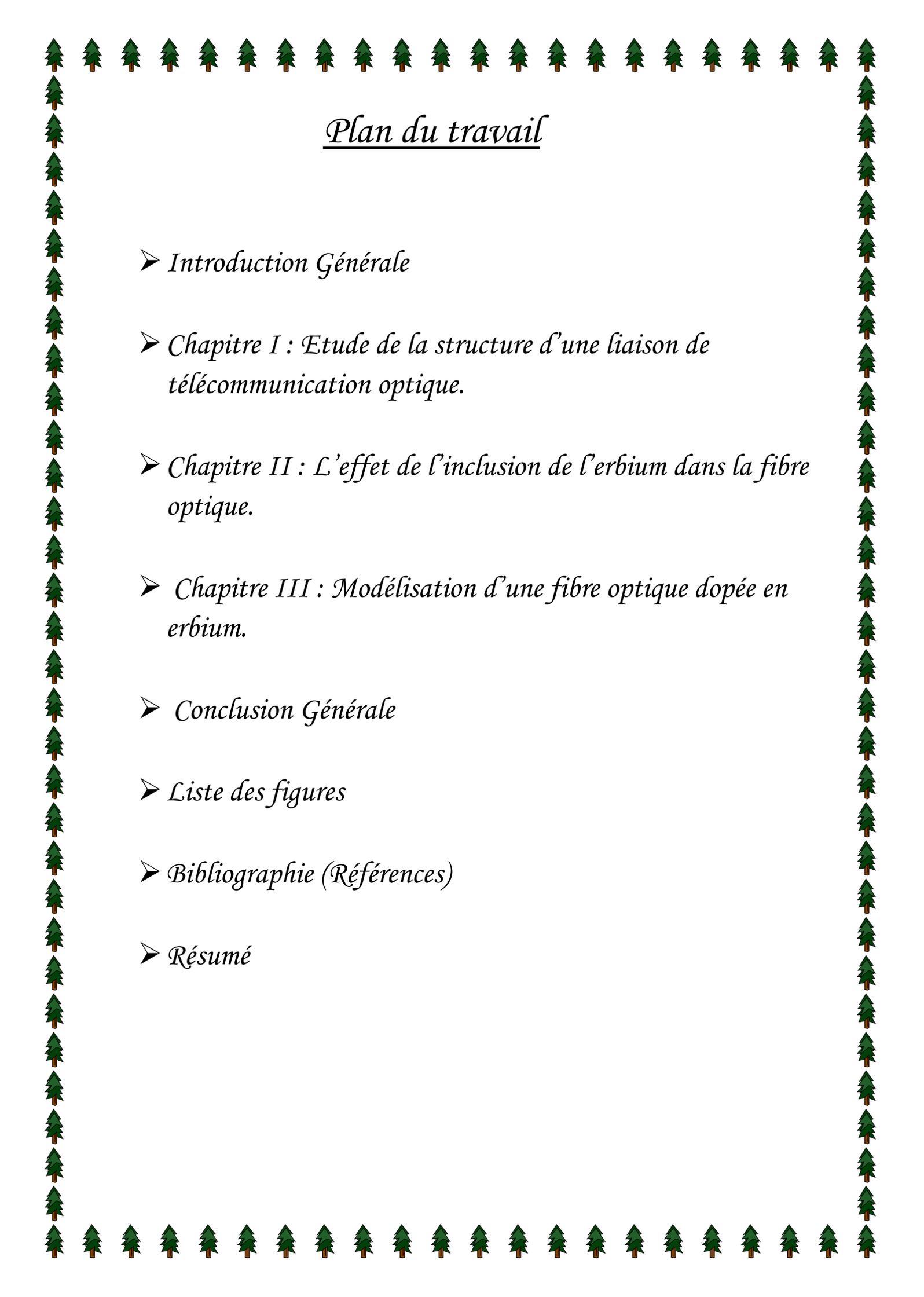
DEDICACES.

*Au nom d'Allah le Miséricordieux le très miséricordieux,
J'ai l'immense honneur de dédier ce modeste travail particulièrement :*

- *A ma maman, A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, Qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté, Qu'elle m'a offert pour me voir réussir ;*
- *A mon papa, A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ; Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi.*
- *A ma femme avec une pensée toute particulière pour sa grande patience durant la réalisation de ce modeste travail.*
- *A mes chers frères, A mes chères sœurs, A toute ma famille;*
- *A tous mes amis sans exceptions;*
- *A toutes les promotions lesquelles j'ai rencontré;*
- *A tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation depuis mon premier cycle d'étude jusqu'à la fin de mes études universitaires.*
- *A tous ceux qui m'aiment; et tous ceux que j'aime.*

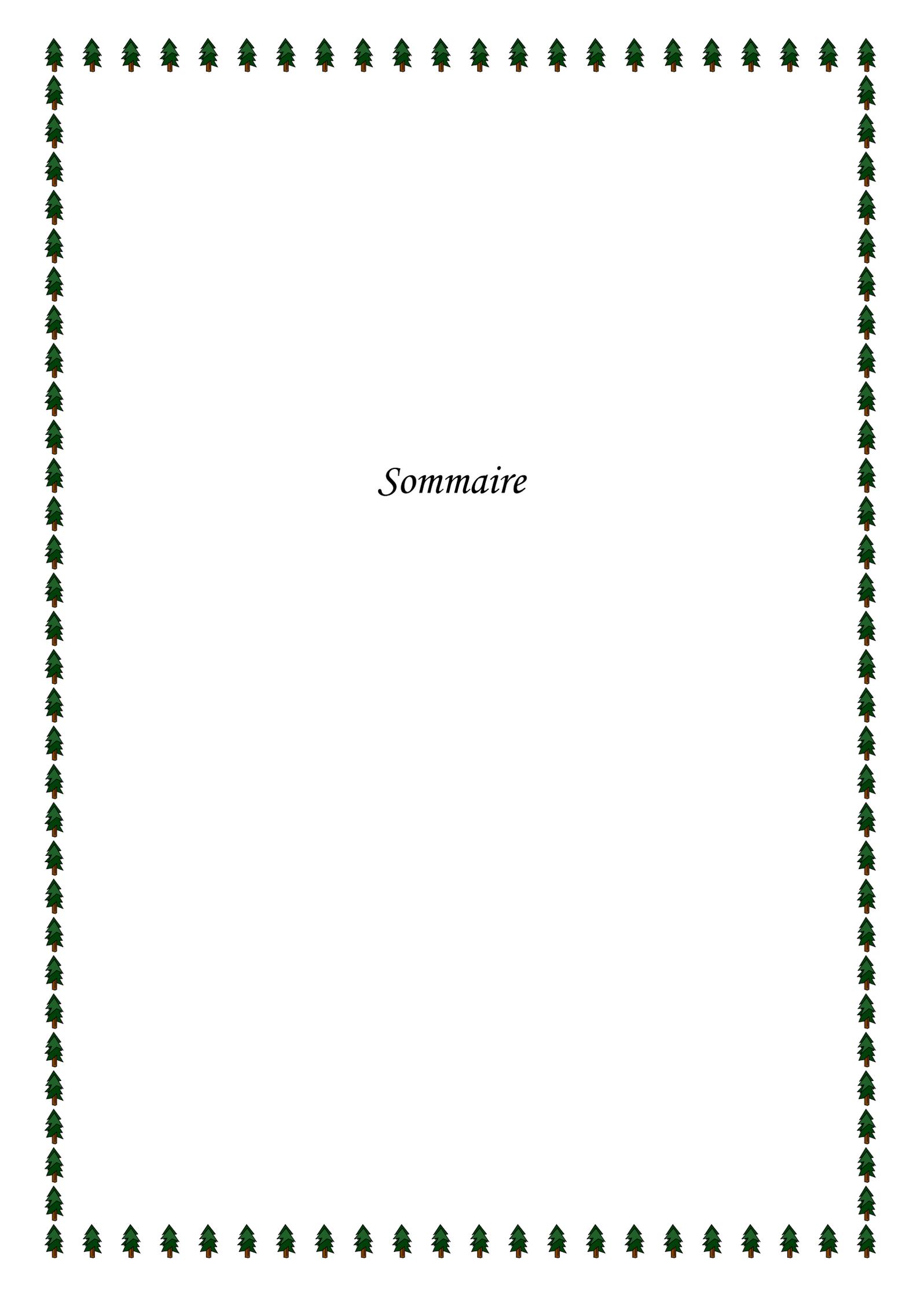


Plan du travail



Plan du travail

- *Introduction Générale*
- *Chapitre I : Etude de la structure d'une liaison de télécommunication optique.*
- *Chapitre II : L'effet de l'inclusion de l'erbium dans la fibre optique.*
- *Chapitre III : Modélisation d'une fibre optique dopée en erbium.*
- *Conclusion Générale*
- *Liste des figures*
- *Bibliographie (Références)*
- *Résumé*



Sommaire

Sommaire

➤ Introduction Générale	01
--------------------------------------	----

Chapitre I : Etude de la structure d'une liaison de télécommunication optique

I. Liaison optique	03
I.1. Introduction.....	03
I.2 Émetteur optique.....	03
I.2.1 Sources optiques.....	03
I.2.1.1 Source (DL) diode laser.....	03
I.2.1.2 Source (DEL) diode électroluminescente.....	05
I.3 Support de transmission.....	06
I.3.1 Introduction.....	06
I.3.2 Structure Générale	06
I.3.3 Avantages des fibres optiques.....	07
I.3.4 Domaine d'utilisation.....	07
I.3.5 Caractéristiques d'une fibre optique	08
I.3.5.1 Généralités.....	08
I.3.5.2 Indice optique d'un milieu isolant et transparent (indice de réfraction).....	09
I.3.5.3 Le rôle de chaque constituant dans une fibre optique.....	10
I.3.5.4 Ouverture numérique d'une fibre optique	10
I.3.6 Différents types de fibres optiques.....	11
I.3.6.1 Fibre optique multimodal à saut d'indice.....	12
I.3.6.2 Fibre optique multimodal à gradient d'indice	13
I.3.6.3 Fibre optique monomode.....	14
I.3.7 Autres caractéristiques.....	14
I.3.7.1 Les pertes de la fibre optique.....	14
I.3.7.1.1 Introduction.....	14
I.3.7.1.2 L'atténuation.....	14
I.3.7.1.3 La dispersion.....	17
I.3.7.1.3.1 Introduction.....	17
I.3.7.1.3.2 Amplificateur optique.....	18
I.3.7.1.3.3 Amplificateur électronique.....	18
I.3.7.1.3.4 Amplificateur à fibre optique dopée	18
I.4 Récepteur optique.....	19
I.4.1 Introduction.....	19
I.4.2 les types de photo-détecteurs.....	19
I.5 Conclusion.....	21

Chapitre II : Effet de l'inclusion de l'erbium dans la fibre optique

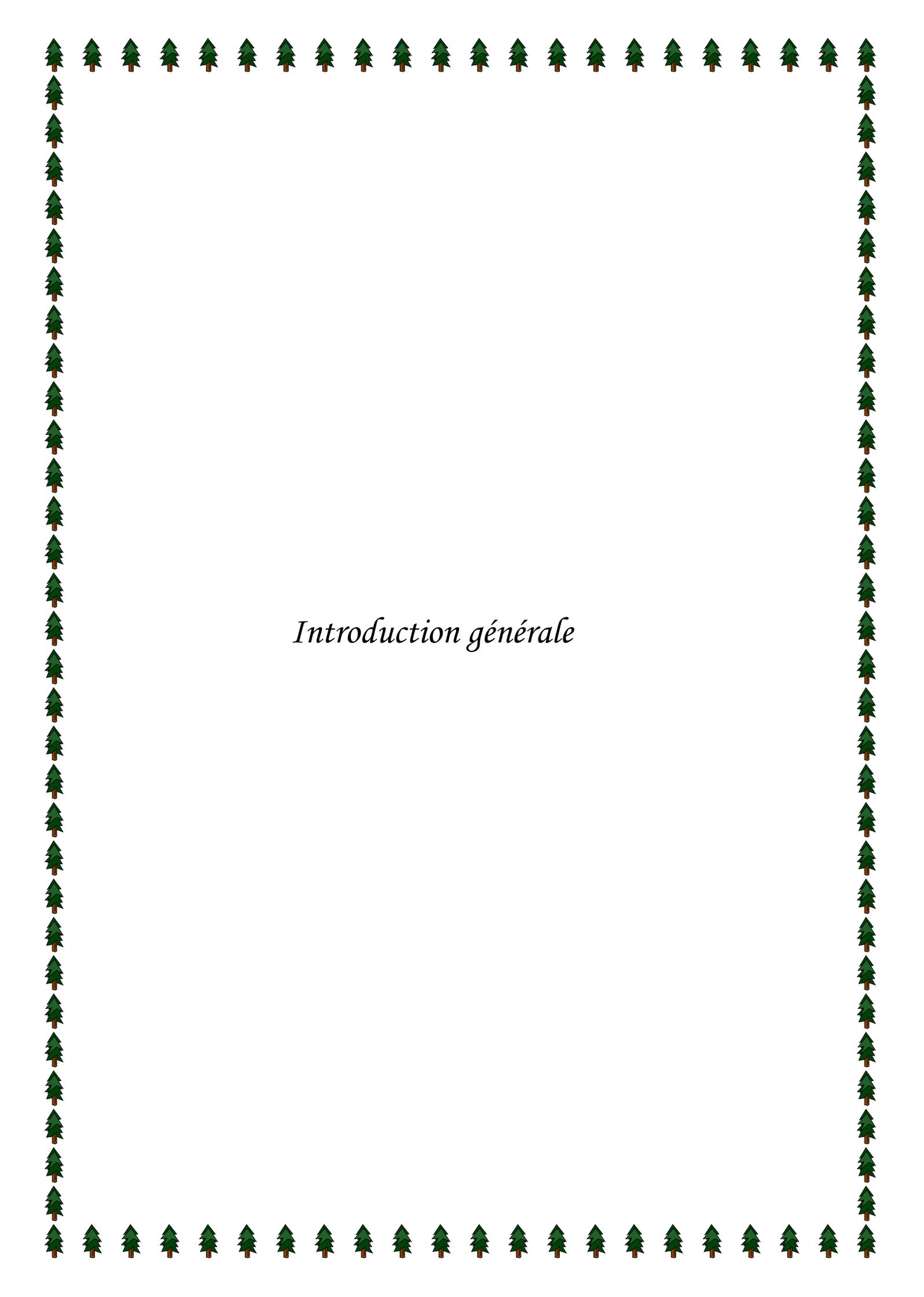
I. Introduction.....	22
II. Fabrication des fibres optiques.....	22
II.1 Principe.....	22

II.2 Dopage aux terres rares (erbium) en phase liquide.....	22
II.3 La Structure vitreuse des fibres optiques standard.....	23
III. Les ions de terres rares.....	24
III.1 L'ion erbium.....	25
III.2 Les transitions électroniques.....	25
III.3 Principes physiques.....	25
III.3.1 L'absorption.....	25
III.3.2 Émissions spontanée et stimulée.....	26
IV. Principe de l'amplification optique.....	27
V. Effets de l'inclusion de l'erbium dans la fibre optique.....	28
V.1 Introduction.....	28
V.2 Principe.....	28
V.3 Comportement spectral des fibres optiques dopées à l'erbium.....	28
V.4 Effet Stark.....	29
V.5 Élargissement homogène.....	30
V.6 Élargissement inhomogène.....	30
V.7 Conclusion.....	30
VI. Caractéristique d'un amplificateur optique.....	31
VI.1 Différent types de pompage optique.....	31
VI.2 Conclusion.....	34

Chapitre 3 : Modélisation d'une fibre optique dopée en erbium

I. Introduction.....	35
II. Equations d'évolutions.....	35
III. Equations d'évolution des densités volumiques de population.....	37
IV. Caractéristiques de la fibre amplificatrice dopée en erbium.....	37
IV.1. Gain de la fibre amplificatrice dopée en erbium et la puissance de saturation.....	37
IV.2. Bruit dans la fibre amplificatrice dopée en erbium.....	38
IV.3. Durée de vie des niveaux d'énergie de l'erbium.....	39
IV.4. La fluorescence.....	39
V. Simulation de la fibre optique amplificatrice dopée en erbium.....	40
V.1. Résultats Et Interprétation.....	41
V.2. Variation du gain en fonction de la puissance de la pompe $G = f(P_p)$	42
V.3. Variation de la puissance de sortie dans la fibre dopée en fonction de la pompe.....	42
V.4. Variation de l'intensité de la fluorescence en fonction du temps.....	43
VI. Exemple d'application d'un tronçon de fibre optique dopée en erbium.....	44
VI.1. Influence de la distance.....	44
VI.2. Processus d'amplification dans un tronçon de fibre dopée en erbium.....	45
VI.3. Résultats et interprétations.....	45
VI.4. L'atténuation de la puissance de signal d'entrée.....	45
VI.5. Effet de la fibre dopée en erbium sur la puissance atténuée.....	46
VI.6. La restitution de la puissance originale en sortie de la fibre ordinaire.....	47
VII. Conclusion.....	48

VIII. Etude d'une liaison optique à base d'une fibre optique dopée en erbium sous le simulateur COMSIS (communication system interactive software)	48
VIII.1 présentation du logiciel COMSIS.....	48
A. Interface COMSIS.....	48
A.1. La fenêtre principale.....	48
B. La fenêtre alphanumérique.....	49
C. La bibliothèque.....	50
D. Les différents types d'analyse.....	50
D.1. L'analyse statique.....	51
D.2. L'analyse de stabilité.....	51
D.3. L'analyse de transfert de boucle.....	51
D.4. La réponse fréquentielle.....	51
D.5. La simulation temporelle.....	51
VIII.2. La visualisation et le traitement des résultats.....	51
VIII.3. Etude d'une chaîne de base pour transmission optique à fibre dopée erbium.....	53
VIII.4. Caractéristiques des éléments de la liaison optique point à point à fibre dopée	54
IX. Caractéristiques statiques de l'EDFA : exemple à partir du logiciel COMSIS.....	56
IX.1. Evolution du gain en fonction de la longueur d'onde.....	56
IX.2. Variation du gain $G=f(P_p)_L$	57
IX.3. Variation de $Pase = f(\lambda)_{Pin}$	58
IX.4. Variation $P_{out}=f(P_{in})_L$	58
IX.5. Variations de $\sigma_e = f(\lambda)$ et de $\sigma_a = f(\lambda)$	59
IX.6. Variation du gain en fonction de la puissance d'entrée du signal P_{in}	60
IX.7. Variation du gain en fonction de la puissance de sortie du signal P_{out}	61
X. Conclusion.....	62
➤ Conclusion Générale.....	63
➤ Liste des figures	
➤ Bibliographie	



Introduction générale

Introduction Générale

La communication peut être définie comme étant un transfert d'information entre deux points. Le but technique recherché est de toujours avoir la meilleure qualité du signal, la plus grande capacité ainsi que la plus grande portée.

Les premières communications optiques sont connues depuis des siècles et sont apparues sous formes de communications utilisant des signaux de fumée, des miroirs ou bien des signaux lumineux. Tous ces moyens de communications avaient une capacité très limitée et une portée relativement faible dépendante énormément des conditions atmosphériques.

En 1966, KAO a réalisé le premier support pour ondes optiques (fibre optique) afin de remplacer le câble coaxial comme support de transmission. La structure réalisée, à base de verre fonctionnait autour de 0.85 μm et avait une atténuation supérieure à 1000dB/km, sachant que l'atténuation au niveau du câble coaxial entre 5 et 10 dB/km.

Dix ans après, les pertes ont été réduites jusqu'à 5dB/km (pertes comparables à celles du câble coaxial). L'amélioration de la qualité de la fibre et de la connectique a permis de réaliser des fibres ayant une atténuation inférieure à 0.5 dB/km. En parallèle, avec le développement de la fibre optique, l'attention s'est focalisée sur les composants optiques et la recherche d'autres longueurs d'ondes de travail.

L'apparition des amplificateurs tout optique a permis de s'affranchir des systèmes électroniques dans les lignes de transmission par fibre et a été à l'origine d'une augmentation croissante des débits de transmission des informations dans un seul guide, conduisant à l'établissement de records en laboratoire de l'ordre de la dizaine de Tbits/s sur plusieurs milliers de kilomètres.

L'un des composants clé des amplificateurs optiques est un simple tronçon de fibre d'une dizaine de mètres de longueur dont le cœur est dopé aux terres rares. Pour l'amplification de signaux dans la troisième fenêtre de transparence de la silice (faible atténuation de la silice entre 1530nm et 1560nm), c'est l'ion erbium qui est utilisé, il présente une transition radiative amplificatrice autour de la longueur d'onde de 1550nm.

Cette transition peut être obtenue de façon efficace, notamment lorsque l'erbium est excité par un rayonnement à 980nm. Il suffit donc de pomper les ions erbium de la fibre avec une onde continue, puissante, à 980nm, et d'injecter simultanément dans la fibre le signal à une longueur d'onde de 1550nm pour que l'opération de pompage réalise l'inversion de population des ions erbium, la désexcitation stimulée de ces ions par le signal aura donc pour effet une amplification de celui-ci.

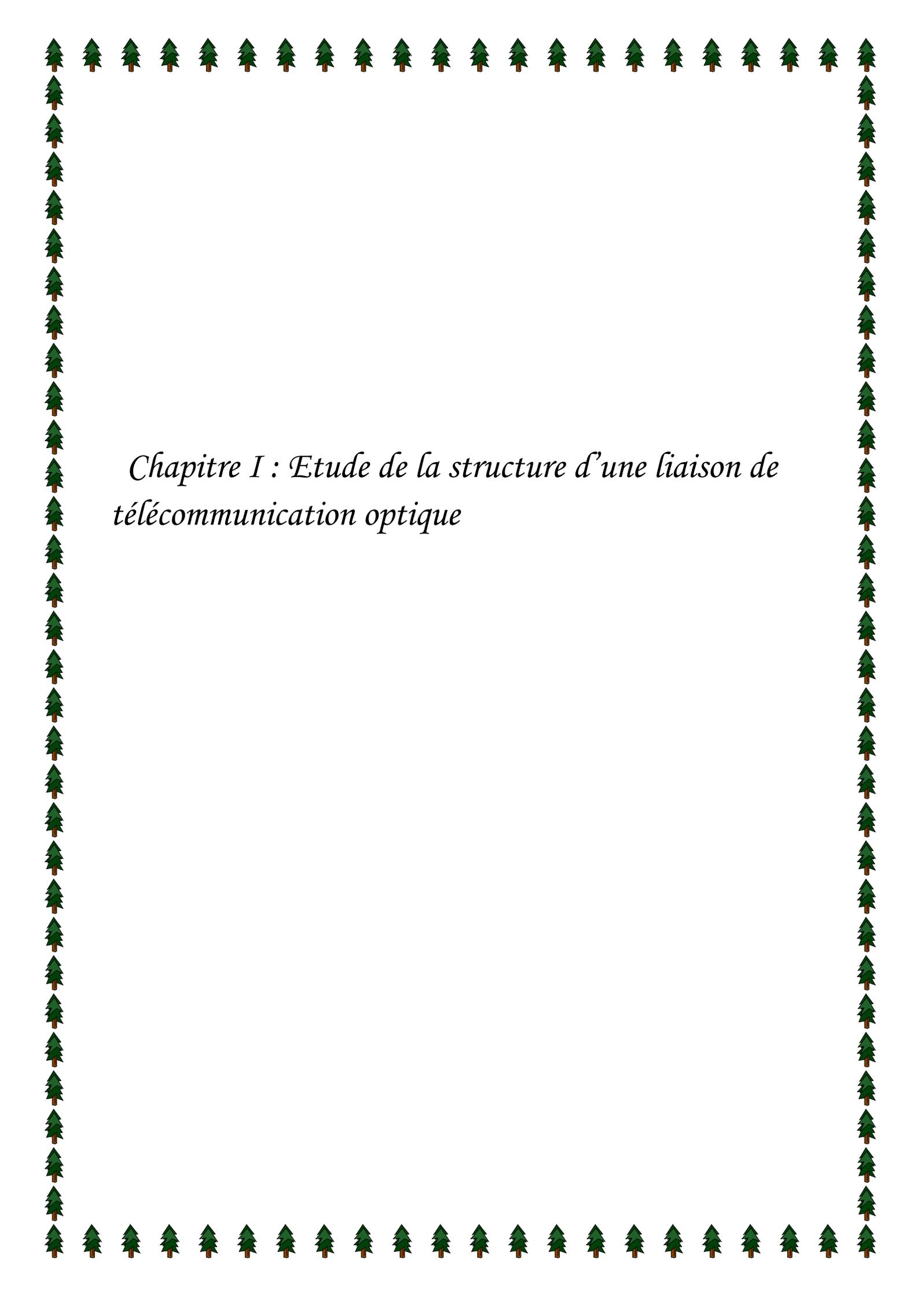
Notre travail est basé sur l'étude d'une liaison de télécommunication à base d'une fibre optique dopée en erbium en particulier la longueur de la fibre dopée et la concentration de l'erbium ainsi que la puissance de la pompe, utilisées pour obtenir le meilleur gain.

Nous débuterons ce manuscrit par décrire la description générale d'une liaison optique à base d'une fibre optique ordinaire et les différents types de la fibre, Nous aborderons de même, Le phénomène de l'atténuation et les différentes pertes causées par une fibre optique. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous parlerons de l'application et des avantages de la fibre optique.

Dans le deuxième chapitre on abordera les mécanismes de relaxation, les transitions radiatives et les transitions non radiatives, ainsi que l'environnement des ions Er dans la fibre optique. Nous allons aussi exposer les principes de l'amplification optique, et nous terminons par donner le principe d'un système d'amplification à trois niveaux, crée par le dopage d'une matrice de silicate par des ions d'erbium.

Dans le dernier chapitre, nous présentons le modèle utilisé dans notre travail sous MATLAB. Pour décrire l'évolution du gain en fonction de la puissance de la pompe pour différentes longueur de la fibre dopée, et la variation de la puissance de sortie en fonction de la pompe pour différentes valeurs de puissances d'entrée ainsi l'intensité de la fluorescence en fonction du temps. Comme à l'aide d'un simulateur numérique COMSIS (communication system Interactive software) on a pu voir l'influence de la longueur d'onde du signal et de la pompe sur le gain et sur la puissance d'émission spontanée amplifiée.

Une conclusion de notre travail est présentée en dernier.



*Chapitre I : Etude de la structure d'une liaison de
télécommunication optique*

I. Liaison optique

I.1 Introduction

Généralement, une chaîne de transmission optique est composée de 3 éléments principaux : un émetteur optique, un canal de transmission et un récepteur optique. La fibre optique est le canal utilisé par excellence pour les transmissions optiques.

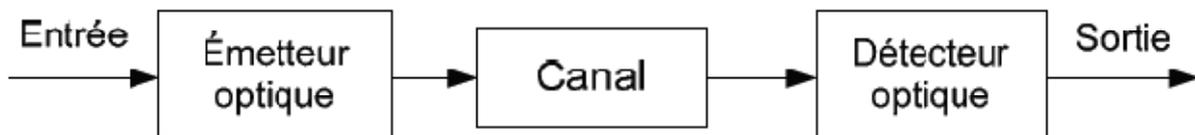


Figure (I.1) liaison optique [1].

I.2 Émetteur optique

La partie émission d'une liaison optique est composée de divers éléments : (Alimentation-Source optique-Modulateur) Son rôle principal est de délivrer au support de Transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données.

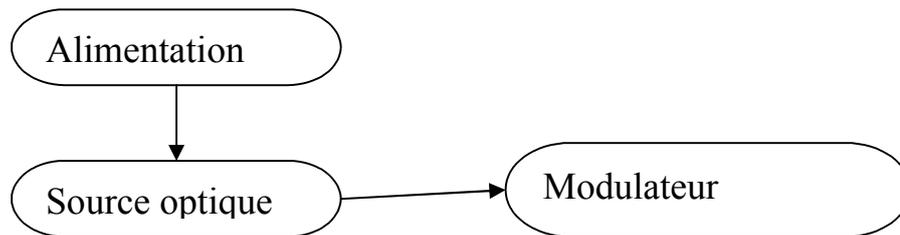


Figure (I.2) structure d'un émetteur optique.

I.2.1 Sources optiques

Les sources optiques, sont des composants actifs dans le domaine de la communication par fibre optique. Leurs fonctions fondamentales, sont de convertir une énergie électrique en une énergie optique (conversion électro-optique) avec un rendement satisfaisant et assurer un bon couplage avec la fibre. Principalement peuvent être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (LD).

I.2.1.1 Diode laser (DL)

Aujourd'hui, les diodes Laser sont les seules sources lumineuses, utilisées dans les réseaux de transmission optique haut débit à grandes distances. Utilisant l'émission stimulée, c'est-à-dire qu'un photon incident peut provoquer la désexcitation d'un électron et entraîner l'émission d'un autre photon de même phase. Ces deux photons peuvent à leur tour déclencher d'autres émissions

synchrones et provoquer un effet d'avalanche. Le mot laser, sigle de l'expression anglaise « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation », signifie amplification de la lumière par émission Stimulée de rayonnement.

Un laser est un oscillateur composé d'un milieu amplificateur (A) et d'une boucle de Contre-réaction (CR).

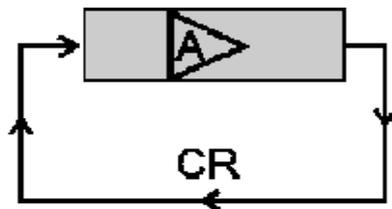


Figure (I.3) Structure d'un laser [22].

La diode laser présente les caractéristiques suivantes :

- Intense.
- Unidirectionnelle.
- Monochromatique.
- Cohérente.
- Largeur de spectre étroite (figure I.4).

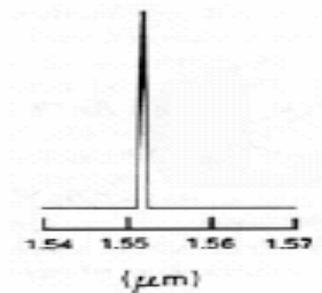


Figure (I.4) spectre d'émission d'une diode laser [22].

*Principe de l'émission stimulée

Un atome dans l'état excité frappé par un photon, peut retomber dans l'état fondamental en émettant un autre photon. Il s'agit d'une émission stimulée.

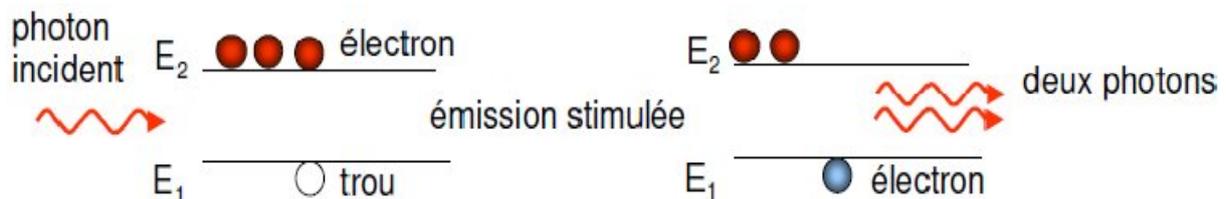


Figure (I.5) l'émission stimulée d'un photon.

Le laser émet une lumière cohérente par l'émission stimulée.

I.2.1.2 Diode (LED)

C'est le composant le plus simple, qui réalise directement l'émission de photons par recombinaison des porteurs dans une hétérojonction polarisée en directe.

On réalise une jonction P-N, On fait circuler le courant dans la jonction, dans la direction directe, de sorte que les électrons ou les trous qui constituent les porteurs majoritaires soient injectés dans le voisinage de la jonction et qu'une luminescence ait lieu grâce à la recombinaison de ces porteurs.

La diode (LED) représente les caractéristiques suivantes :

- La diode LED est une source poly-chromatique et incohérente.
- Le spectre est assez large (figure I.6).
- Le diagramme de rayonnement est moins directif.
- Utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de grande bande passante.
- Utilisée dans les télécommunications optiques (faible distance).

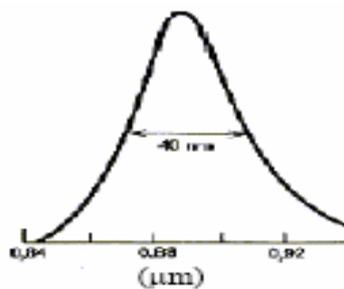


Figure (I.6) spectre d'émission DEL [22].

*Principe d'émission spontanée

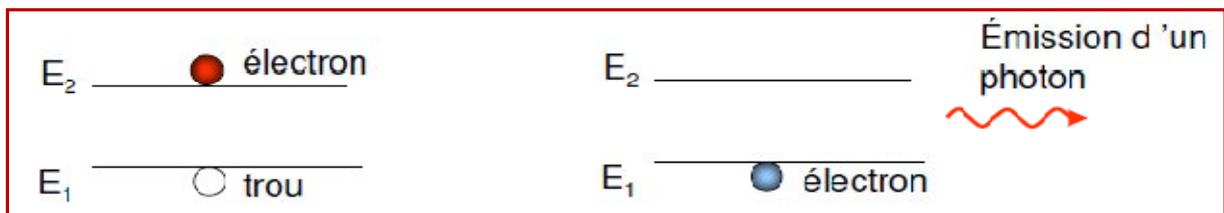


Figure (I.7) l'émission spontanée d'un photon.

L'énergie du photon émis est : $E = E_2 - E_1 = h\nu$, avec h constante de Planck et ν fréquence de la radiation émise.

Les DEL émettent une lumière incohérente par Émission spontanée.

I.3.Support de transmission (fibre optique)

I.3.1 Introduction

La fibre optique est constituée d'un fil en verre ou en plastique très fin, qui possède la Propriété de conduire la lumière. Elle sert dans les transmissions de données terrestres et océaniques et offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux.

I.3.2 Structure Générale

La fibre optique qui se présente comme un fil fin de verre, est en réalité constituée d'un cœur cylindrique en matériau transparent d'indice de réfraction n_1 , entouré d'une gaine concentrique constituée d'un matériau ayant un indice de réfraction n_2 inférieur à n_1 .

Le diamètre du cœur varie de 8-10 μm à 50 μm selon le type de fibre. Celui de la gaine est de 125 μm .

Valeurs typiques d'indices de réfraction :

- Cœur : $n_1 = 1,48$
- Gaine : $n_2 = 1,46$

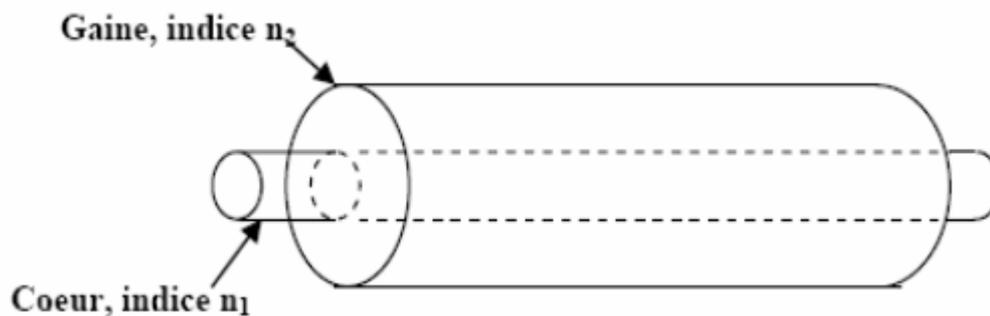


Figure (I.8) Présentation d'une fibre [15].

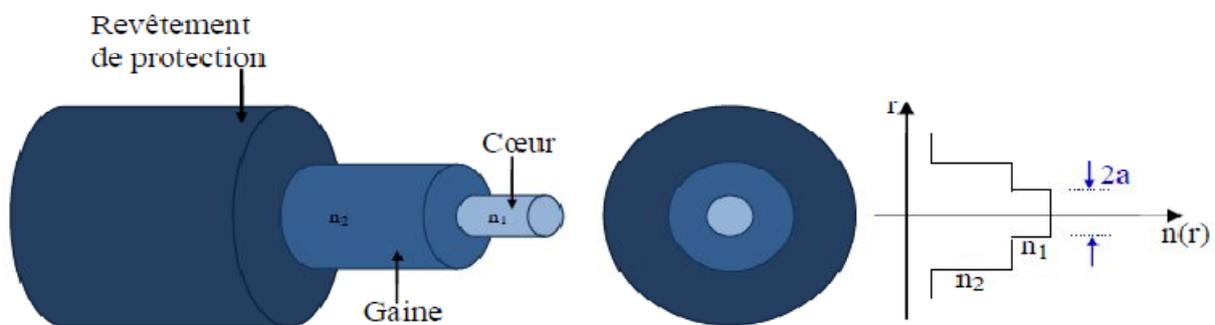


Figure (I.9) fibre optique avec revêtement [15].

I.3.3 Avantages des fibres optiques [22].

➤ Performances de transmissions

Très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible(en longueur d'onde) de nombreux signaux et de nombreux utilisateurs. Elles permettent des systèmes de portée et de capacité très supérieurs à celles des câbles conducteurs.

➤ Avantages de mise en œuvre

Faible poids, très petite taille, grande souplesse, appréciables aussi bien en télécoms que pour le câblage en aéronautique, informatique, médecine, production industriels.

➤ Sécurité électrique

(Isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive sous fortes tensions, en application médicales) et électromagnétique (la fibre n'est pas sensible aux parasites et n'en crée pas elle-même). Inversement, les puissances optiques utilisées sont faibles et non dangereuses.

➤ Avantage économique

Le coût global d'un système sur fibre optique (prenant en compte son installation et les équipements annexes nécessaires), est dans de nombreux cas inférieur à celui d'un système sur cuivre. Cependant, que ça soit la mise en œuvre notamment aux niveaux des raccordements, est devenu beaucoup plus facile et moins coûteuse que dans les premières applications.

I.3.4 Domaine d'utilisation

➤ la fibre optique est utilisée

Pour la transmission d'informations, que ce soit des conversations téléphoniques, des images ou des données. C'est probablement l'un des domaines où l'utilisation de la fibre optique est le plus important et a le plus d'avenir.

➤ La fibre optique est utilisée

En médecine tant pour diagnostiquer des problèmes de santé, que pour traiter certaines maladies, par exemple :

Pour le diagnostic : un câble de fibre optique, transporte de la lumière à l'intérieur du corps. Cette lumière est réfléchiée par les organes internes et est captée par un autre câble de fibre optique, qui achemine cette lumière vers un système d'imagerie vidéo. Il est donc possible d'avoir un aperçu de grande qualité de ce qui se passe dans le corps, et cela, en temps réel. Un exemple de cette utilisation est l'endoscope, particulièrement utilisé en gastro-entérologie.

➤ Le transport de lumière

Les applications classiques (éclairage, visualisation, endoscopie) ou plus récentes (transport de faisceau laser pour l'industrie).

➤ Liaisons industrielles

Ce sont des applications variées (télémesures, télécommandes, surveillances Vidéos) où l'insensibilité de la fibre aux parasites est un avantage essentiel.

➤ Liaisons et réseaux informatiques

Même sur de courtes distances l'utilisation de fibres optiques en informatique s'est très tôt développée, en particulier pour l'isolement électrique et l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques.

I.3.5 Caractéristiques d'une fibre optique

I.3.5.1 Généralités

La lumière est une onde électromagnétique de longueur d'onde λ , qui se propage dans un milieu transparent et isolant (diélectrique).

Avec : $\lambda = c \times T$ ou encore $\lambda = c / f$.

Où c est la célérité et vaut approximativement (3.10^8 m/s) dans le vide ou l'air)
 f est la fréquence en Hz.

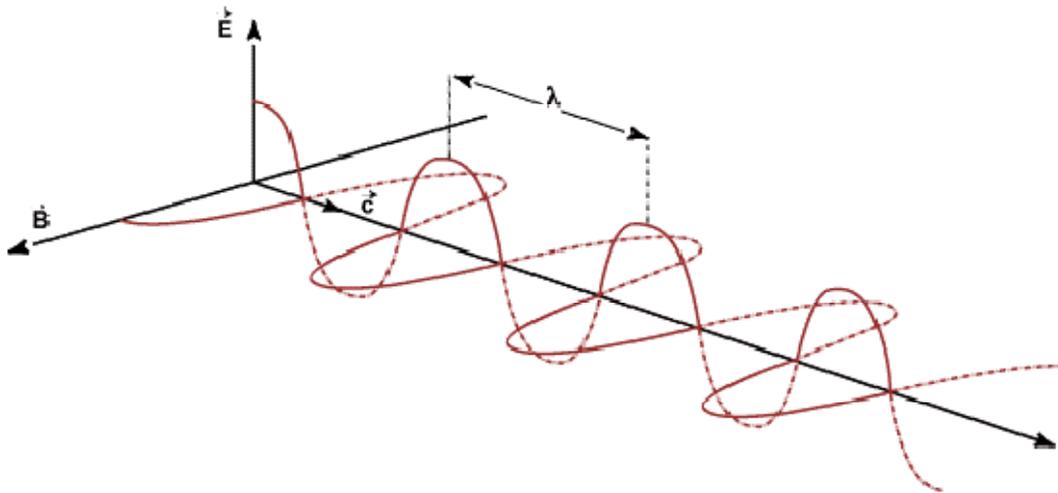


Figure (I.10) Représentation d'une onde électromagnétique [5].

\vec{E}	champ électrique
\vec{B}	champ magnétique
c	célérité (m/s)
λ	longueur d'onde (m)
T	période = λ / c (s)
f	fréquence = $1 / T$ (Hz)

I.3.5.2 Indice optique d'un milieu isolant et transparent (l'indice de réfraction)

L'indice optique "n" ou indice de réfraction d'une substance, est donné par le rapport de la célérité de la lumière dans le vide à la célérité de la lumière dans le milieu considéré :
 $n = c / v$.

Indice de réfraction de quelques milieux matériels :

Milieu	Air	Eau	Huile	Verre Crown	Verre Flint	Carbone	Oxyde de titane
Indice (n)	1.0002	1.333	1.5	1.517	1.655	2.417	2.76

I.3.5.3 le rôle de chaque constituant dans une fibre optique

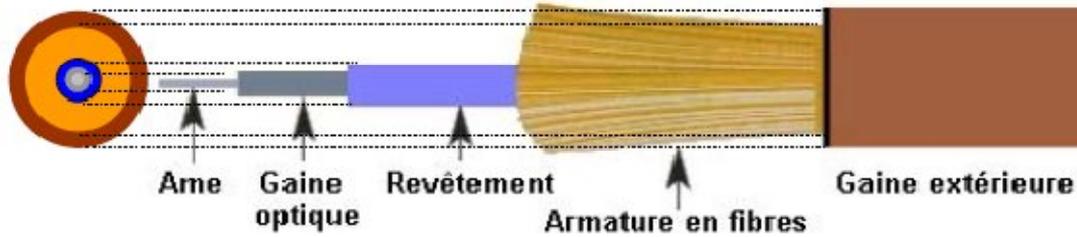


Figure (I.11) Constitution d'une fibre optique [5].

- L'âme ou le cœur est la région de la fibre dans laquelle se propage la lumière. Dans ce milieu, l'indice de réfraction n_1 est le plus élevé.
- La gaine optique est un milieu d'indice n_2 légèrement plus faible, qui se comporte ainsi comme un «miroir réfléchissant» pour la lumière à l'interface cœur-gaine.
- Le revêtement est une couche de plastique qui entoure la fibre optique pour la renforcer, elle aide à absorber les chocs et permet une protection complémentaire contre des courbures excessives.
- L'armature en fibres, permet de protéger le cœur contre les forces d'écrasement et les tensions mécaniques excessives lors de l'installation.
- La gaine extérieure complète la protection mécanique du cœur, elle est généralement de couleur orange, certains types présentent des couleurs noire ou jaune.

I.3.5.4 Ouverture numérique d'une fibre optique

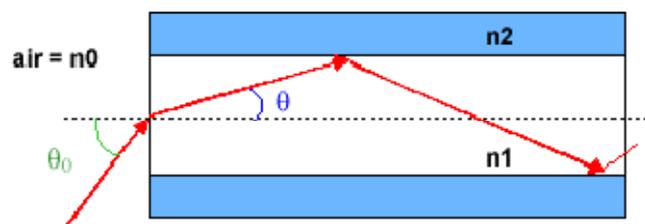
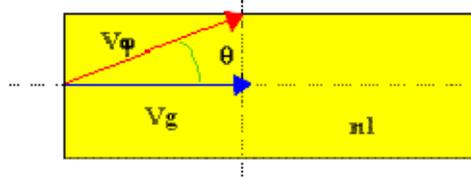


Figure (I.12) Ouverture numérique d'une fibre optique [5].

L'ouverture numérique caractérise l'angle maximum θ_0 que peut faire le faisceau pour assurer sa propagation dans la fibre optique. $(O.N) = \sin(\theta_0) = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ pour $n_0 = 1$.
 Au delà de cette limite, les rayons sont déviés dans la gaine et finissent par disparaître.

- Une grande O.N permet d'injecter une grande quantité de lumière, issue d'une source assez divergente (diode LED). 

- Une petite O.N n'autorise que l'injection d'un faisceau lumineux, issue d'une source très directive (LASER). 



n_1 : l'indice de réfraction du cœur.
 n_2 : l'indice de réfraction de la gaine.

*La vitesse de groupe d'onde [5]

C'est la rapidité avec laquelle l'énergie lumineuse se propage d'une extrémité à l'autre du guide d'onde.

$$V_{g \max i} = C / n_1 \quad ; \quad T_{\min} = (L \times n_1) / C$$

$$V_{g \min i} = C \times (n_2 / n_1^2) \quad ; \quad T_{\max} = L / V_{g \min}$$

I.3.6 Différents types de fibres optiques [5]

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

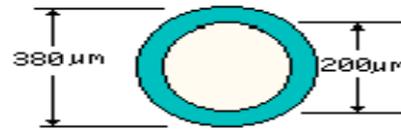
Soit $\alpha = (2\pi/\lambda) \times (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$. Où λ représente la longueur d'onde de la lumière utilisée.

- Pour $\alpha < 2,4$ → La fibre ne comporte qu'un mode de propagation, elle est appelée fibre monomode.



- Pour $\alpha \gg 2,4$ → La fibre est appelée multi-mode et se divise en deux sous-catégories :

- Fibre multi-mode à saut d'indice :



- Fibre multi-mode à gradient d'indice :



I.3.6.1 Fibre optique multi-mode à saut d'indice

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

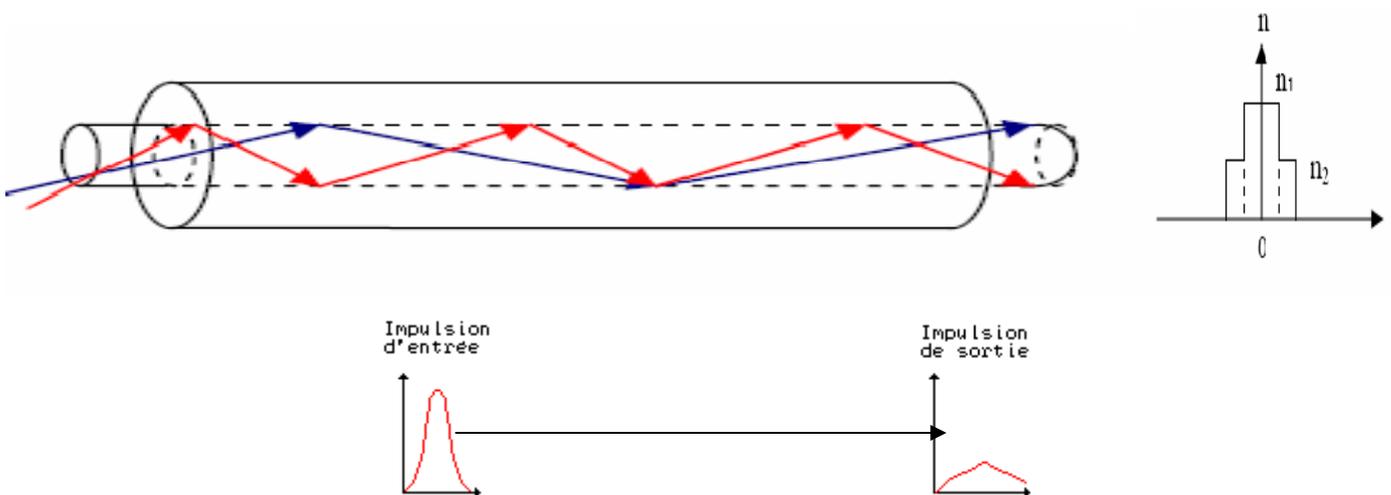


Figure (1.13) fibre avec profil à saut d'indice [15].

Dans la fibre à saut d'indice, les rayons ayant la même longueur d'onde se propagent dans la fibre en empruntant des chemins différents avec une vitesse de valeur constante $v=c/n_1$.

Il est donc évident que les rayons arrivent à destination avec des temps différents selon les parcours effectués, ceci provoque une forte dispersion du signal lumineux qui est due à la multiplication des modes de propagation provoquant ainsi la distorsion de l'impulsion à l'extrémité de la fibre.

N.B : Ce type de fibre ne trouve pas d'application dans les télécommunications.

I.3.6.2 Fibres avec profil a gradient d'indice :

Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction n n'est pas constant, mais décroît graduellement du centre de la section du cœur jusqu'à la limite de la surface de séparation entre le cœur et la gaine.

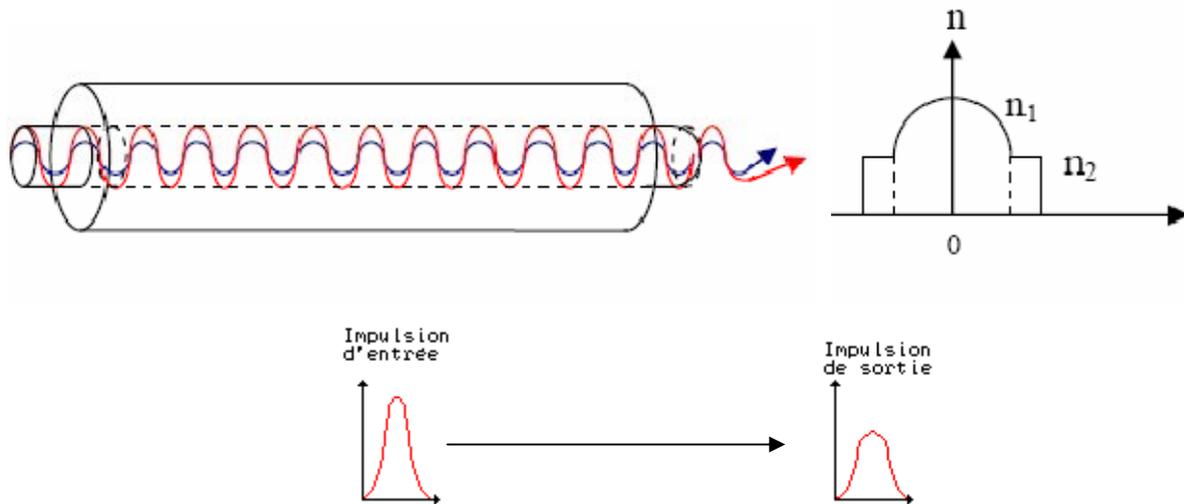


Figure (1.14(a)) Fibre avec profil à gradient d'indice [15].

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

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

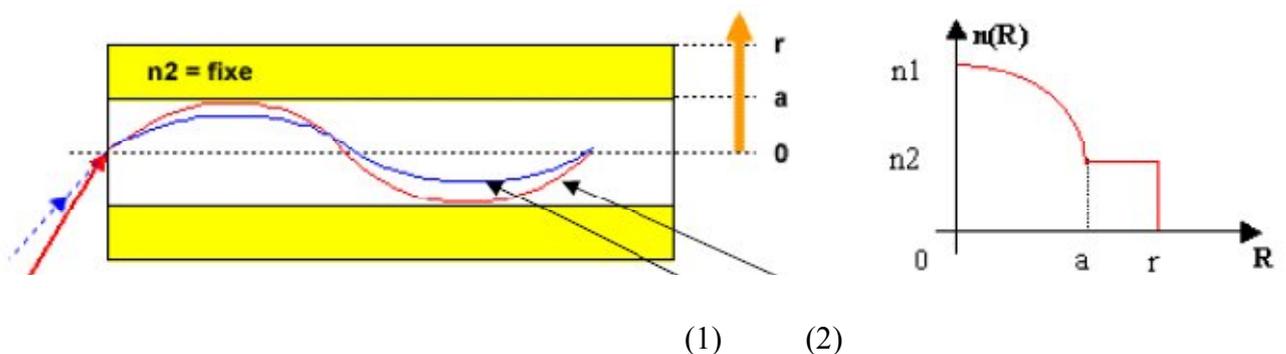


Figure (1.14(b)) Fibre avec profil à gradient d'indice [5].

- (1) Trajet le plus court mais le plus lent
- (2) Trajet le plus lent mais plus rapide

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

I.3.6.3. fibre optique monomode

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

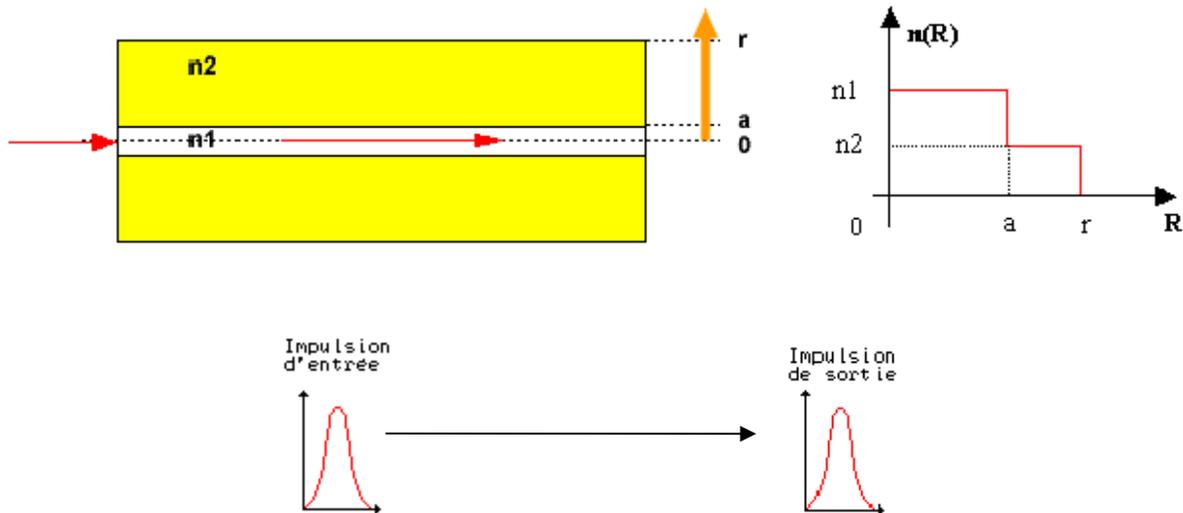


Figure (1.15) fibre optique monomode [5].

Cette catégorie de fibre optique est employée comme moyen de transmission optique dans le réseau des télécommunications à cause de leurs avantages :

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

I.3.7 Autres caractéristiques

I.3.7.1 Les pertes de la fibre optique

I.3.7.1.1 Introduction

L'objectif de tout système de télécommunication est de transmettre une information le plus loin possible avec un minimum de pertes, d'affaiblissement et de distorsion des signaux.

Dans la réalité, ils existent plusieurs effets qui influent sur la qualité du signal.

I.3.7.1.2 L'atténuation

Une perte, ou atténuation se traduit en fibre optique par la perte d'énergie lumineuse dans la fibre. Elle est mesurée en dB/Km.

L'atténuation provient de phénomènes physiques d'absorption et de diffusion dans le matériaux de guidage, et se traduit par un terme d'atténuation linéique (α) en dB/Km.

Ce qui signifie que la puissance transmise à une distance L est donnée par :

$$P(L) = P_0 \times 10^{\exp(-\alpha \times L)/10} \quad \text{avec :}$$

P_0 est la puissance qui a été couplée à l'entrée de la fibre.

Cette atténuation α dépend du matériau et de la longueur d'onde λ .

Cette courbe représente les pertes qui sont dues à l'atténuation en fonction de la longueur d'onde. On voit bien parmi les trois fenêtres utilisées en télécommunication optique, la fenêtre qui correspond à $\lambda = 1550 \text{ nm}$ à un minimum d'atténuation.

Et la partie du spectre du visible correspond un maximum d'atténuations.

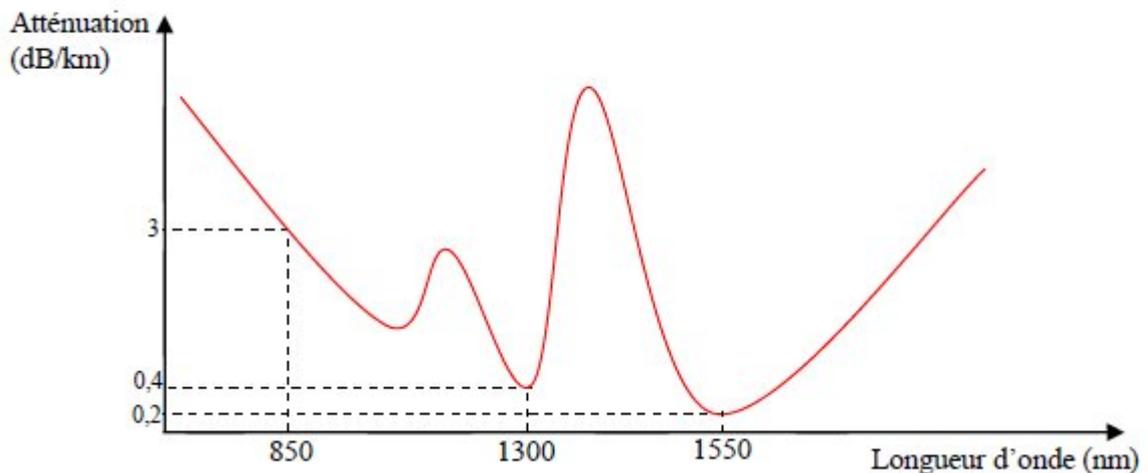


Figure (I.16) Atténuation de la fibre optique en fonction de la longueur d'onde [5].

La courbe $\alpha(\lambda)$ fait apparaître trois phénomènes :

a) Absorption moléculaire :

Ces pertes sont causées par l'absorption des rayons optiques ou de la lumière par la silice (SiO_2), des impuretés (Fe, Cu...), les impuretés (OH^-) sont en grande partie responsables.

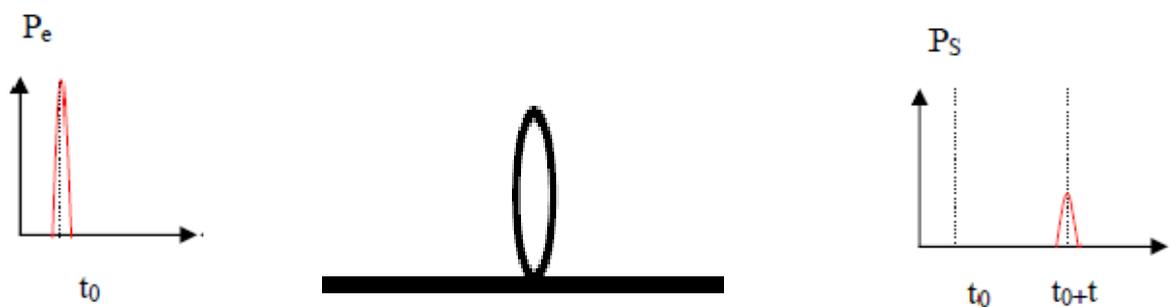


Figure (I.17) Phénomène d'atténuation [15].

b) Pertes Par Diffusion Rayleigh :

Sont dues à la disposition des molécules des (SiO_2), qui ne se font pas d'une façon homogène ce qui entraîne à une fluctuation dans l'indice de réfraction.

Ce phénomène est important pour la lumière visible, elle diminue rapidement quand la longueur d'onde augmente.

c) Pertes par les courbures :

Lorsque la fibre se courbe, une partie de la lumière est perdue par rayonnement à l'endroit de la courbure. Ces pertes peuvent être détectées avec précision en mesurant l'atténuation de l'intensité lumineuse. L'effet «capteur» repose sur la corrélation entre cette atténuation et la déformation longitudinale de la corde optique.

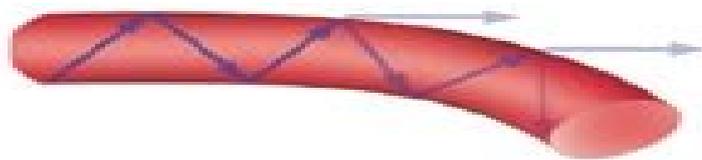


Figure (I.18) pertes par courbures [14].

d) Pertes de connectiques :

Séparation longitudinale, désalignement radial/angular Excentricité/ellipticité des cœurs.

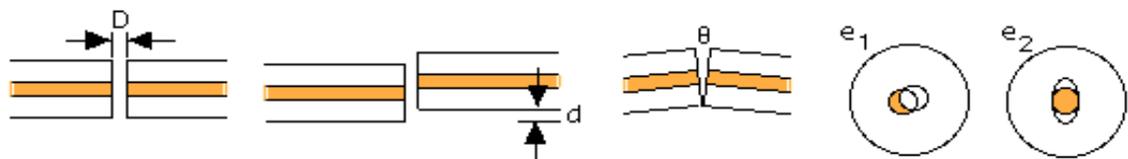


Figure (I.19) Pertes par raccordements [14].

- Les courbes expérimentales, montrent que le défaut d'écartement des faces est moins critique que l'excentrement.
- L'ordre de grandeur à retenir est qu'un écart angulaire de 1 degré, peut produire une atténuation de 0,5 dB.
- La non-perpendicularité des faces (écart de 2 à 3 degrés) provoque une atténuation de 0,3 dB. la rugosité des faces ($r = 5 \mu\text{m}$) donne également 0,3 dB de perte. Conclusion, il faut que les deux faces optiques en contact de la connexion, soient parfaitement sciées et polies.

I.3.7.1.3 La dispersion

I.3.7.1.3.1 Introduction

Le phénomène de dispersion se traduit par un élargissement des impulsions aux courbures de leur propagation, ce qui va entraîner l'altération du signal et la diminution de la bande passante.

Le phénomène de la dispersion peut être dû à :

a) La dispersion chromatique

Le temps de propagation de groupe (le temps mis par un signal pour parcourir l'unité de longueur) dépend de la longueur d'onde.

Variation de la vitesse des signaux lumineux de longueurs d'onde différentes.

On suppose que le milieu n'est pas linéaire et que son indice optique n_1 varie en fonction de la longueur d'onde (n_1 augmente quand λ diminue).

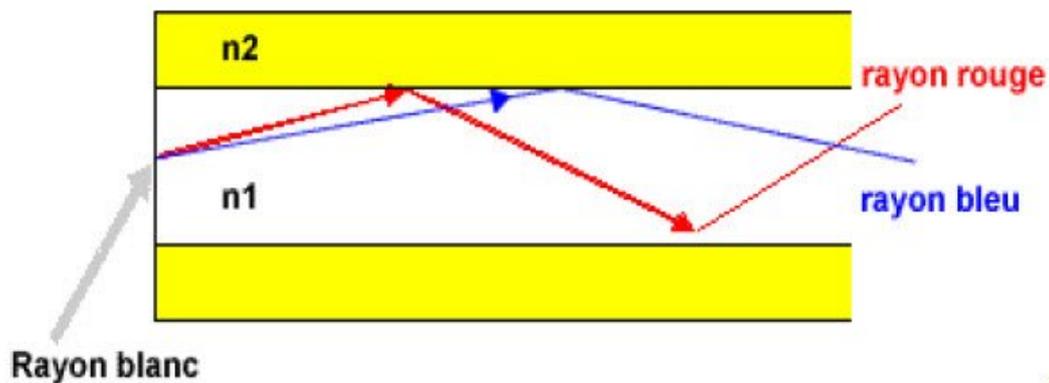


Figure (I.20) phénomène de dispersion chromatique [5].

En sortie, on constate que l'impulsion s'étale, la source monochromatique idéale n'existe pas.

b) Dispersion modale

L'élargissement des impulsions dues à la dispersion modale, résulte de la différence de temps de propagation des différents modes qui se propagent dans la fibre optique.

- Est maximale pour une fibre optique à saut d'indice.
- Est minimale pour une fibre optique à gradient d'indice.
- Pour une fibre monomode la dispersion modale n'existe pas.

Lorsqu'une impulsion est envoyée dans la fibre, elle se décompose selon les différents modes. Certaines composantes (modes) arrivent donc avant d'autres et l'impulsion s'étale.

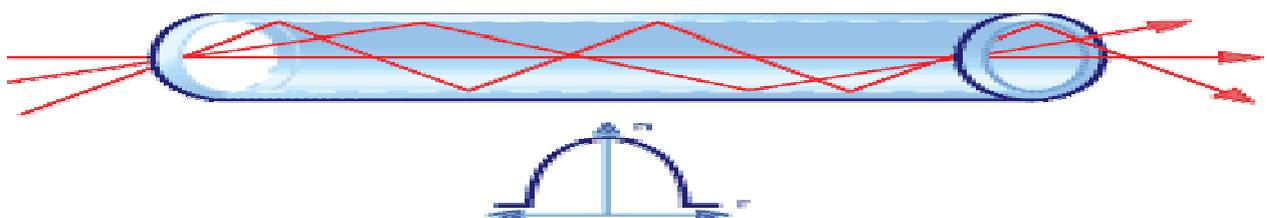


Figure (I.21) Phénomène de dispersion modale [5].

I.3.7.1.3.2 Amplificateur optique

L'amplificateur optique est un dispositif qui assure l'amplification. Deux types d'amplificateurs optiques ont aujourd'hui des applications clairement identifiées :

- l'amplificateur optique à semi-conducteurs.
- Et l'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium.

I. 3.7.1.3.3 Amplificateur électronique

Le dispositif d'un amplificateur électronique est complexe ; il comporte un détecteur qui convertit le signal optique en signal électrique, le signal électrique est ensuite amplifié électriquement puis à nouveau converti en signal optique par l'intermédiaire d'un laser.

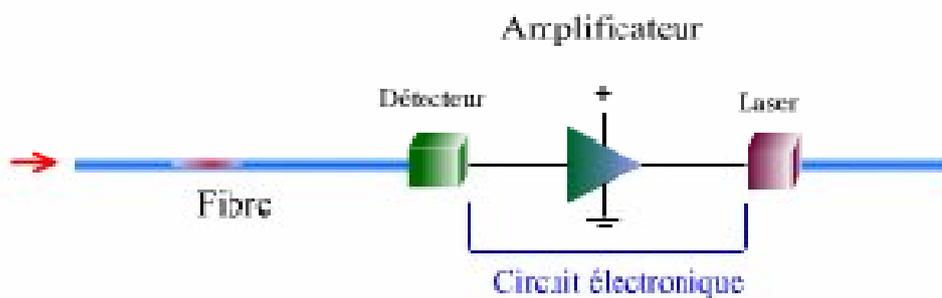


Figure (I.22) Amplificateur électronique [22].

I. 3.7.1.3.4 Amplificateur a fibre dopée

Le principe de l'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium, est de transférer la puissance optique de la pompe (diode laser de pompe) sur le signal par l'intermédiaire de l'élément actif erbium.

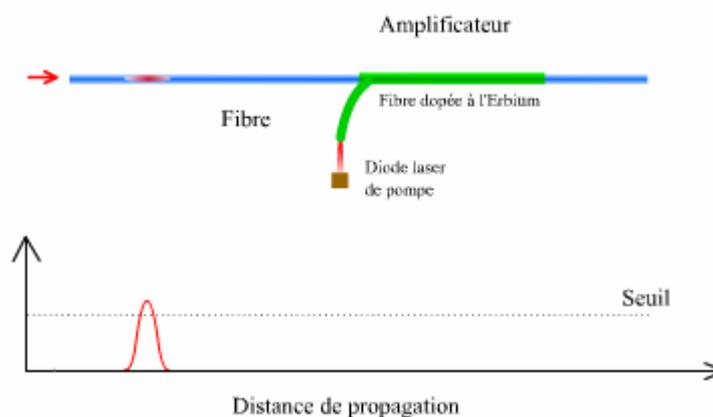


Figure (I.23) Amplificateur à Fibre optique dopée [22].

I.4 Récepteur optique

I.4.1 Introduction

De même que pour les modules d'émission, de nombreux efforts ont été fournis pour rendre les modules de réceptions de plus en plus performants. Le rôle du récepteur optique est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. La réception sera basée sur la technique de détection directe. Ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels.

On y retrouve trois parties :

- Le bloc de 'premier étage' composé du photo-détecteur. Il peut être accompagné d'un préamplificateur, qui a pour but de rendre le photo-courant généré suffisamment fort, malgré le faible signal optique reçu où la faible sensibilité du photo-détecteur.
- Le bloc 'linéaire', composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre réducteur de bruit.
- Le bloc récupération des données, correspondant au dernier étage du récepteur. On y trouve un circuit de décision et un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation.

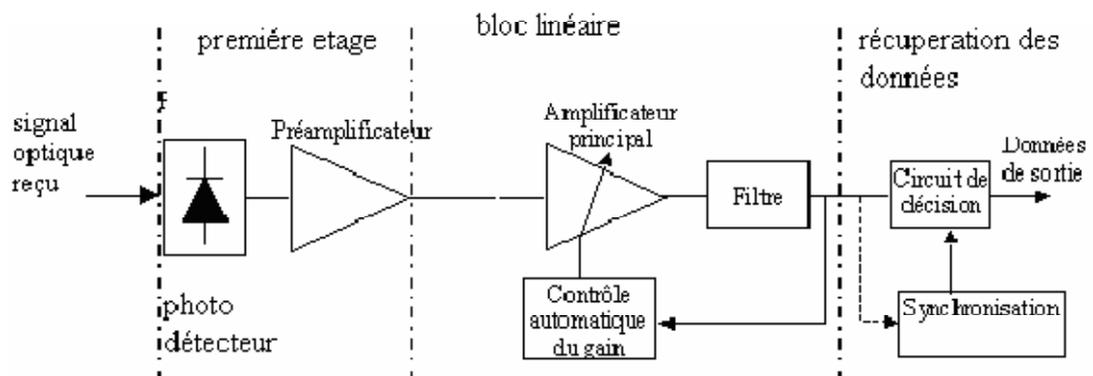


Figure (I.24) Schéma d'un récepteur de données à détection directe [22].

I.4.2 les types de photo-détecteurs

On peut distinguer deux catégories de photodiodes ; Celles qui n'ont aucun gain interne (PIN) et celles qui ont un gain interne (APD).

- Photo diode PIN :

Le photo-détecteur le plus simple est une jonction P-N (photodiode) polarisée en inverse, dans laquelle les photons absorbés créent des paires électrons-trous. Le photo-courant correspondant est

défecté dans une charge résistive. Cette structure simple est améliorée en insérant une région très faiblement dopée, dite intrinsèque (I), entre les zones P et N, d'où le nom de « PIN ».

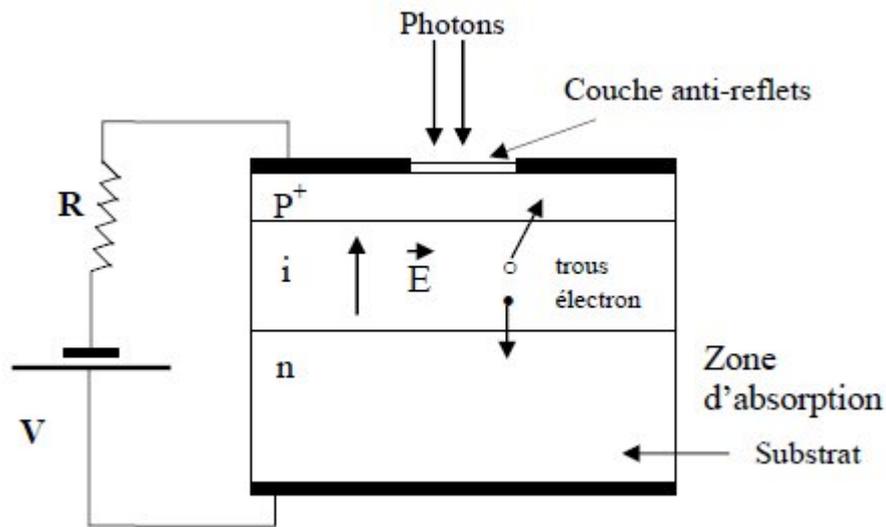


Figure (I.25) Photo diode PIN [9].

Dans la région intrinsèque, les photons incidents créent des paires électrons-trous qui sont dissociées par le champ électrique intense qui existe. Dans les régions P et N, seuls les photons proches de la région intrinsèque créent un photo-courant.

La profondeur de pénétration des photons dans la photodiode, dépend du type de matériau utilisé ainsi que de la longueur d'onde. Plus celle-ci est élevée, plus l'onde pénètre dans le semi-conducteur. Les paires électrons-trous conçues par les photons incidents sont rapidement dissociées et collectées par les électrodes. La zone (P) traversée par la lumière doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflets qui améliore le rendement quantique externe et qui protège le matériau.

La photodiode PIN fonctionne avec une tension inverse, faible et a un temps de réponse très Court (inférieur à 1 ns).

➤ Photo diode à avalanche APD :

Il est possible d'accroître la sensibilité d'une photodiode, par un processus de multiplication interne à effet d'avalanche. Si les électrons et les trous dus à l'absorption des photons sont créés dans une zone où règne un champ électrique intense, ils pourront acquérir suffisamment d'énergie pour créer à leur tour d'autres paires électrons-trous et ainsi de suite. Ce phénomène est appelé : l'ionisation par impact ; c'est l'effet d'avalanche qui, s'il n'est pas contrôlé, aboutit au claquage de la jonction.

À la différence de la photodiode PIN, la photodiode à avalanche possède donc un gain interne dû à cette multiplication d'électrons. Il existe plusieurs structures d'APD :

* Dans le silicium, elles résultent d'un compromis entre une zone d'absorption large et une jonction très abrupte pour obtenir un très fort champ électrique.

* Dans le germanium, du fait de la faible profondeur d'absorption et des coefficients d'ionisation élevés des porteurs, la structure de l'APD est une jonction P-N abrupte.

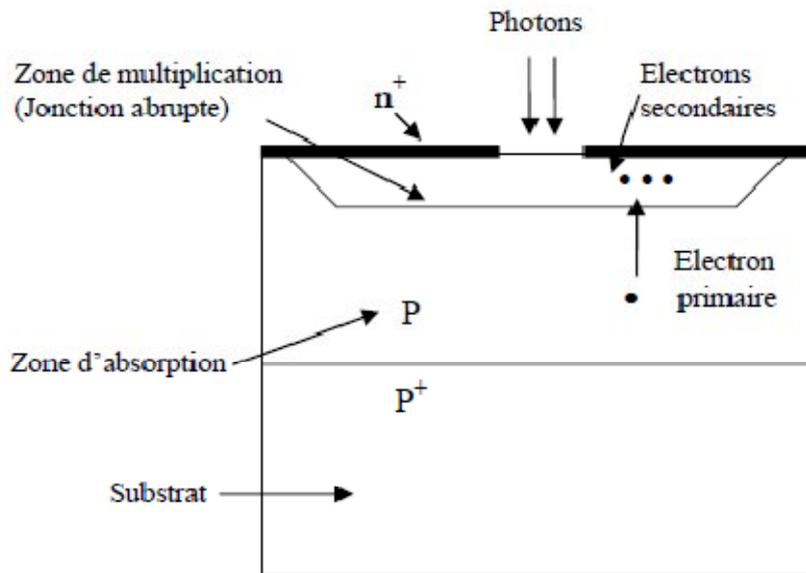
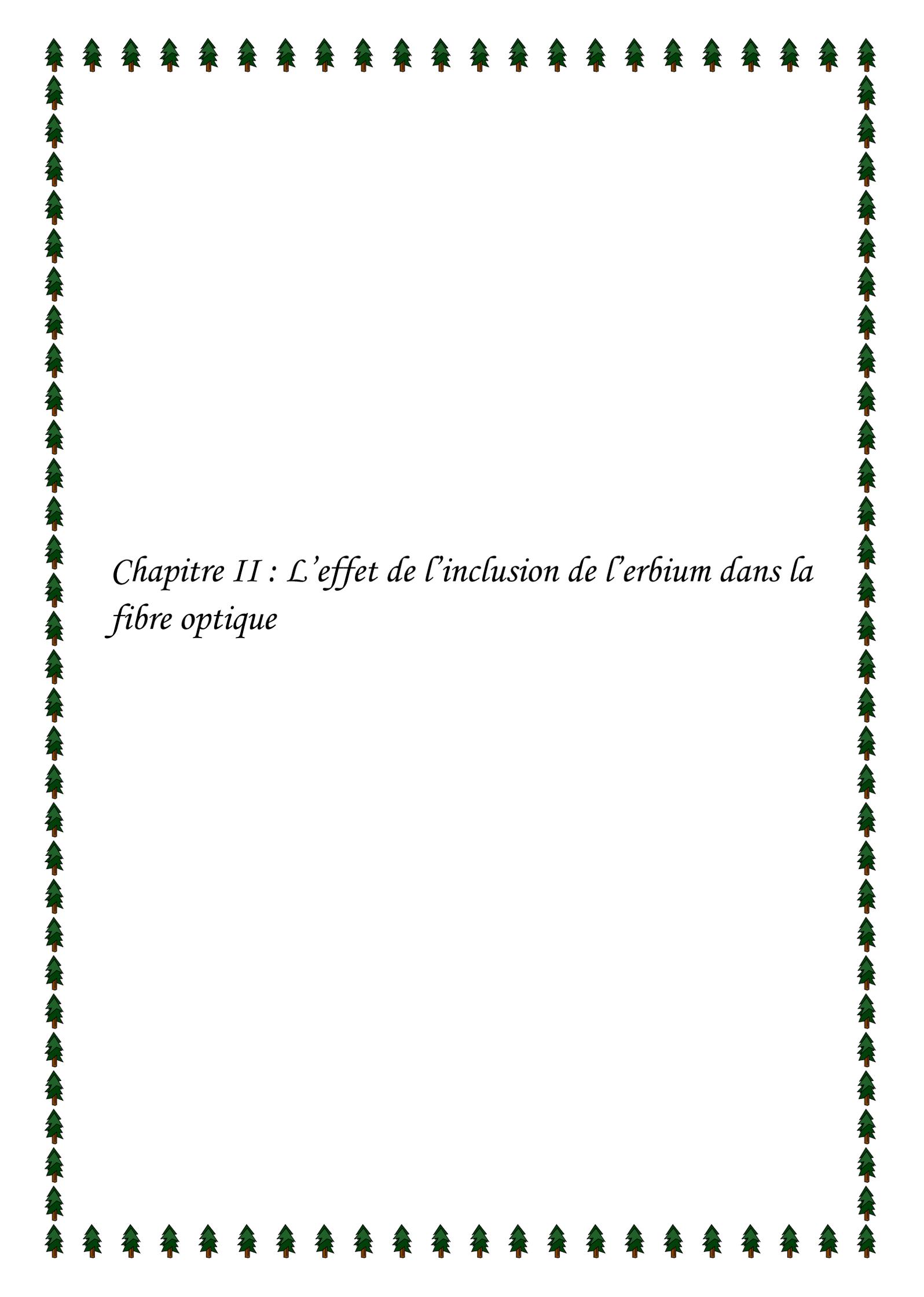


Figure (I.26) photo diode à avalanche APD [9].

I.5 Conclusion

D'après la théorie vue précédemment, lorsqu'un signal optique parcourt une longue distance dans une fibre optique, il connaît une certaine atténuation. Si la distance parcourue est importante, le signal peut devenir bruité ou trop faible pour être détecté. Sur l'étude d'une liaison optique pour réaliser un amplificateur optique il est nécessaire d'avoir un milieu amplificateur (milieu actif), pour notre étude il s'agira d'un tronçon de fibre dopé avec des ions Erbium Er³⁺ et de deux faisceaux (pompe et signal).



Chapitre II : L'effet de l'inclusion de l'erbium dans la fibre optique

I. Introduction

Les fibres optiques étant dans leur très grande majorité utilisées dans les transmissions optiques, où elles sont l'élément permettant de véhiculer l'information mais aussi, grâce aux amplificateurs optiques, qui ont la possibilité de ré-amplifier le signal. Dans le cadre des télécommunications optiques, les fibres optiques sont généralement obtenues à partir de verre d'oxyde de silicium, plus couramment appelé silice (SiO_2). Les premières fibres actives ont été obtenues en introduisant des ions de terres rares optiquement actifs dans les structures vitreuses. Dans ce chapitre, nous évoquerons tout d'abord les terres rares de manière générale avant de nous intéresser plus particulièrement aux propriétés de l'ion erbium.

II. Fabrication des fibres optiques[21]

II.1 Principe

Les fibres optiques sont fabriquées par synthèse, en deux étapes :

- Réalisation d'une préforme, barreau cylindrique de verre d'environ un mètre de longueur et quelques centimètres de diamètre .
- Etirage de cette préforme, pour la transformer en une fibre de plusieurs Km de longueur.

Les préformes pour fibres en plastique sont fabriquées par polymérisation, celles pour fibres de silice sont obtenues par synthèse de la silice à partir de chlorures , en générale par une réaction d'oxydation :



L'hydrolyse à la flamme est également utilisée :



II.2 Dopage aux terres rares (erbium) en phase liquide [12]

Cette technique de dopage consiste à incorporer les terres rares, essentiellement l'erbium par diffusion ionique en phase liquide.

Le dépôt de la gaine optique s'effectue dans le tube substrat (figure a). En revanche le dépôt des zones à doper l'erbium (le cœur dans la plupart des cas), est ensuite réalisé à basse température afin de rendre la silice déposée poreuse (figure a). Le tube est ensuite placé verticalement et immergé dans une solution aqueuse (eau dés ionisée) ou alcoolique

(méthanol ou propanol) de l'erbium (figure b). Ensuite la solution aqueuse est drainée et on procède au séchage à 600° sous flux gazeux (dichlore et dioxygène) de la couche imprégnée (figure c). On termine enfin par la vitrification et le rétreint.

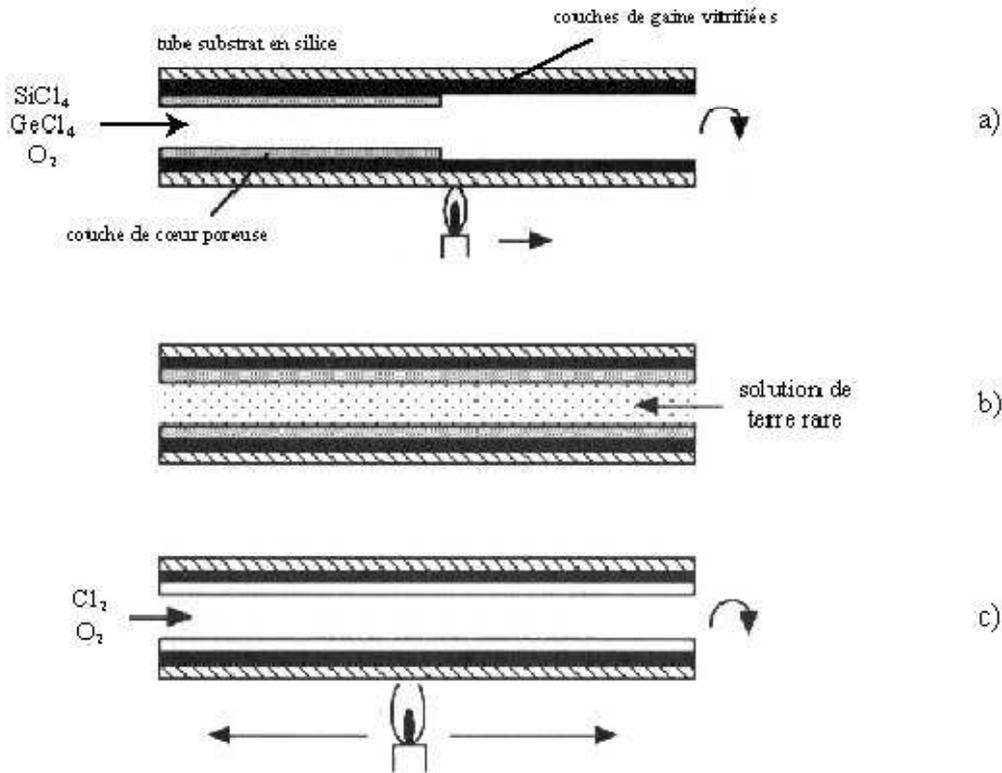


Figure (II.1) Dopage de terre rare (l'erbium) en phase liquide : a) dépôt des couches poreuses b) diffusion ionique de la solution c) séchage du dépôt.

Remarque

Il est à noter que l'ajout d'ions erbium dans la matrice hôte (cœur dopé en erbium) de silice provoque une modification de l'indice de réfraction.

II.3 La Structure vitreuse des fibres optiques standards

Il existe un grand nombre de types de fibres optiques. Celles utilisées dans les télécommunications sont fabriquées à partir de silice. Leur structure est composée d'éléments tétraédriques de base (silicates SiO_4) : un atome formateur, Si, est relié par des liaisons covalentes à quatre atomes d'oxygène.

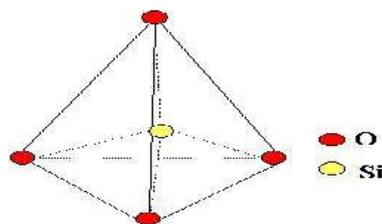


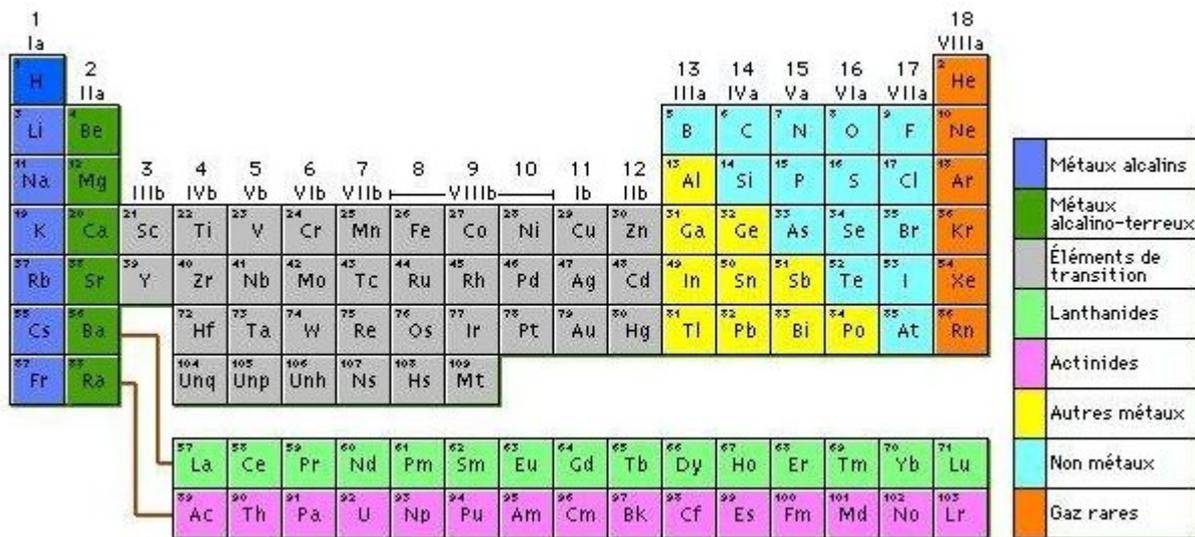
Figure (II.2) Élément tétraédrique (silicate) de la silice vitreuse [12].

Il est possible de faire varier les propriétés optiques ou physiques du verre de silice grâce à l'incorporation d'ions dits « dopants » ou « modificateurs » dans la structure ;

- Le germanium, l'aluminium, le phosphore et le titane sont utilisés pour augmenter l'indice de réfraction.
- Le bore et le fluor, à l'inverse, font diminuer l'indice de réfraction.

III. Les ions de terres rares [10]

Dans la classification périodique des éléments, les terres rares appartiennent à la famille des lanthanides. La configuration électronique de ces éléments est la suivante: $[Xe] 6s^2 4f^{0-14} 5d^{0-1}$. Leurs couches internes possèdent la même configuration que le Xénon (Xe). Les couches externes constituées des couches 6s, 4f et 5d, sont à l'origine des propriétés optiques des lanthanides. Le remplissage de ces couches respecte la règle de Klechkowski. La couche 6s étant saturée, la couche 4f se remplit progressivement jusqu'à la saturation, (soit 14 électrons) puis commence le remplissage de la couche 5d. Seuls le lanthane et le Gadolinium font exception puisque leurs couches 5d portent un électron alors que leurs couches 4f, sont non saturées. L'ionisation de ces éléments donne généralement lieu à la formation d'ions trivalents (3+), les électrons étant « prélevés » sur les couches 6s et 4f.



Figure(II.3) Place des lanthanides dans la classification périodique des éléments.

III.1 L'ion erbium

Les ions de terres rares, essentiellement l'erbium de numéro atomique $Z=68$, fait partie de la famille des lanthanides. Cette famille d'atomes (de $Z=57$ à $Z=71$), ont joués un rôle crucial dans le développement de la technologie de télécommunication optique. Cet élément permet d'amplifier des signaux lumineux dont les longueurs d'onde qui sont comprises dans la troisième fenêtre de transparence de la silice. Et cela pour fournir une transition amplificatrice à la longueur d'onde de 1550nm.

Nous allons présenter les principes physiques des transitions électroniques aussi que l'environnement Erbium et son utilisation dans l'amplification optique des signaux propageant dans une fibre à silicate.

III.2 Les transitions électroniques

Le phénomène d'amplification optique se trouve à l'interaction des ions terres rares (l'erbium) avec un rayonnement électromagnétique. Cette interaction donnera naissance à des transitions entre les différents niveaux d'énergies des ions erbium, qui peuvent être classifiées en deux catégories: transitions radiatives et non radiatives.

Au cours de la propagation de la lumière dans le cœur, les photons peuvent subir deux importants phénomènes par les ions erbium : absorption ou émission d'un photon.

III.3 Principes physiques

III.3.1 L'absorption

Tous les éléments chimiques de la classification périodique sont constitués d'un noyau autour duquel gravite un certain nombre d'électrons dits à l'état fondamental. Par exemple le cas de l'erbium. Si on leur apporte l'énergie suffisante, ces électrons peuvent passer sur des niveaux d'énergie plus élevés, On parle « d'excitation » des atomes. L'énergie nécessaire pour exciter ces atomes peut être apportée de différentes manières : décharges électriques, flashes ou photons (flux lumineux) qui sont alors absorbés. Les atomes excités ne sont pas dans un état stable et tendent toujours à revenir à l'état fondamental : c'est la désexcitation. Au cours de cette désexcitation, l'énergie peut être restituée sous forme de photons (transition radiative) ou sous forme de phonons qui sont des quanta d'énergies associés à des vibrations de la matière (transition non radiative).

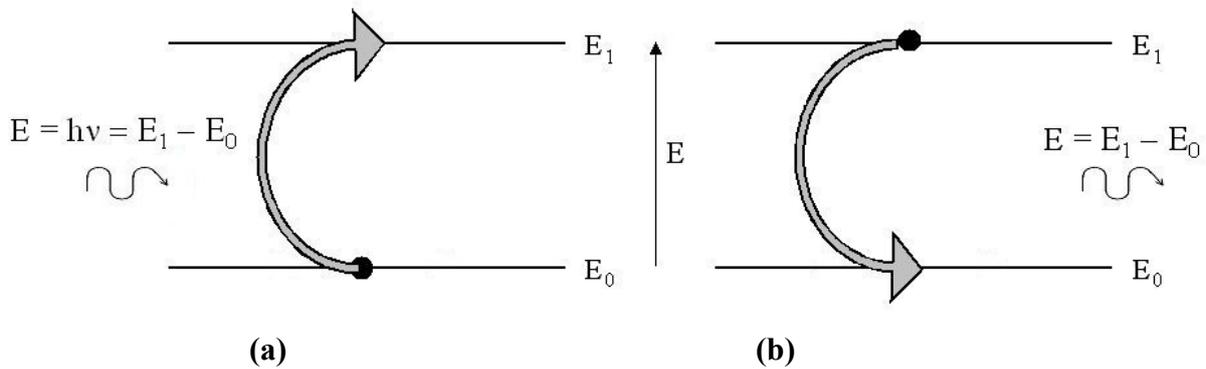


Figure (II.4) Représentations schématiques: a) de l'excitation d'un atome par absorption d'un photon, b) de la désexcitation d'un atome accompagnée de l'émission d'un photon.

Sur la figure (4-a), un apport d'énergie E égal à la différence d'énergie entre les deux Niveaux E_0 et E_1 ($E = E_1 - E_0$) permet à un électron de passer du niveau fondamental E_0 au niveau d'énergie E_1 plus élevé. Le phénomène de désexcitation radiative est schématisé sur figure (4-b). Un électron excité retombe à l'état fondamental. Ce phénomène s'accompagne de l'émission d'un photon d'énergie $E_1 - E_0$.

III.3.2 Émissions spontanée et stimulée

Une particule (atome, ion de l'erbium) excitée ne peut pas rester indéfiniment dans cet état physique. Elle se désexcite naturellement vers un niveau d'énergie inférieure en émettant spontanément un photon dans le cas d'une transition radiative (émission spontanée).

Le photon émis possède une direction, une phase et une polarisation aléatoire et son énergie est égale à la différence d'énergie entre les 2 niveaux mis en jeu.

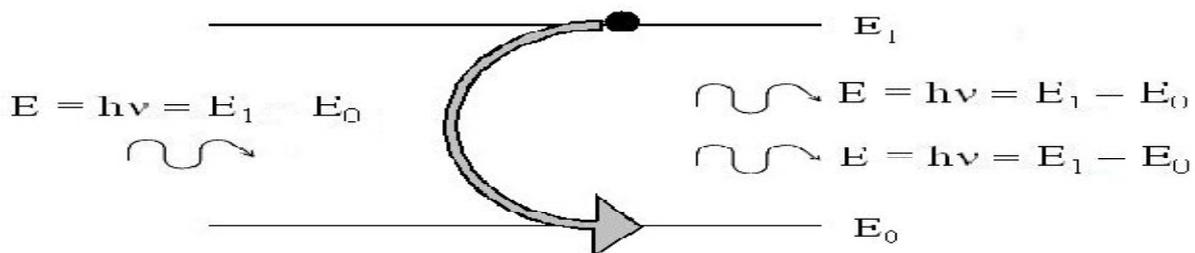


Figure (II.5) : Principe de l'émission stimulée : désexcitation d'un ion du niveau E_1 vers le niveau E_0 provoquée par un photon incident d'énergie $E = E_1 - E_0 = h\nu$.

Sur cette figure on représente le cas d'un atome excité sur le niveau d'énergie E_1 et soumis à l'influence d'un photon incident d'énergie égale à $E_1 - E_0$. Cette influence induit la désexcitation de l'atome vers le niveau E_0 , avec émission d'un photon (émission stimulée). Le photon émis est en tout point identique au photon incident (direction, phase, polarisation, énergie). C'est ce principe d'émission stimulée qui est à l'origine de l'amplification optique.

IV. Principe de l'amplification optique

Considérons maintenant le cas d'un système où 3 niveaux d'énergie de l'ion erbium qui sont mis en jeu, L'inversion de population peut être obtenue par l'absorption d'un faisceau lumineux intense « onde de pompe » dont l'énergie des photons est ($E_p = E_2 - E_0$) qui amène les électrons du niveau fondamental au niveau (2) (figure 6.a). Si la durée de vie de ce niveau est courte, les électrons se désexcitent spontanément vers le niveau (1) d'énergie inférieure, par une transition le plus souvent non radiative (figure 6.b). Ce niveau, de plus grande durée de vie, est appelé niveau métastable. Lorsque l'inversion de population entre le niveau fondamental et le niveau (1) est réalisée, les photons d'une onde « signal », d'énergie $E_s = h \times c / \lambda = E_1 - E_0$, qui traversent le milieu ont une probabilité de provoquer l'émission d'un photon identique supérieure à celle d'être absorbé. Le signal est donc amplifié (figure 6.c).

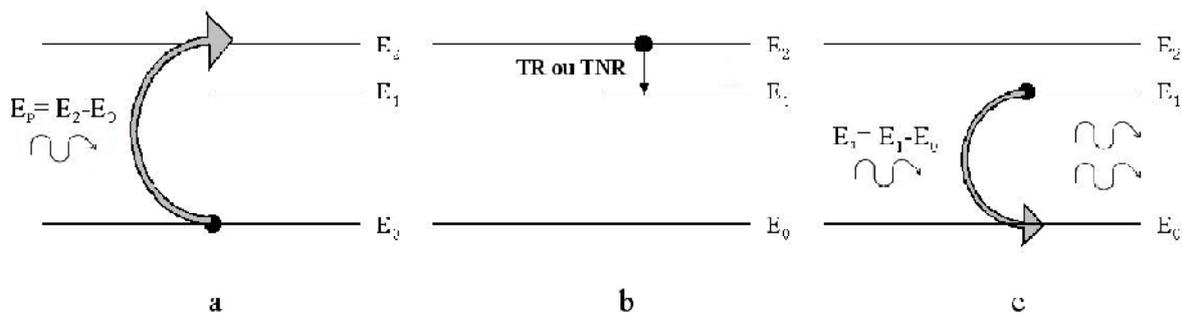


Figure (II.6) a) Absorption d'un photon de pompe pour exciter un ion erbium du niveau fondamental jusqu'au niveau d'énergie E_2 , b) désexcitation spontanée d'un ion erbium du niveau fondamental vers le niveau (1), c) génération d'un deuxième photon signal par émission stimulée [10].

Le signal à amplifier d'énergie $E_1 - E_0$ peut également être absorbé par un atome à l'état fondamental pour accéder au niveau (1). Cette absorption est néfaste puisqu'elle atténue le signal. Pour éviter cela, il faudra que le niveau fondamental soit très fortement dépeuplé par l'absorption d'un faisceau de pompe afin de réaliser l'inversion de population ($N_1 > N_0$). L'amplification d'un signal lumineux sera d'autant meilleure que l'inversion de population sera grande.

V. Effets de l'inclusion de l'erbium dans la fibre optique

V.1 Introduction

Une fibre optique dopée erbium est simplement une fibre optique de silice « ordinaire » dans laquelle ont été insérés des ions erbium, Ce sont ces ions qui vont donner à la fibre ses propriétés amplificatrices.

V.2 Principe

Pour amplifier un signal optique au sein d'une fibre, il faut incorporer à la silice du Cœur des éléments actifs (ions erbium) suivant les principes énoncés ci-dessus.

L'erbium présente la particularité de posséder une transition radiative autour de 1550nm, la longueur d'onde correspondante à la troisième fenêtre de transparence de la silice (faible atténuation du matériau), et par conséquent, couramment utilisée dans le cadre des télécommunications optiques. Le niveau fondamental de l'ion trivalent Er^{3+} est le niveau $^4\text{I}_{15/2}$. Les électrons peuvent ensuite se désexciter du niveau $^4\text{I}_{11/2}$ vers le niveau métastable $^4\text{I}_{13/2}$ dont la durée de vie est suffisamment élevée pour favoriser la désexcitation stimulée au détriment de l'émission spontanée. La transition du niveau $^4\text{I}_{13/2}$ vers le niveau fondamental est une transition radiative à une longueur d'onde proche de 1550nm.

V.3 Comportement spectral des fibres optiques dopées à l'erbium

Dans la figure ci-dessous on représente les différents niveaux et différentes transitions énergétiques des ions de terres rares plus particulièrement l'erbium.

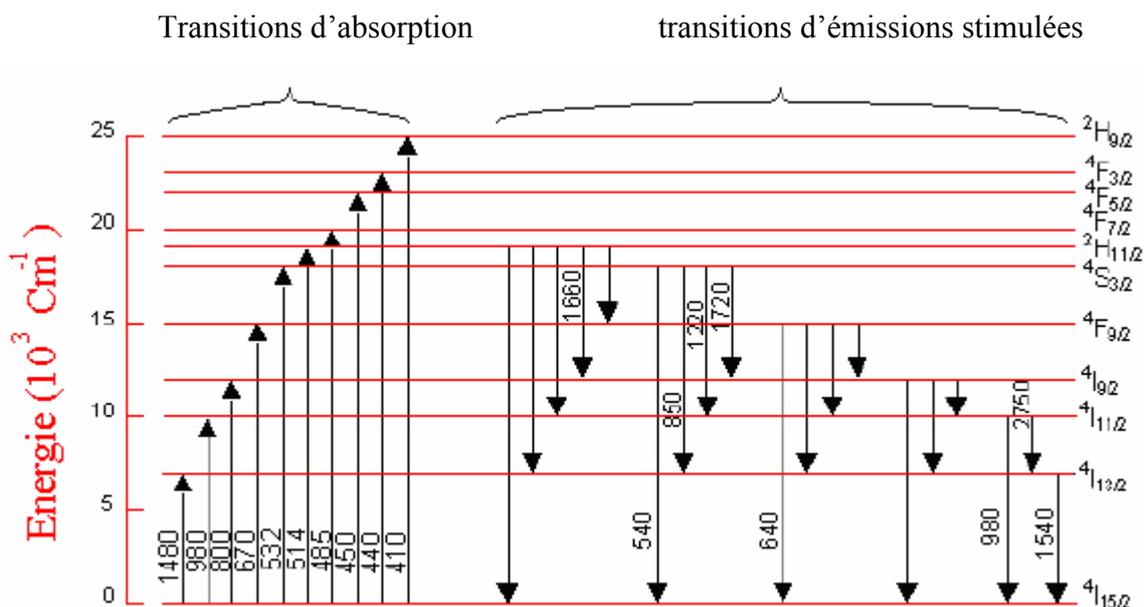


Figure (II.7) Diagramme d'énergie partiel de l'ion erbium dans une matrice de verre [7]

Les interactions lumière-matière s'effectuent entre des niveaux discrets d'énergie. Tout niveau d'énergie correspondant à un état excité a 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.

Dans ce paragraphe on va présenter l'effet Stark, effet qui influence le Comportement des ions erbium et qui est provoqué par la matrice hôte. Par la suite on étudierait les deux phénomènes contribuant à augmenter la largeur des raies qui sont l'élargissement homogène et l'élargissement inhomogène.

V.4 Effet Stark [16]

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. 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.

Sur la figure ci-dessous on donne une représentation schématique des sous niveaux Stark pour les niveaux $^4I_{13/2}$ et $^4I_{15/2}$ dans le cas de l'erbium.

Soit : i correspond le niveau énergétique $^4I_{13/2}$.

J correspond le niveau énergétique $^4I_{15/2}$.

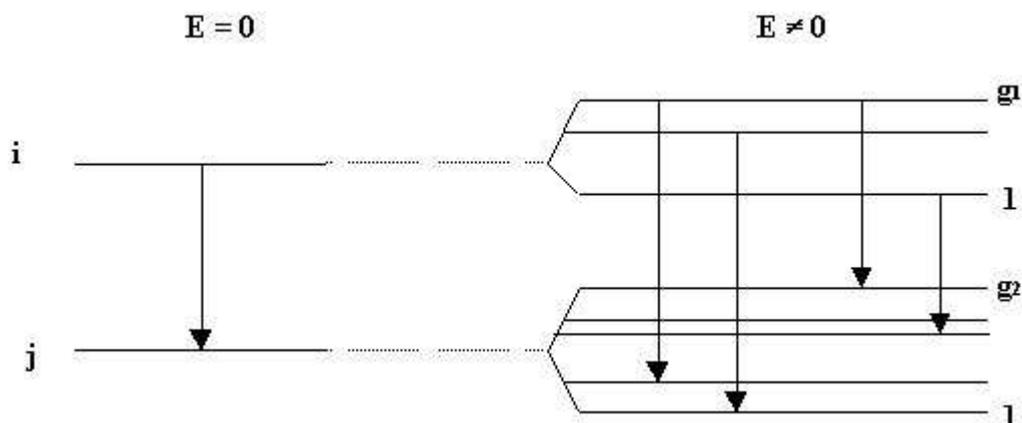


Figure (II.8) Effet Stark sous l'action d'un champ électrique cristallin

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.

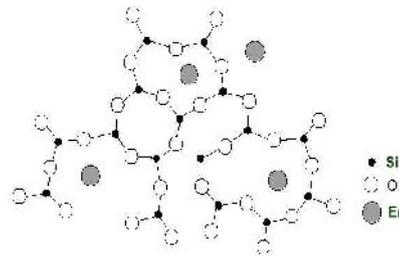
V.5 Élargissement homogène [12]

Chacune des $g_1 \times g_2$ transitions possibles, 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 (cœur de silice dopé), des ions erbium et est d'autant plus important que la température est élevée.

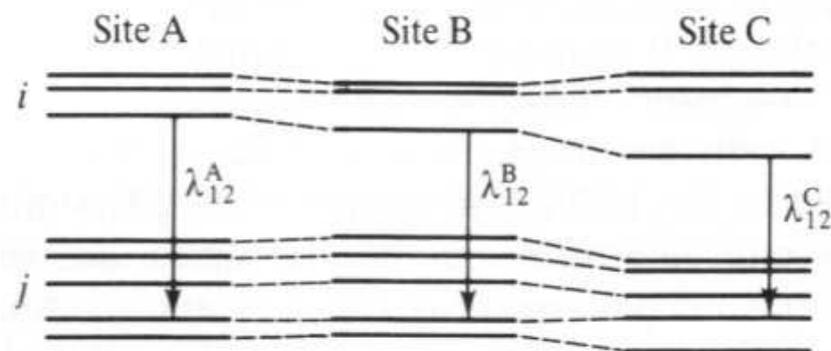
V.6 Élargissement inhomogène [12]

Chaque ion erbium occupe un site particulier dans la matrice hôte, leur répartition spatiale étant irrégulière.



Figure(II.9) : Représentation de la répartition des ions erbium dans une matrice de silice

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.



Figure(II.10) Effet de l'élargissement inhomogène en fonction des variations aléatoires du champ cristallin selon le site [12].

V.7 Conclusion

L'éclatement des niveaux d'énergie en sous niveaux stark, comme nous venons de le voir, augmente le nombre de transitions possibles entre les niveaux $^4I_{13/2}$ et $^4I_{15/2}$ et provoque un élargissement spectral des raies qui fait augmenter la bande passante optique au sein d'une fibre optique dopée erbium.

VI. Caractéristique d'un amplificateur optique [10]

Nous avons déjà défini le principe et les mécanismes de l'amplification optique. Nous allons maintenant nous intéresser plus précisément aux caractéristiques d'un amplificateur optique (évolution de la puissance optique dans la fibre, le gain, le bruit).

VI.1 Différent types de pompage optique

L'élément principal d'un amplificateur optique est la fibre optique dopée en erbium. Le système amplificateur est présenté de manière schématique et simplifiée sur la figure suivante :

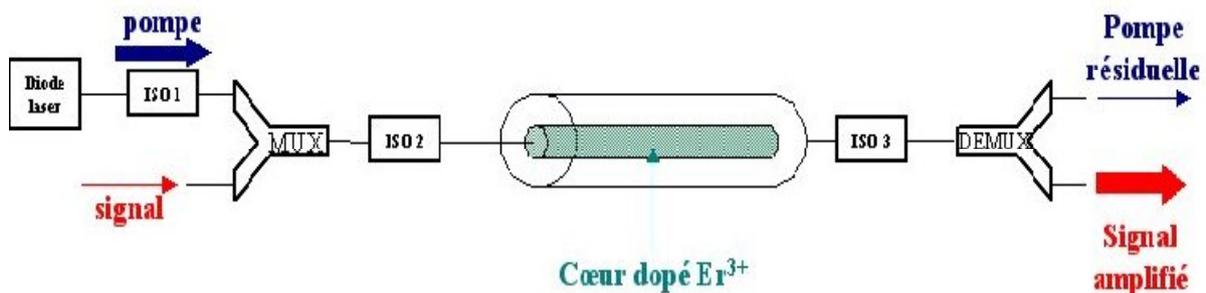


Figure (II.11) Schéma de principe d'un amplificateur optique

L'onde de pompe (de longueur d'onde λ_p) est délivrée par une diode laser et injectée dans la fibre optique simultanément avec le signal (de longueur d'onde λ_s) par l'intermédiaire d'un multiplexeur. Dans cette configuration, on parle de pompage co-propagatif, puisque le signal et l'onde de pompe se propagent dans le même sens. Des isolateurs peuvent être utilisés pour une meilleure stabilité de la puissance de pompe (ISO 1), ou pour éviter que la lumière ne sera pas perturbée (ISO 2). Dans la fibre optique dopée en erbium, le faisceau de la pompe est absorbé au profil du signal qui est amplifié. En sortie de fibre, on peut placer un autre isolateur (ISO 3) afin d'empêcher tout retour du signal de ligne vers la fibre amplificatrice. On peut placer également en sortie un démultiplexeur pour séparer le faisceau de pompe résiduel éventuel du signal ou un filtre ne laissant passer que le signal.

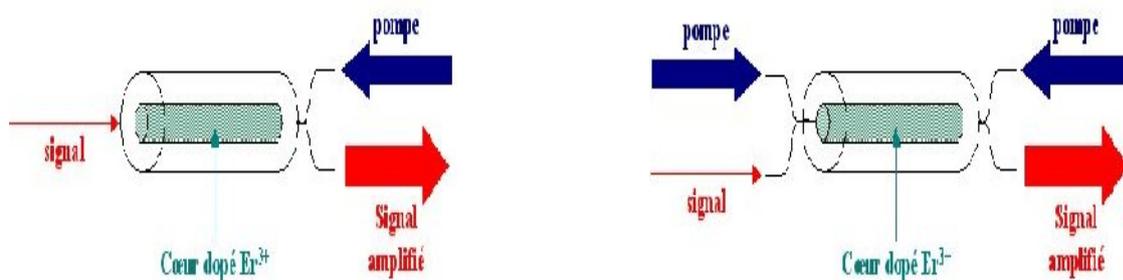
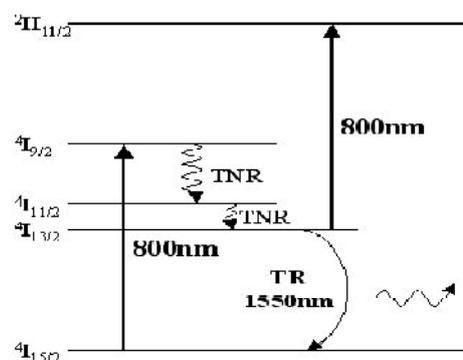


Figure (II.12) a) pompage contra-propagatif

b) pompage bidirectionnel

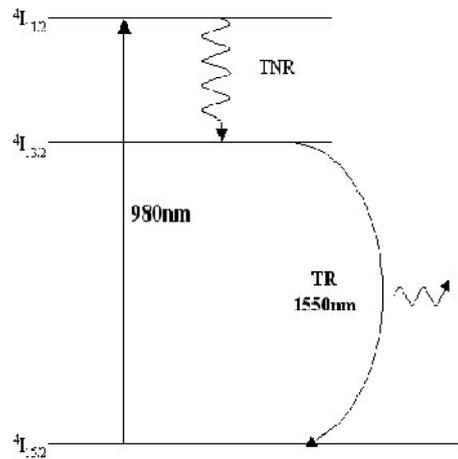
Dans le cas du pompage co-propagatif, la puissance de pompe est suffisamment forte au début de fibre amplificatrice, pour exciter une forte proportion des ions erbium et créer une forte inversion de population. Le signal est donc fortement amplifié dès les premiers mètres de fibre. Au cours de la propagation, la puissance de 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 et le signal est absorbé. Sur la figure (12.a) a été représenté le cas d'un pompage contra-propagatif où la pompe et le signal ont des directions de propagation opposées. Dans ce cas, 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 à bruit se trouve dégradé. Les deux types de pompages peuvent être utilisés simultanément (figure 12.b) afin d'obtenir des performances optimales. L'inconvénient de cette configuration est qu'elle est plus complexe et plus coûteuse puisqu'elle nécessite un plus grand nombre de composants. Par la suite, nous ne considérons que le cas du pompage co-propagatif qui est la configuration la plus utilisée. Plusieurs longueurs d'onde peuvent être utilisées pour le pompage. Les longueurs d'onde les plus utilisées sont 800nm, 980nm et 1480nm et permettent d'obtenir respectivement des systèmes amplificateurs à 3 ou 4 niveaux ou de type quasi 3 niveaux (figure 13).

Le premier type de pompage considéré est le pompage à 800nm qui peut être réalisé grâce à des diodes lasers. Sur la figure (II.13), on note qu'un faisceau de pompe à 800nm permet d'exciter les électrons du niveau fondamental jusqu'au niveau $^4I_9/2$. Deux transitions non radiatives ($^4I_9/2$ vers $^4I_{11/2}$ et $^4I_{11/2}$ vers $^4I_{13/2}$) permettent aux ions de se désexciter vers le niveau métastable $^4I_{13/2}$. Comme nous l'avons vu précédemment, la désexcitation stimulée des ions erbium du niveau métastable vers le niveau fondamental par une onde signal autour de 1550nm, permet l'amplification de ce signal.



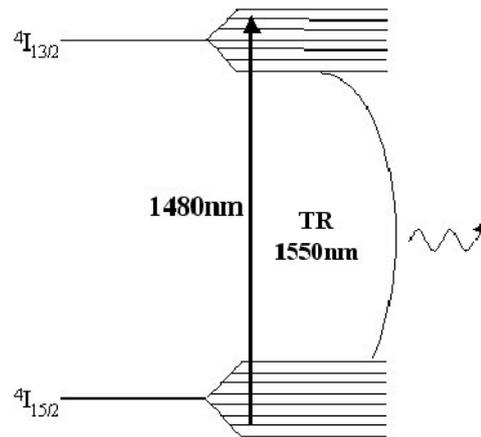
Figure(II.13) Niveaux d'énergie mis en jeu pour un pompage à 800nm dans le cas de l'ion erbium.

Le deuxième type de pompage peut être obtenu avec un faisceau ayant une longueur d'onde de 980nm figure(II.14). Dans ce cas, on est en présence d'un système à trois niveaux .Un photon de pompe à 980nm permet d'exciter un électron du niveau fondamental $^4I_{15/2}$ 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. Un signal de longueur d'onde proche de 1550nm pourra alors être amplifié de la même manière que lors d'un pompage à 800nm. L'ion erbium présente une émission autour de 980nm ce qui permet de réaliser presque complètement l'inversion de population.



Figure(II.14) Niveaux d'énergie mis en jeu pour un pompage à 980nm dans le cas de l'ion erbium.

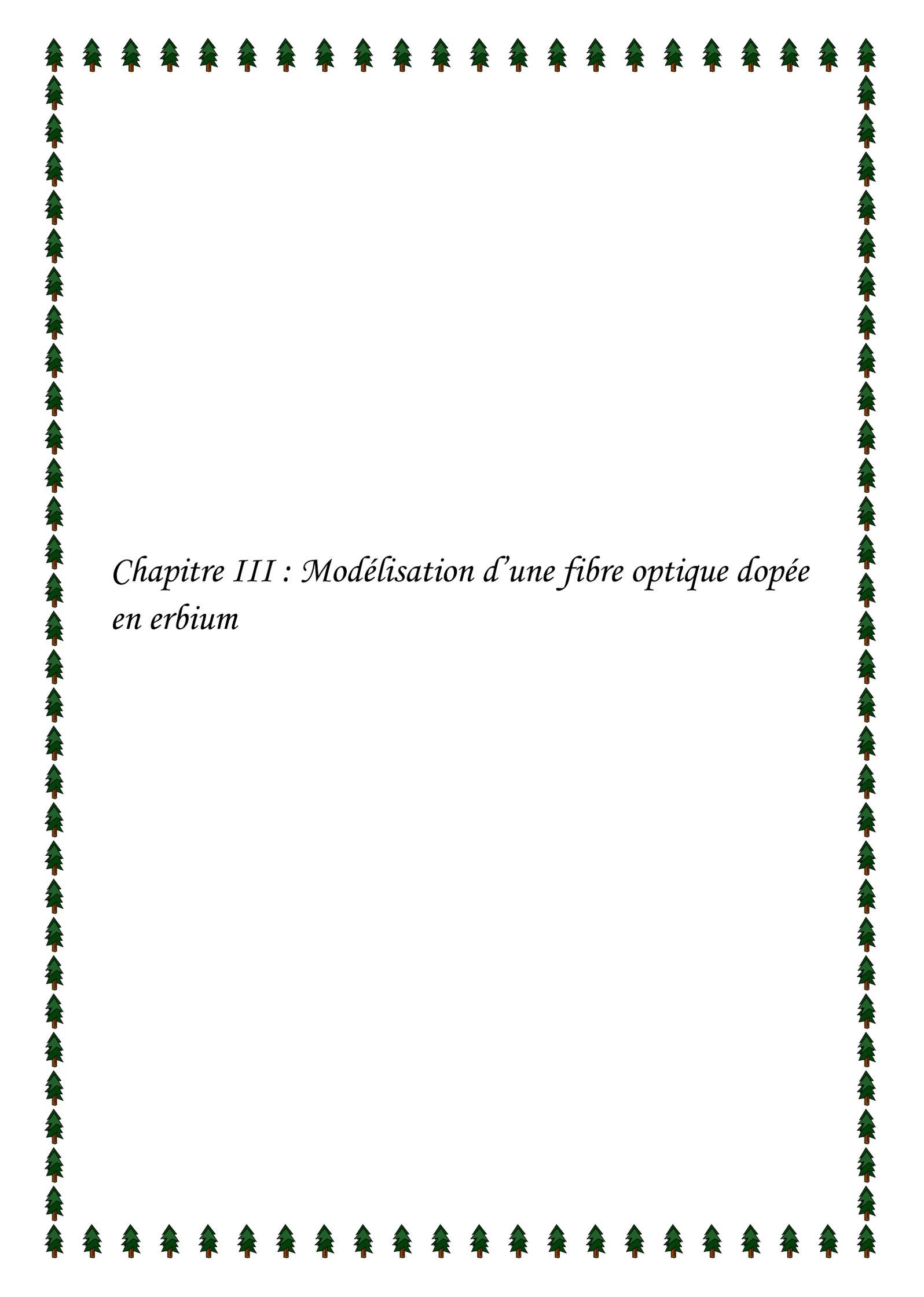
Enfin, un pompage à 1480nm peut également être utilisé. En première approche, il semble que l'on se trouve alors en présence d'un système à deux niveaux. Cependant, l'éclatement des niveaux discrets en sous niveaux stark fait apparaître un fonctionnement de type quasi-3niveaux figure (II.15). Les ions erbium au niveau fondamental directement excités vers le niveau métastable $^4I_{13/2}$. Ce type de pompage permet lui aussi d'obtenir de fortes valeurs de gain mais le rapport signal à bruit est plus faible qu'avec un pompage à 980nm, et il se dégrade d'autant plus vite que la puissance d'entrée est faible. Le pompage à 1480nm ne permet pas d'obtenir une forte inversion de population d'où une dégradation du rapport signal à bruit. Notons que les longueurs d'onde de signal et de pompe étant proches, il ya peu de déperdition d'énergie dans le processus « absorption d'un photon-émission d'un photon signal ».



Figure(II.15) Niveaux d'énergie mis en jeu pour un pompage à 1480nm dans le cas de l'ion erbium.

VI.2 Conclusion

Par la suite, nous choisirons le pompage à 980nm puisqu'il permet de concilier un gain élevé avec une diminution du rapport signal à bruit relativement réduite.



*Chapitre III : Modélisation d'une fibre optique dopée
en erbium*

I. Introduction

Le principe général d'un amplificateur optique repose sur le phénomène de l'émission stimulée. Le signal lumineux à amplifier se propage dans un guide d'onde (tronçon de fibre amplificatrice dopée) qui présente le gain.

Ce gain est obtenu dans le cas de l'amplificateur à fibre dopée erbium (EDFA pour Erbium-doped fiber amplifier) en créant une inversion de population des ions Erbium qui ont été implantés dans le guide. Ces ions doivent au minimum posséder une transition radiative autour de la longueur d'onde du signal à amplifier, dans cette première partie le signal est autour de 1550 nm. L'inversion de population est réalisée par pompage optique, via une source laser externe. L'augmentation de l'intensité du signal au cours de sa propagation dans le guide résulte d'un transfert d'énergie de l'onde pompe vers l'onde signal via un processus d'émission stimulée [20].

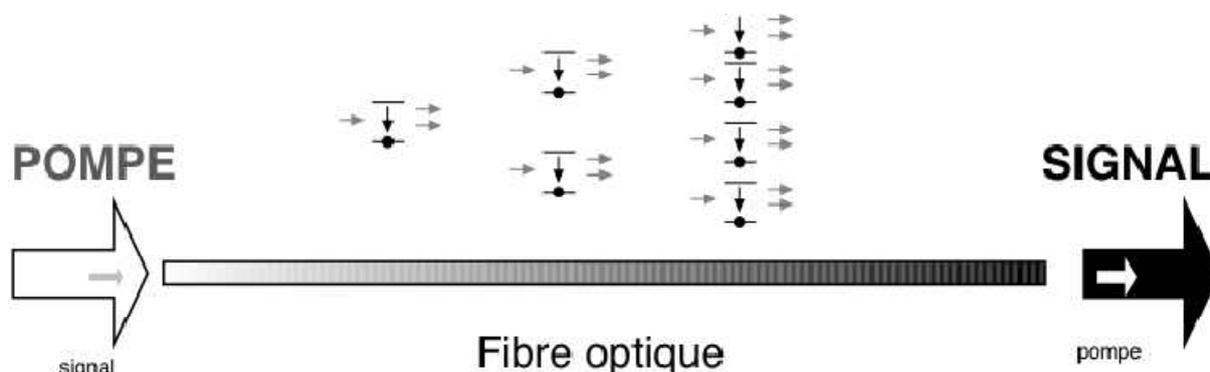


Figure (III.1) : le transfert d'énergie de l'onde de pompe vers l'onde signal [20].

II. Equations d'évolutions [10]

Dans le cadre de notre étude, nous considérons le cas de fibres optiques dopées Er^{3+} destinées à l'amplification autour de 1550 nm pour les télécommunications optiques. Nous allons maintenant déterminer les équations qui régissent l'évolution des puissances de pompe, de signal, dans le cas du pompage à 980 nm. L'objectif de ce travail est de connaître les valeurs de ces grandeurs en fonctions des paramètres tels que ; la longueur de la fibre ou la concentration en ions dopants. Une fois ces relations définies, il sera possible d'accéder au gain de la fibre amplificatrice dopée en erbium.

Nous rappelons les niveaux et les différentes transitions mis en jeu pour l'amplification de signaux à 1550nm par l'ion erbium pompé à 980nm. On définit par « taux de transition » entre deux niveaux, le nombre de transition par seconde entre ces niveaux.

Nous allons utiliser un modèle pour bien saisir le principe. Un système à trois niveaux de L'erbium (Er^{+3}) connu en communications optiques est représenté au dessous (figure (2)).

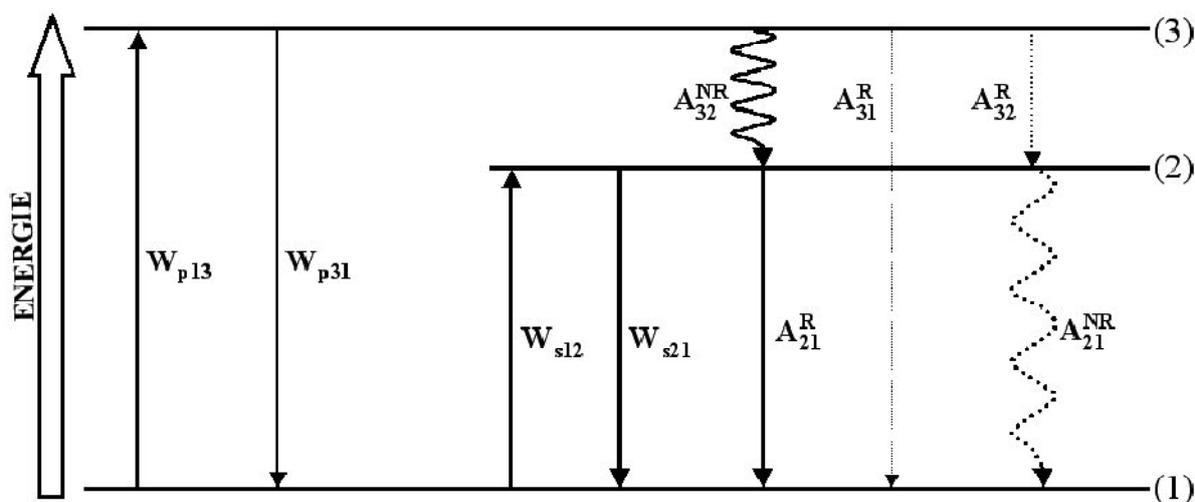


Figure (III.2) Diagramme d'énergie de l'ion erbium et les différentes transitions entre les niveaux d'énergie Lors d'un pompage à 980 nm (A : transition spontanée, W : transition stimulée) [10]

Les niveaux (1), (2) et (3) correspondent respectivement aux niveaux $^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ et $^4\text{I}_{11/2}$. W_{p13} représente le taux d'absorption d'un photon de pompe par un ion du niveau (1) et W_{p31} est le taux d'émission stimulée à la longueur d'onde de pompe. Pour obtenir les meilleures performances en terme d'amplification, nous savons qu'il faut chercher une inversion de population la plus grande possible, voire quasi-totale. Pour cela, les ions actifs doivent avoir une forte valeur de W_{p13} et un taux W_{p31} faible, afin qu'une proportion maximale d'entre eux soit excitée par la pompe vers le niveau (3) et puisse participer au processus d'amplification.

On peut remarquer l'existence de nombreuses transitions à partir du niveau (3). On note A_{31}^R et A_{32}^R les taux de transitions radiatives respectivement de (3) vers (1) et de (3) vers (2), et A_{32}^NR le taux de transition non radiative de (3) vers (2). Par la suite on considérera que A_{31}^R est suffisamment grande devant W_{p31} , A_{32}^R et A_{32}^NR pour que ces trois taux puissent être négligés. On note W_{s12} et W_{s21} respectivement les taux d'absorption et d'émission stimulée du signal.

W_{s12} est d'autant plus faible et les performances en termes de gain de l'amplificateur sont d'autant meilleures que l'inversion de population est plus élevée. Enfin, on note A_{21}^R et A_{21}^NR les taux de transitions radiatives et non radiatives dues à la désexcitation spontanée des ions au niveau $^4\text{I}_{13/2}$. Dans le cas de l'erbium, on a $A_{21}^R \gg A_{21}^NR$, on pourra par la suite

négliger le taux de transition non radiative du niveau (2) vers (1). On note généralement la durée de vie du niveau métastable $^4I_{13/2}$ et on montre que $\tau_{sp} = 1/\dots$.

III. Equations d'évolution des densités volumiques de population [10]

On appelle N_1 , N_2 et N_3 les densités volumiques de population des niveaux d'énergie (1), (2) et (3). Compte tenu des simplifications citées ci-dessus, les variations de densités de population des différents niveaux sont données par les relations suivantes :

$$\frac{dN_1}{dt} = -N_1 \left(\frac{1}{\tau_{sp1}} + \sigma_{21} \Phi \right) + N_2 \sigma_{12} \Phi + N_3 \sigma_{31} \Phi \quad (\text{III.1})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1 \sigma_{21} \Phi - N_2 \left(\frac{1}{\tau_{sp2}} + \sigma_{12} \Phi \right) + N_3 \sigma_{32} \Phi \quad (\text{III.2})$$

$$\frac{dN_3}{dt} = N_2 \sigma_{32} \Phi - N_3 \left(\frac{1}{\tau_{sp3}} + \sigma_{23} \Phi \right) \quad (\text{III.3})$$

On appelle ρ_{er} la densité volumique d'ions erbium contenue dans l'amplificateur. C'est la somme des densités volumiques de population des niveaux d'énergie peuplés, c'est-à-dire les niveaux (1), (2) et (3).

$$\rho_{er} = N_1 + N_2 + N_3 \quad (\text{III.4})$$

La durée de vie des ions erbium sur le niveau (3) étant très faible, on peut négliger la valeur de N_3 dans l'expression ci-dessus.

IV. Caractéristiques de la fibre amplificatrice dopée en erbium [13].

IV.1. Gain de la fibre amplificatrice dopée en erbium et la puissance de saturation

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

$$\frac{dN_1}{dz} = -N_1 \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{L} \Gamma \right] + N_2 \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{L} \Gamma \right] \quad (\text{III.5})$$

Avec :

L : La longueur d'onde du signal injecté.

σ_e, σ_a : Sections efficaces d'émission et d'absorption respectivement.

$N_{i=1,2}$: Densité de population, donne le nombre d'atomes dans un même état d'excitation.

Γ : Facteur de recouvrement traduisant le recouvrement entre la région dopée en ions Er^{3+} et la répartition transverse de la puissance du signal.

On en déduit alors l'expression du gain:

$$\frac{dN_1}{dz} = -N_1 \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{L} \Gamma \right] + N_2 \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{L} \Gamma \right] \quad (\text{III.6})$$

Sachant que l'expression différentielle de la variation de la densité volumique de population du niveau fondamental en fonction du temps est donnée par [10]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -N_1 \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{L} \Gamma \right] + N_2 \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{L} \Gamma \right] \quad (\text{III.7})$$

Γ : Facteur de recouvrement traduisant le recouvrement entre la région dopée en ions Er^{3+} et la répartition transverse de la puissance de la pompe.

L : la longueur d'onde de la pompe injectée.

h : la constante de Planck $6.626 \cdot 10^{-34}$ j/s

C : la vitesse de la lumière $3 \cdot 10^8$ m/s.

✚ De cette expression du gain on tire les remarques suivantes :

Pour une longueur fixe de la fibre amplificatrice, l'équation (III.6) confirme que plus le niveau fondamental dépeuplé au profit du niveau métastable (N_2 proche de ρ_{er} - et N_1 proche de 0), plus le gain est grand. Cette confirmation peut être obtenue en disposant d'une puissance de pompe élevée et d'un bon recouvrement du champ de faisceau de pompe avec la région dopée.

IV.2. Bruit dans la fibre amplificatrice dopée en erbium [12]

La désexcitation spontanée d'atomes du niveau métastable vers le niveau fondamental s'accompagne de l'émission de photons qui ne sont pas corrélés avec les photons « signal », et qui constituent une source de bruit vis à vis du signal à amplifier. Parmi ces photons, seuls ceux qui sont dans le cône d'ouverture numérique de la fibre peuvent se propager. Au cours

de leur propagation, ils provoquent la désexcitation d'atomes du niveau métastable, induisant ainsi l'amplification du bruit au détriment du signal : c'est l'émission spontanée amplifiée ASE (Amplified Spontaneous Emission).

En régime de fonctionnement non saturé (signal faible ne consommant que peu d'inversion de population), la puissance d'ASE en sortie d'un amplificateur uniformément dopé est donnée par la relation:

$$P_{ASE} = 2 * (G - 1) * h * \nu * \Delta \quad (III.8)$$

Où Δ est la largeur spectrale de bruit, G le gain moyen de l'amplificateur et ν le facteur d'émission spontanée, également appelé facteur d'inversion de population, qui est défini par la relation:

$$\nu = \frac{A_{21}}{A_{21} + A_{31}} \quad (III.9)$$

Dans le cas d'une forte inversion de population (c'est-à-dire $N_2 \gg N_1$), le facteur d'inversion de population est proche de 1.

IV.3. Durée de vie des niveaux d'énergie de l'erbium [4]

Une fois un électron 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 ; On considère que l'électron « vit » sur un niveau pendant un certain temps après excitation.

Le niveau 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.

IV.4. La fluorescence [18]

Une molécule fluorescente (d'erbium) possède la propriété d'absorber de l'énergie lumineuse (lumière d'excitation) et de la restituer rapidement (< 1 nsec) sous forme de lumière fluorescente (lumière d'émission).

Une fois l'énergie du photon absorbée, la molécule se trouve alors dans un état excité, généralement un état singlet. Le retour à l'état fondamental peut alors se faire de différentes manières. L'une d'elle est l'émission d'un photon, c'est le phénomène de **fluorescence**.

La fluorescence des transitions de l'ion erbium est la propriété d'absorber un rayonnement et de l'émettre à nouveau à une longueur d'onde plus grande. Elle dépend de l'effet Stark et des élargissements homogènes et inhomogènes des raies. Leur forme et leur largeur vont donc varier en fonction de la matrice hôte (cœur de silice dopé en erbium) et permet de suivre l'évolution temporelle d'une population excitée d'ions erbium et ainsi de distinguer des processus radiatifs et non radiatifs.

L'intensité de fluorescence dépend de la nature de l'état électroniquement excités par les ions erbium ou plus précisément du moment de transition et de la population excitée.

L'intensité de la fluorescence des ions Er^{3+} à 1540 nm est donnée par :

$$I_f = \frac{P}{A} \cdot \tau \cdot [1 - \exp(-\sigma \cdot \Phi \cdot \tau)] \quad (\text{III.10})$$

Où

$$\tau = \frac{\tau_{spont}}{\sigma \cdot \Phi} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

τ : La durée de vie du niveau métastable $^4I_{13/2}$

P : La puissance de la pompe (diode laser intense) ou de signal

Φ : Flux de photons de la pompe ou de signal

A : section du faisceau signal ou de pompe

V. Simulation de la fibre optique amplificatrice dopée en erbium

Cette simulation établie avec logiciel de calcul MATLAB concerne les différentes caractéristiques de la fibre optique amplificatrice dopée, permettant d'optimiser ses performances et en particulier son gain G et sa puissance de sortie et son intensité de fluorescence.

V.1.Résultats Et Interprétation

En tenant, compte des paramètres spectroscopiques d'une fibre optique monomode dopée Erbium. Nous présentons dans le tableau ci-dessous les différentes caractéristiques de la fibre obtenues à partir de notre modèle mathématique.

Symbole	Signification	Valeur	Unité
	Puissance de la pompe	[0,60]	mw
	Puissance du signal	[0,10]	mw
	La longueur d'onde du signal	1550	nm
	La longueur d'onde de la pompe	980	nm
	La densité en ions erbium	$[10^{14}, 10^{24}]$	m^{-3}
Γ	Facteur de confinement pour la pompe	1	
Γ	Facteur de confinement pour le signal	1	
	Le coefficient d'atténuation	0.00031	dB/Km
	La durée de vie radiative	10^{-2}	s
	La durée de vie non radiative	10^{-5}	s
	Ouverture numérique	0.005	
	La fréquence normalisée	$\ll 2.405$	
	Section du faisceau signal ou de pompe	10^{-11}	m^2
Δ	La largeur spectrale de bruit	1	nm
	Rayon du cœur de la fibre amplificatrice dopée	2	m
	Section efficace d'émission	$[10^{-17}, 10^{-25}]$	m^2
	Section efficace d'absorption	$[10^{-17}, 10^{-25}]$	m^2
	La longueur de la fibre dopée	[0.5, 30]	m

V.2. Variation du gain en fonction de la puissance de la pompe = ()

On montre dans ce cas l'évolution du gain en fonction de la puissance de la pompe laser P_p pour différentes valeurs de la longueur de la fibre dopée en erbium.

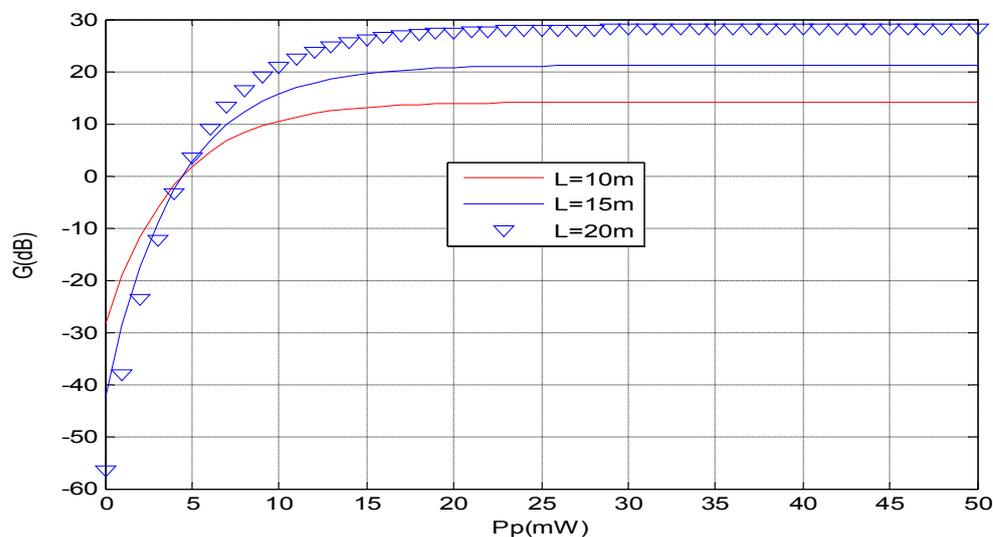


Figure (III.3) Variation du gain en fonction de la puissance pompe, pour $L=10m$, $15m$, $20m$

Cette courbe montre que le gain augmente rapidement avec la puissance de la pompe, puis au delà de $15mW$, commence à varier lentement. On relève aussi que le gain varie avec la longueur de la fibre. Plus la longueur de la fibre dopée augmente le gain est meilleur.

V.3. Variation de la puissance de sortie dans la fibre dopée en fonction de la pompe

On montre dans ce cas la variation de la puissance de sortie en fonction de la puissance de la pompe laser P_p pour différentes valeurs de la puissance d'entrée.

La figure ci dessous montre que lorsqu'on fixe la longueur de la fibre et on fixe la concentration d'ions erbium, la puissance à l'entrée de la fibre optique dopée augmente rapidement avec la puissance de la pompe, puis, commence à varier lentement jusqu'à la saturation.

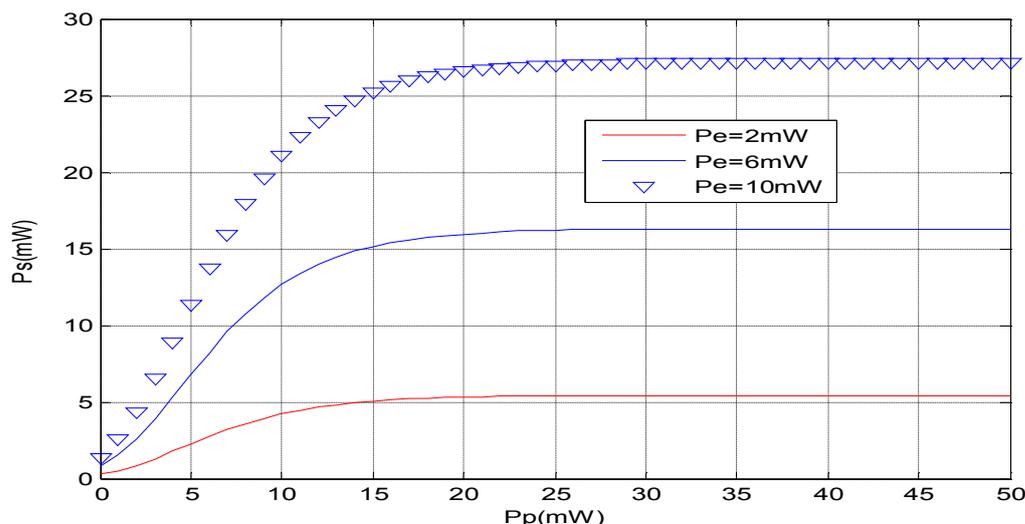
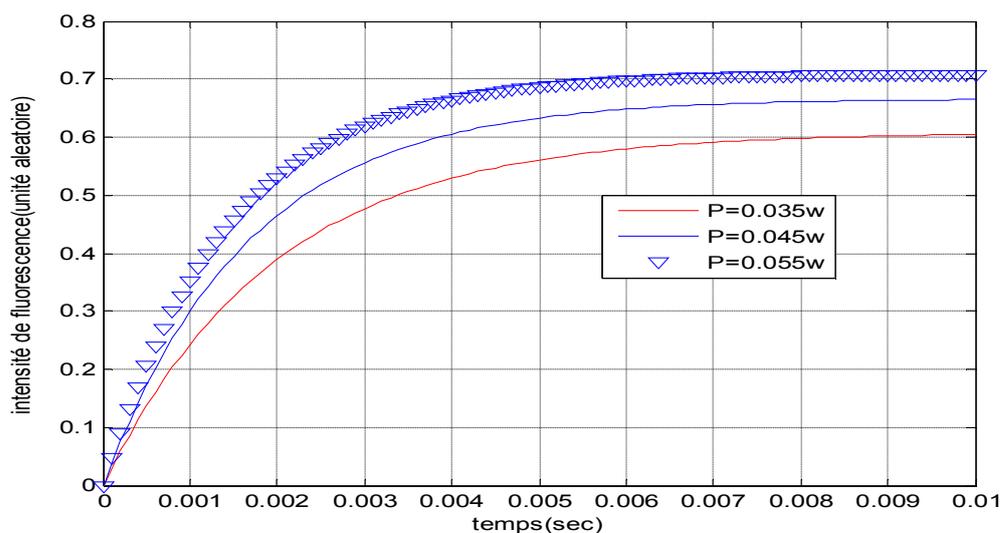


Figure (III.4) Variation de la puissance de sortie en fonction de la puissance de la pompe, pour : différentes valeurs de la puissance d'entrée $P_e = 2\text{ mW}$, 6 mW , 10 mW .

V.4. Variation de l'intensité de la fluorescence en fonction du temps

Dans ce cas l'intensité de la fluorescence dépend du nombre de photons stimulés dans la fibre dopée et de la puissance de la pompe d'excitation. Elle est maximale pour une certaine période (temps donné).

La figure ci dessous montre l'évolution de cette intensité lumineuse au sein des deux niveaux énergétiques respectivement métastable et fondamental des ions erbium dans la fibre.



Figure(III.5): Variation de l'intensité de la fluorescence en fonction du temps, pour : différentes valeurs de la puissance de pompe $P = 0.035\text{ w}$, 0.045 w , 0.055 w .

VI. Exemple d'application d'un tronçon de fibre optique dopée en erbium

Comme nous savons tous, l'objectif de tout système de télécommunication optique est de transmettre toutes sortes d'informations le plus loin possibles avec le minimum de pertes de ces informations. Dans cet exemple on va assurer la restitution de la transmission d'une information, de puissance (0.02watt) pour une distance qui dépasse 100 Km.

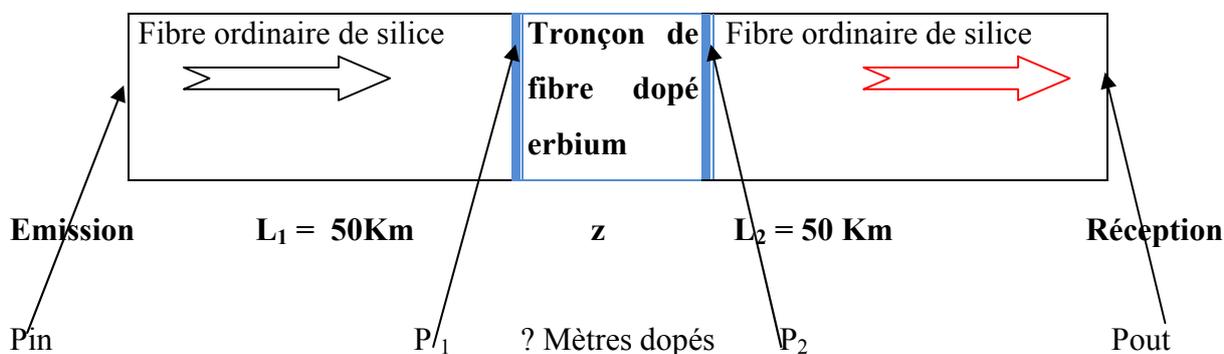


Figure (III.6) Fibre optique ordinaire connectée avec un tronçon de fibre dopée en erbium.

Soit P_{in} : la puissance de l'information à transmettre

P_1 : la puissance du signal arrivé au début de la fibre dopée

P_2 : la puissance du signal en sortie de la fibre dopée

P_{out} : la puissance de l'information transmise restituée en réception

VI.1.Influence de la distance

Considérons un tronçon de fibre simple de la longueur L_1 , et supposons toute l'atténuation provient de la diffusion Rayleigh. Pendant la propagation de la lumière dans cette longueur, la puissance va subir une décroissance due à la diffusion.

Ainsi l'écart de puissance entre la sortie et l'entrée est [2] :

$$P(z) = P_1 \exp(-\alpha z) \quad (\text{III.12})$$

Sachant que le coefficient d'atténuation dans le cas d'une fibre monomode est infiniment petit

Soit $\alpha = 0.000031 \text{ dB/m}$.

VI.2.Processus d'amplification dans un tronçon de fibre dopée en erbium

L'équation de base du bilan photonique global entre les photons entrant et sortant de la fibre optique amplificatrice dopée en erbium est donnée sous la forme suivante [17].

$$P_{out} = [P_{in} - (N_t \Gamma \sigma_a + \sigma_e) P_{in} L] \quad (III.13)$$

Avec :

L : la longueur de la fibre amplificatrice

N_t : la concentration moyenne en erbium

Γ : Facteur de recouvrement entre les ions excités et le signal à la fréquence

σ_a : Somme des sections efficaces d'émission et d'absorption à la fréquence

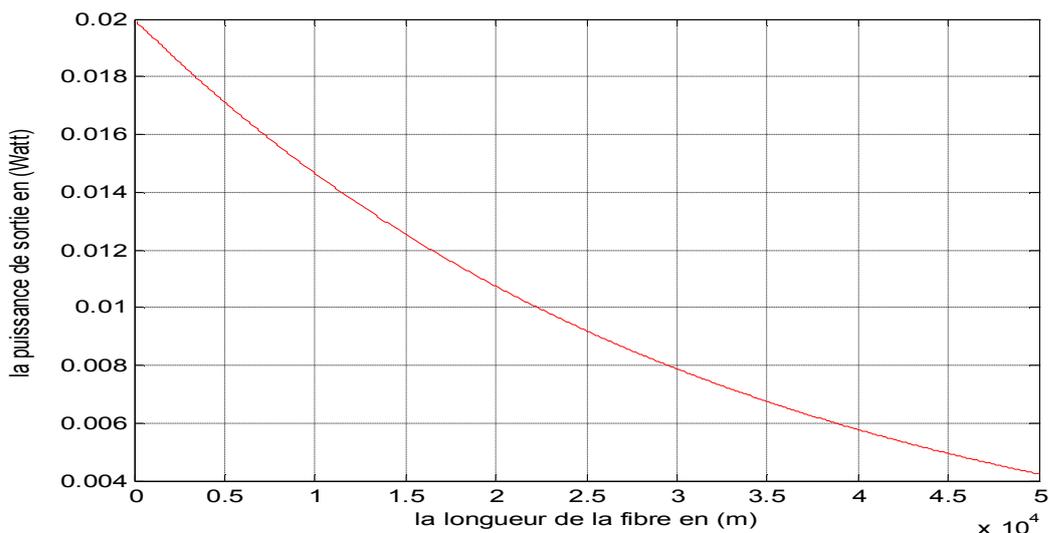
VI.3.Résultats et interprétations

Nous présentons dans le tableau ci-dessous les caractéristiques de la fibre dopée ainsi que celles de la fibre ordinaire, selon les modèles mathématiques qu'on a utilisés.

Symbole	Signification	Valeur	Unité
	La puissance à l'entrée de la fibre ordinaire	0.02	watt
	La puissance à l'entrée de la fibre dopée	0.0042	watt
	La concentration moyenne en ions erbium	8.5*10 ²³	m ⁻³
	La section efficace d'absorption	6.17*10 ⁻²⁵	m ²
=	La longueur de la fibre dopée en erbium	5.92	m
	La puissance à la sortie de la fibre dopée	0.0937	Watt
	La puissance restituée en sortie de la fibre ordinaire	0.02	Watt

VI.4.L'atténuation de la puissance de signal d'entrée

Dans cette figure on voit bien qu'à l'entrée de la fibre optique ordinaire on a envoyé une information de puissance égale à (0.02 watt) qui se propage sur une longueur L₁=50Km. Pendant ce trajet la puissance s'affaiblit jusqu'à 0.0042 (watt). On considère cette puissance, la puissance à l'entrée de la fibre dopée erbium P₁.



Figure(III.7) l'atténuation de la puissance d'entrée après avoir parcourue 50km dans la fibre ordinaire.

VI.5.Effet de la fibre dopée en erbium sur la puissance atténuée

Le signal reçu au niveau de la fibre dopée sera amplifiée en agissant sur le dopage d'un tronçon de fibre et sur la longueur de la fibre dopée. Ainsi la section du faisceau de pompe qui permet l'inversion de population des ions erbium.

Pour une longueur de 5.92 m et de concentration en ions erbium de $8.5 \times 10^{23} / \text{m}^3$ et de section efficace de $6.17 \times 10^{-25} \text{ m}^2$.on assure l'amplification du signal emis jusqu'à 0.0937watt , comme nous montre la figure ci-dessous

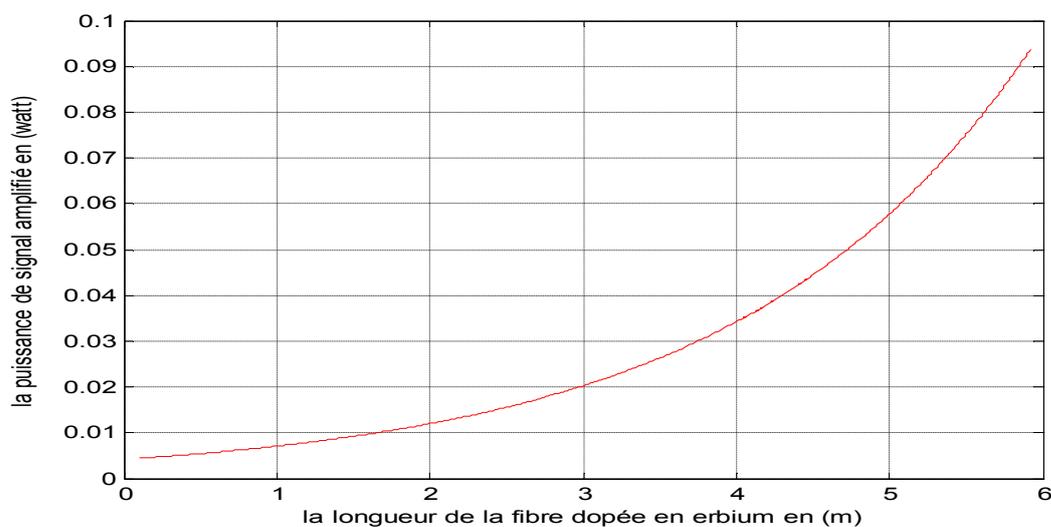
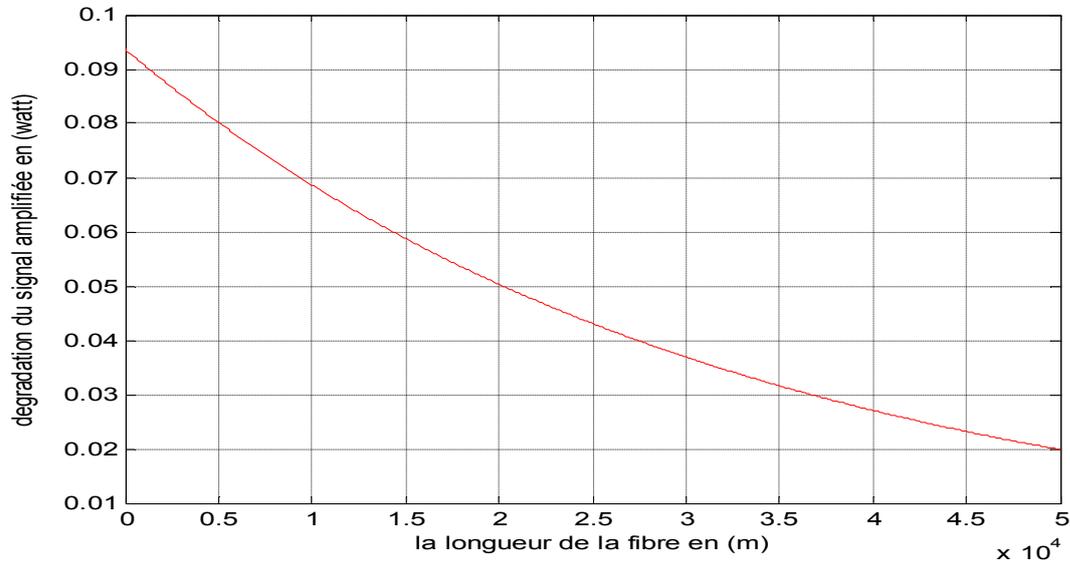


Figure (III.8) l'amplification de la puissance du signal d'entrée de la fibre dopée.

VI.6. La restitution de la puissance originale en sortie de la fibre ordinaire

La puissance amplifiée P_2 de valeur 0.0937 watt parcourt encore une fois 50Km à partir de la sortie de la fibre dopée arrivant en sortie de la fibre ordinaire de la même puissance transmise comme le montre la figure ci-dessous :



Figure(III.9) la récupération de la puissance originale.

Maintenant on va bien présenter (résumer) dans une seule figure l'exemple d'application cité précédemment. Le phénomène d'atténuation qui est dû à l'influence de la distance sur la propagation du signal sera corrigé et compensé par une amplification du signal qui est due à l'étude d'un tronçon de fibre dopée en erbium.

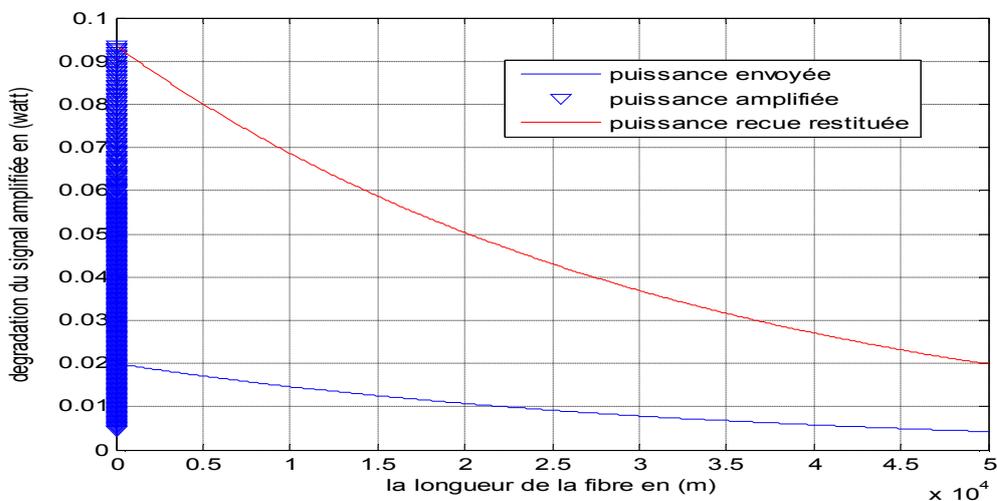


Figure (III.10) Phénomène d'atténuation et d'amplification d'un signal.

VII. Conclusion

Afin d'assurer une meilleure transmission des informations pour les grandes distances, il suffit de jouer sur les paramètres essentiels de la fibre dopée erbium (longueur, concentration en ions erbium, la puissance de la pompe, section efficace. Etc.) Pour restituer l'information transmise quelque soit la distance.

VIII. Etude d'une liaison optique à base d'une fibre optique dopée en erbium sous le simulateur COMSIS (communication system interactive software) [13]

VIII.1 présentation du logiciel COMSIS

COMSIS est un logiciel de simulation de n'importe quelle chaîne de télécommunications avec ses différents modules les plus élémentaires au plus complet en se basant sur des schémas blocs des systèmes analogiques ou numériques. Ce simulateur est développé par une société française, IPSIS (Ingénierie Pour Signaux et Systèmes), basé sur la technopole de Renne. COMSIS offre la possibilité de constituer des bibliothèques à partir de programmes externes ou par association de modèles standard. Il représente une solution complète au problème de la modélisation et de la simulation. Ce simulateur fonctionne en interactif pour la mise au point de nouvelles applications ou en batch lorsqu'il s'agit de réaliser des études paramétriques : bruits, non linéarité, stabilité... c'est un environnement interactif qui rassemble des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur conviviale. Son principe repose sur les schémas-blocs.

A. Interface COMSIS

L'interface COMSIS comporte une fenêtre principale et une fenêtre alphanumérique.

A.1. La fenêtre principale :

Rassemble les deux types de fonctions de COMSIS, les fonctions d'édition de schémas-blocs et les fonctions de traitement.

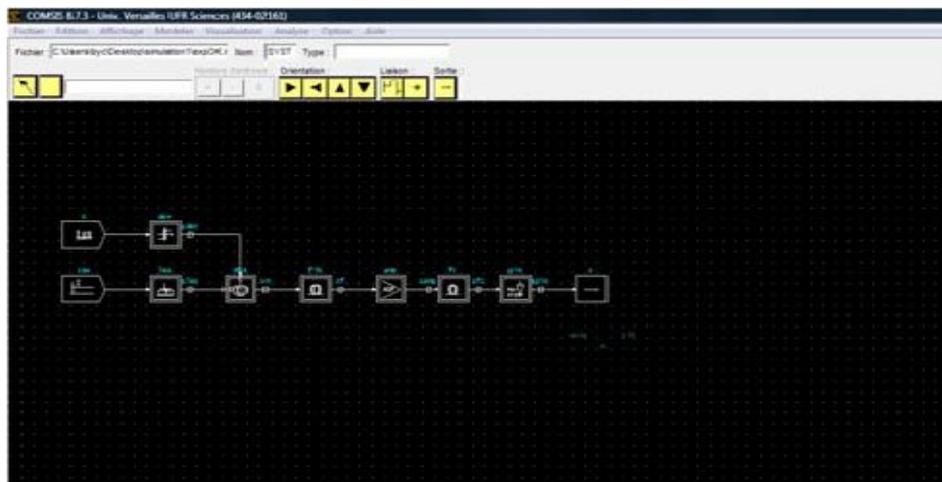


Figure (III.11) : Editeur de schéma-bloc.

La conception d'un schéma-bloc est assez simple il suffit de sélectionner les composants disponibles dans la bibliothèque à l'aide de la souris et les déposer sur la feuille du dessin (qui correspond à la partie visible de la feuille de dessin elle délimite la surface de tracé du système en cours de description. L'agrandissement, la réduction ainsi que la position de la zone de dessin sur la feuille de dessin sont respectivement contrôlés par les commandes de zoom et les barres de défilement), Ces modèles doivent être nommés et interconnectés entre eux. Une fois terminé on passe au paramétrage de ces derniers qui peut être numérique ou formel. La chaîne est maintenant complète et peut être analysée.

B. La fenêtre alphanumérique

Elle est utilisée au lancement d'une analyse pour insérer des paramètres de simulation ou pour afficher l'ensemble des messages ou informations édités, spontanément ou sur requêtes, par le logiciel au cours de son exécution.

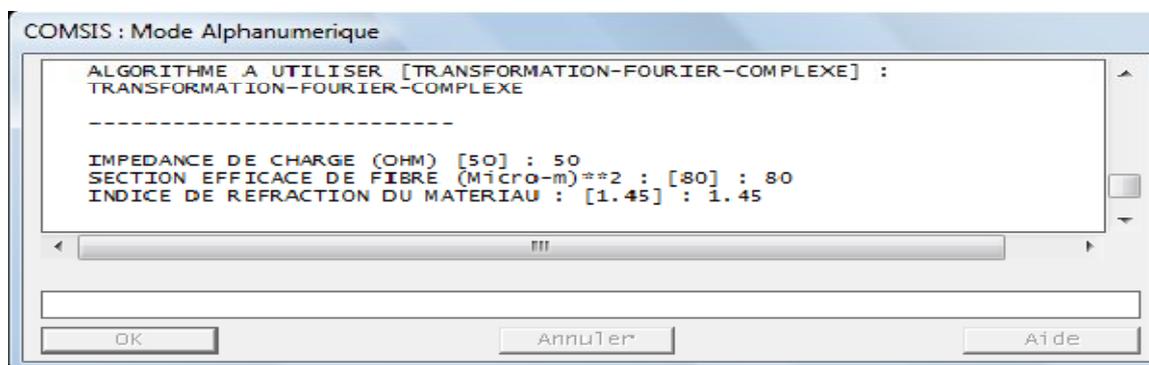


Figure (III.12) interface alphanumérique.

C. La bibliothèque

Elle contient tous types de modèles qui permettent de réaliser les différents schémas blocs: Entrées, régénérateurs, codeurs, modulateur, filtres,...

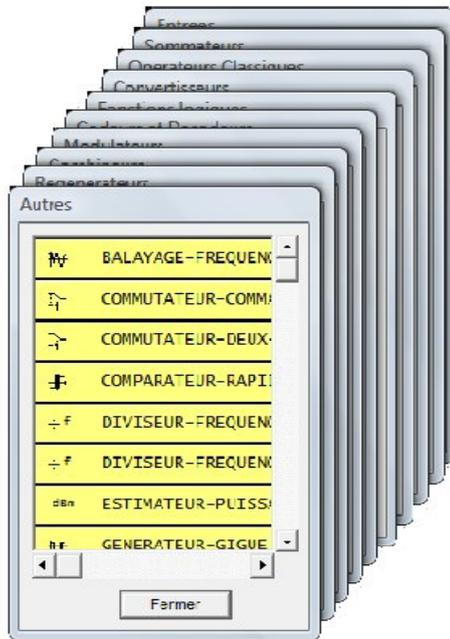


Figure (III.13) : La bibliothèque de modèle COMSIS.

D. Les différents types d'analyse :

Une fois la conception du schéma-bloc est terminée, COMSIS peut effectuer plusieurs types d'analyse (statique, stabilité, transfert de boucle,...) d'un composants, d'un opérateur fonctionnel, de la liaison entière ou partielle permettant de visualiser leurs performances ou leurs caractéristiques.

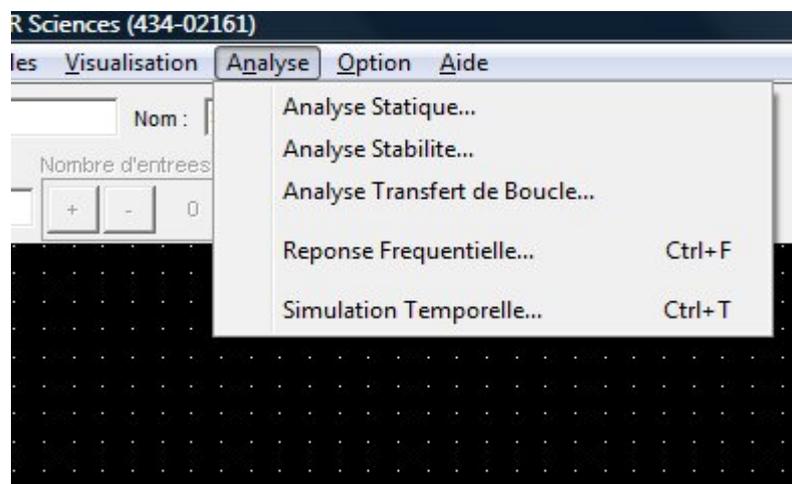


Figure (III.14) le menu d'analyse de COMSIS.

D.1. L'analyse statique

La commande analyse statique de menu analyse est utilisée pour visualiser les courbes caractéristiques d'un certain modèle. En activant cette commande la cohérence de schéma sera vérifiée, les calculs effectués et les courbes seront affichés dans la fenêtre graphique.

D.2. L'analyse de stabilité

L'activation de cette commande permet de calculer la réponse en fréquence et les marges de stabilité (phase, retard, module, module complémentaire) d'un sous-système linéaire. La visualisation graphique peut être présentée sous trois formes : diagramme de Bode, de Black et de Nyquist.

D.3. L'analyse de transfert de boucle

La commande Analyse Transfert de Boucle provoque le calcul de la réponse en fréquence et des marges de stabilité des boucles. COMSIS édite les résultats sous la même forme que pour l'analyse de stabilité.

D.4. La réponse fréquentielle

Cette commande permet de calculer la réponse fréquentielle d'un opérateur de filtrage non rationnel ou d'un sous-système rationnel. Le logiciel vérifie toujours la cohérence du schéma. Lorsque le calcul est terminé, COMSIS affiche la réponse fréquentielle en amplitude, en phase et en temps de propagation de groupe.

D.5. La simulation temporelle

La commande Simulation Temporelle du menu Analyse permet de déterminer la réponse d'un système à des signaux dans le domaine temporel. Cette analyse est légèrement différente car elle ne concerne plus l'analyse d'un opérateur mais plutôt l'analyse du signal envoyé pendant sa transmission. A l'issue de la simulation, la fenêtre d'Evaluation des Performances propose différents traitements sur les variables simulées.

VIII.2. La visualisation et le traitement des résultats

La simulation temporelle est l'analyse permettant le plus grand nombre de possibilités dans l'exploitation des résultats. Les autres analyses affichent directement le résultat demandé dans la fenêtre graphique. Durant la simulation, un écran de contrôle permet de suivre l'état d'avancement des calculs. A la fin de la simulation, la fenêtre d'Evaluation des Performances propose plusieurs possibilités.

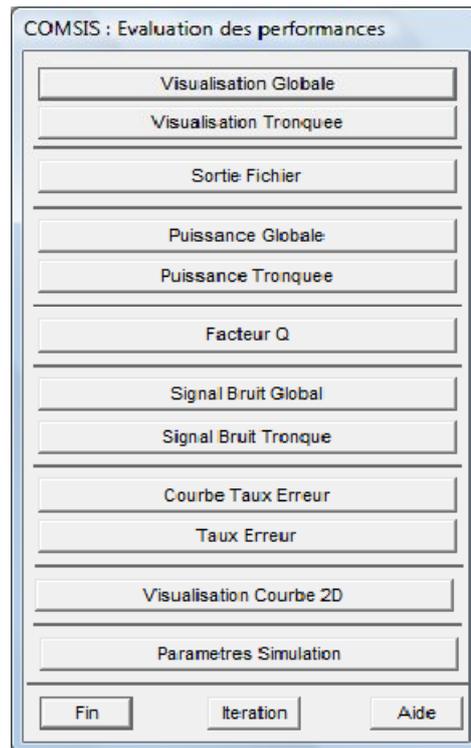


Figure (III.15) Fenêtre d'évaluation des performances.

A. Visualisation des résultats de simulation

La commande Visualisation affiche les variables calculées, soit directement dans le domaine temporel, soit après qu'elles aient subi un prétraitement. Lorsque cette commande est activée, la fenêtre Variables et Prétraitements apparaît et donne accès aux choix de ces traitements à effectuer et des variables simulées sur lesquels les effectuer.

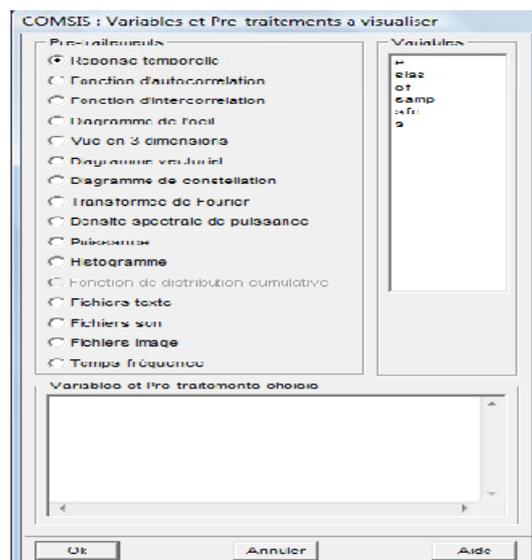


Figure (III.16) Fenêtre variables et prétraitement à visualiser.

VIII.3. Etude d'une chaîne de base pour transmission optique à fibre dopée erbium

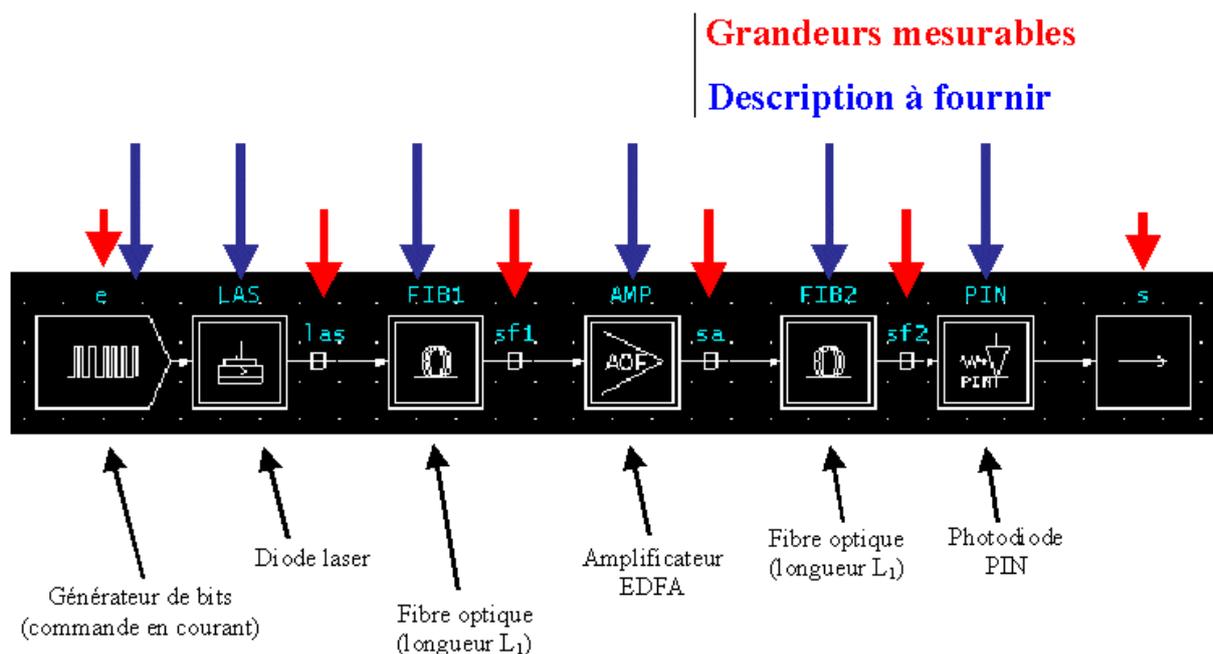


Figure (III.17) Synoptique de la liaison optique à fibre dopée en erbium étudiée à l'aide du logiciel COMSIS.

Source : Copie d'écran du logiciel COMSIS .

Pratiquement tous les paramètres introduits interviennent dans l'évaluation des performances de ce type de liaison :

- Le débit binaire et les courants minimum et maximum délivrés par le générateur de bits. Ces derniers vont fixer, relativement à la caractéristique statique de la diode laser les niveaux de puissance optique codant le niveau logique « 0 » et le niveau logique « 1 ».
- La longueur d'onde centrale de la diode laser (environ $1,55 \mu\text{m}$ pour les applications haut débit), les caractéristiques statiques du composant d'émission (courant de seuil, rendement puissance/courant de la caractéristique $P_{opt} = P_{opt}(I)$), ainsi que les caractéristiques dynamiques de la diode (taux d'amortissement, chirp, etc.).
- Les pertes et la dispersion chromatique de la fibre optique monomode, introduites par l'intermédiaire des coefficients de pertes en dB/km et de dispersion en ps/(nm×km).
- Le gain de l'EDFA en dB et son facteur de bruit (qui fixe la dégradation du rapport signal à bruit en raison de l'amplification de l'émission spontanée).
- La sensibilité de la photodiode PIN (A/W) et son courant d'obscurité.

Ces paramètres peuvent être introduits sous forme de variable et donc modifiés à tout moment pour voir l'effet de tel ou tel phénomène sur les performances globales de la liaison. Il est également possible de passer d'une description « système » des différents éléments à une

description « physique ». Dans le premier cas, par exemple, le gain de l'EDFA est stipulé explicitement, alors que dans le second, on précise la concentration en ions erbium Er^{3+} dans la matrice de silice, la longueur de la section de fibre dopée, etc. Deux types d'analyse de la liaison sont principalement possibles : l'« analyse statique », grâce à laquelle il est possible d'analyser les principales caractéristiques de chaque composant, et l'« analyse temporelle », grâce à laquelle on peut visualiser et effectuer des traitements sur l'ensemble des grandeurs de la liaison complète.

VIII.4. Caractéristiques des éléments de la liaison optique point à point à fibre dopée en erbium

Généralités	
Nom :	deb1
Nature :	COURANT-LASER
Groupe :	Composants Optiques
Type (en sortie) :	INDEFINI

Générateur de bits

Caractéristiques	
DEBIT BINAIRE (Mbits/s) :	Deb1
LONGUEUR DU REGISTRE :	8
COURANT MINIMUM (mA) :	25
COURANT MAXIMUM (mA) :	40

Généralités	
Nom :	las1
Nature :	LASER-SYSTEME
Groupe :	Composants Optiques
Type (en sortie) :	INDEFINI

Diode laser

Caractéristiques		
Type de définition :	<input checked="" type="radio"/> Systeme <input type="radio"/> Physiques	
Longueur d'onde (nm) :	1550	
Courant de seuil (mA) :	15	
Rendement Puissance/Courant (W/A) :	0.15	
Largeur de raie (MHz) :	5	pour le courant (mA) : 50
Taux d'amortissement (MHz) :	4000	pour le courant (mA) : 50
Bande à -3 dB (MHz) :	8000	
Données physiques modifiables :	<input type="button" value="Données..."/>	
Paramètres Facultatifs		
<input checked="" type="checkbox"/> Espacement entre modes (nm) :	1	
<input checked="" type="checkbox"/> Chirp (MHz/mA) :	100	
<input checked="" type="checkbox"/> Bruit RIN (dB/Hz) :	-154	pour le courant (mA) : 70

Fibre optique

Generalites
 Nom : fib
 Nature : FIBRE-OPTIQUE-MONOMODI
 Groupe : Composants Optiques
 Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Longueur de la fibre (km) : Long

Coefficient d'attenuation (dB/km) : alph

Dispersion chromatique (ps/nm/km) : Constante Disp

Effet Kerr : Oui Non

Effet Raman : Oui Non

Coefficient de non linearite de la fibre (m²/W) : 3.2e-20

Gain Raman (m²/W) : 7.48e-21

Frequence de resonance (THz) : 12

Demi-largeur de raie Raman (THz) : 5.432

Aire effective de la section de la fibre (micro m²) : 80

Type de dispersion de la longueur : Fixe Variable

Valeur du pas (m) :

Valeur initiale du pas (m) :

Dispersion Modale de Polarisation : Oui Non

Birefringence intrinseque (ps/km) :

Longueur de couplage (m) :

Etat de la fibre

Retard introduit par la fibre (ns) : 0

EDFA

Generalites
 Nom : AMP
 Nature : AMPLI-OPTIQUE-FIBRE
 Groupe : Composants Optiques
 Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

Type des parametres de definition : Systeme Physique

Gain petit signal (dB) : 30

Puissance de saturation (dBm) : 13

Facteur de bruit (dB) : 6

Longueur d'onde de mesure des parametres (nm) : 1550

Fibre : Verre Silice Verre Fluore Autre Description...

Longueur d'onde de la pompe : 980 1480

Retard introduit par l'amplificateur (ns) : 0.1

Parametres physiques...

Photodiode

Generalites
 Nom : PIN
 Nature : PHOTODIODE-PIN
 Groupe : Composants Optiques
 Type (en sortie) : INDEFINI

Caracteristiques

SENSIBILITE (A/W) : 0.9

COURANT D'OBSCURITE (nA) : 0

IX. Caractéristiques statiques de l'EDFA : Exemple à partir du logiciel COMSIS

La description de l'EDFA fournie au logiciel comporte les éléments suivants :

- gain $G = 30$ dB
- facteur de bruit $F = 6$ (dB)
- longueur d'onde centrale $\lambda = 1,55(\mu\text{m})$.
- la concentration moyenne en ions erbium $3.5 \cdot 10^{24} (\text{m}^{-3})$.
- la longueur de la fibre dopée est 10(m).
- la puissance de la pompe 50 (mw).

IX.1. Evolution du gain en fonction de la longueur d'onde

La courbe présente l'effet de la longueur de la fibre amplificatrice sur la réponse du gain G en fonction de la longueur d'onde. Nous relevons que le gain atteint un pic de 35.8 dB pour $L=10$ m autour de $\lambda = 1530$ nm.

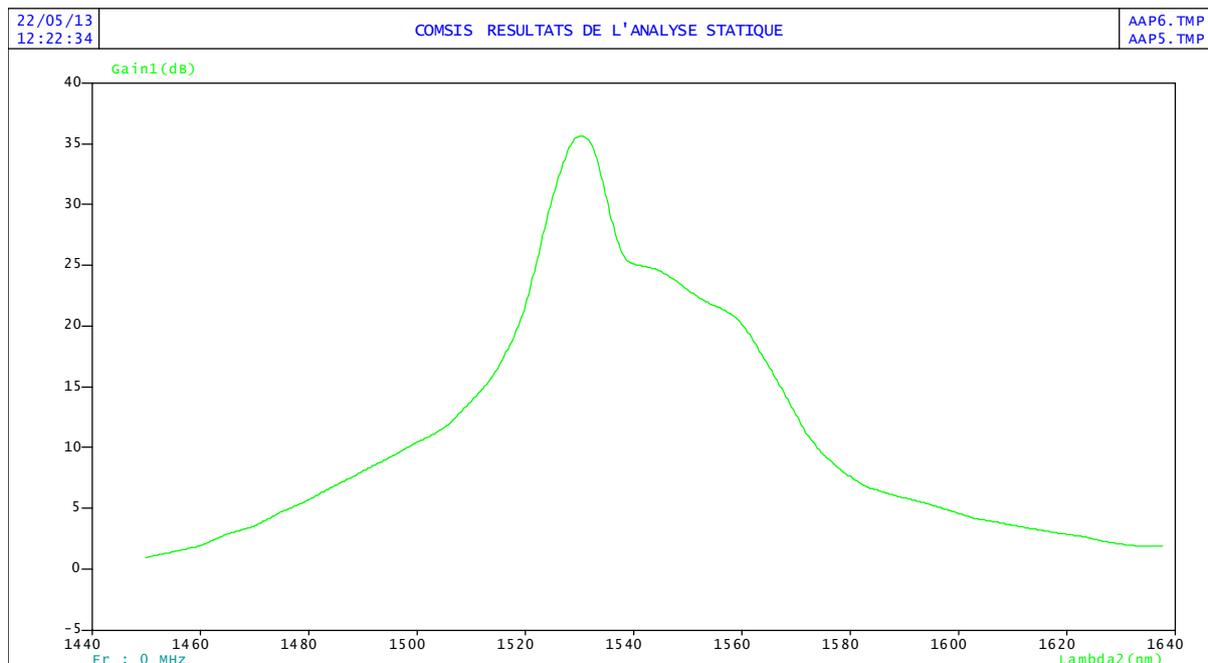


Figure (III.18) Variation du gain en fonction de la longueur d'onde du signal, pour L (longueur de la fibre amplificatrice) = 10m.

IX.2. Variation du gain $G=f(P_p)$

L'effet de la puissance de la pompe sur le gain de l'amplificateur (gain relatif au signal à amplifier). On note que si la puissance de pompe est insuffisante, l'inversion de population des ions Er^{3+} est inefficace, le gain de l'amplificateur tend vers zéro. En revanche, toutes choses étant égales par ailleurs, le gain sature lorsque la puissance de pompe devient suffisante pour ne plus être entièrement consommée par le signal à amplifier. L'axe des abscisses permet de chiffrer l'ordre de grandeur de la puissance de pompe nécessaire dans le cas présent ($P_p=50$ mW).

Dès que la puissance de la pompe dépasse 10 mW, le gain commence à atteindre la saturation à partir 20.5 dB.

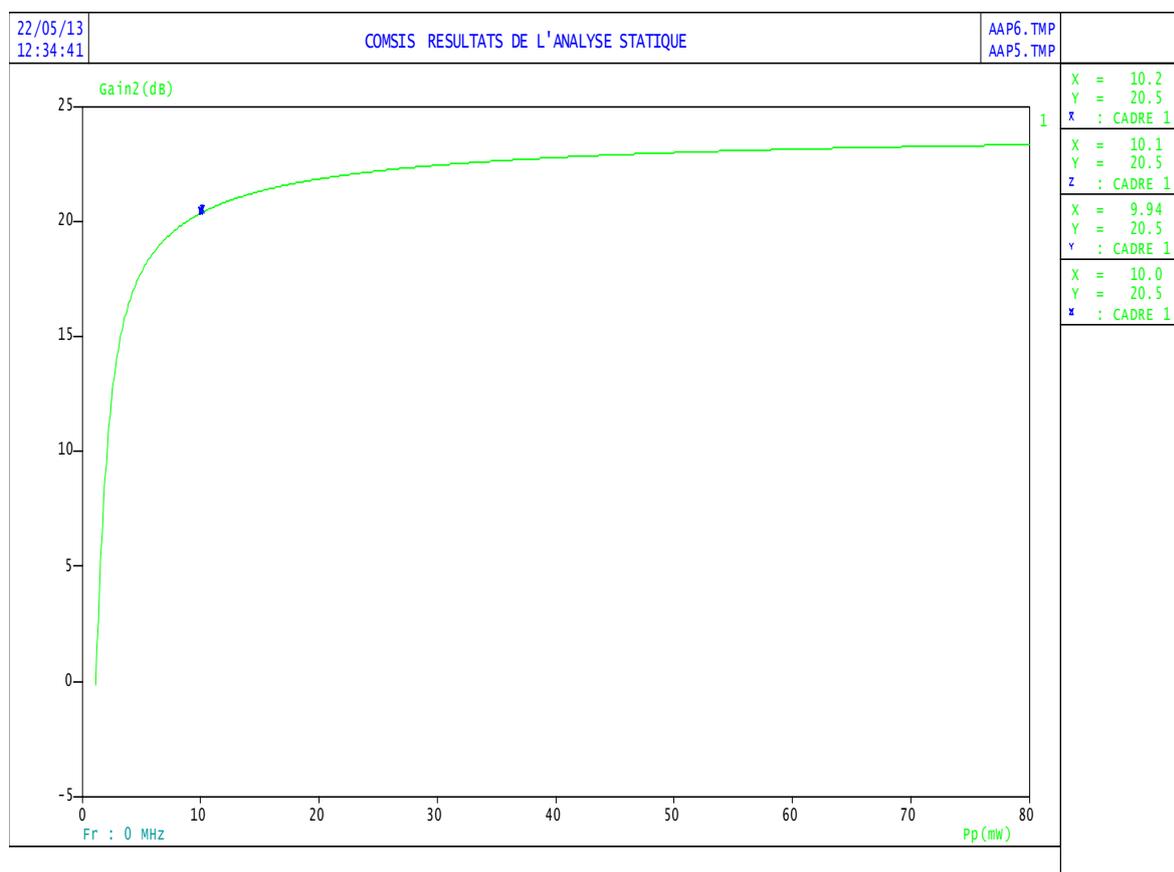


Figure (III.19) effet de la puissance de la pompe sur le gain de l'amplificateur à fibre dopée en erbium.

IX.3. Variation de $P_{ase} = f(\lambda)$

L'évolution de la réponse de la puissance d'émission spontanée amplifiée P_{ase} , en fonction de la longueur d'onde du signal pour une valeur de puissance de signal d'entrée P_{in} est donnée par la figure ci-dessous.

On observe à partir de cette courbe, que l'évolution de la P_{ase} a la même allure que celle du gain (fig.) et elle dépend aussi de la variation de la puissance d'entrée et elle est plus faible pour puissances d'entrée élevée.

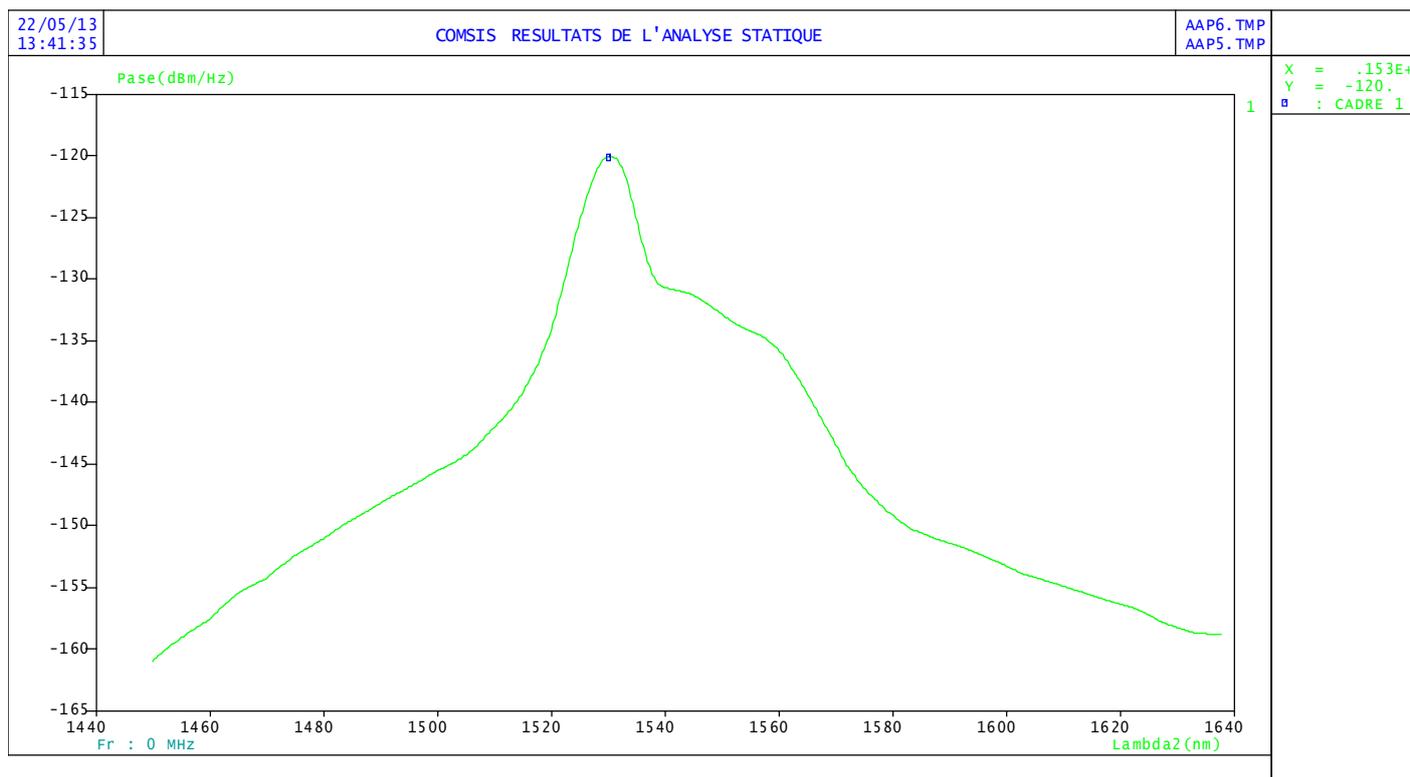


Figure (III.20) Variation de la puissance d'émission spontanée amplifiée P_{ase} en fonction de la longueur d'onde du signal, pour une puissance d'entrée $P_{in} = -30$ dBm.

IX.4. Variation $P_{out} = f(P_{in})_L$

La figure montre la variation de la puissance de sortie P_{out} en fonction de la puissance d'entrée du signal à une valeur de la longueur de la fibre L . Cette courbe illustre une augmentation linéaire de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée puis la saturation du niveau de sortie pour des P_{in} à -10 dBm c'est à dire lorsque le gain commence à chuter. La longueur $L = 10$ m donne un maximum de puissance de sortie.

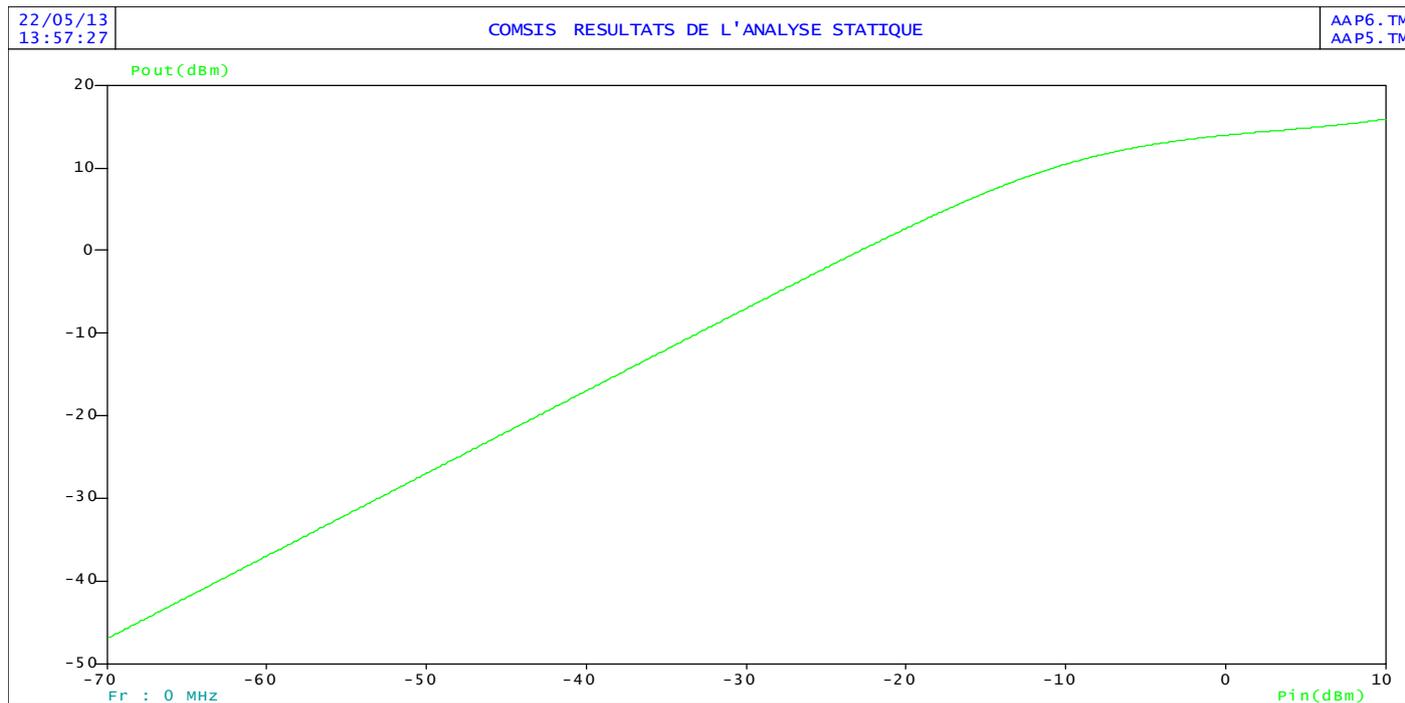


Figure (III.21) Variation de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée pour $L=10m$.

IX.5. Variations de $\sigma = ()$ et de $\sigma = ()$

Les sections efficaces d'émission σ et d'absorption σ de la fibre optique amplificatrice ont une grande contribution dans le phénomène d'amplification et dans le calcul du gain comme l'indique l'expression du gain.

Les courbes présentent un pic autour de 1530nm, ce qui est déjà observé sur la courbe du gain (figure III.18), qui présente d'ailleurs la même allure que celle de (σ) .

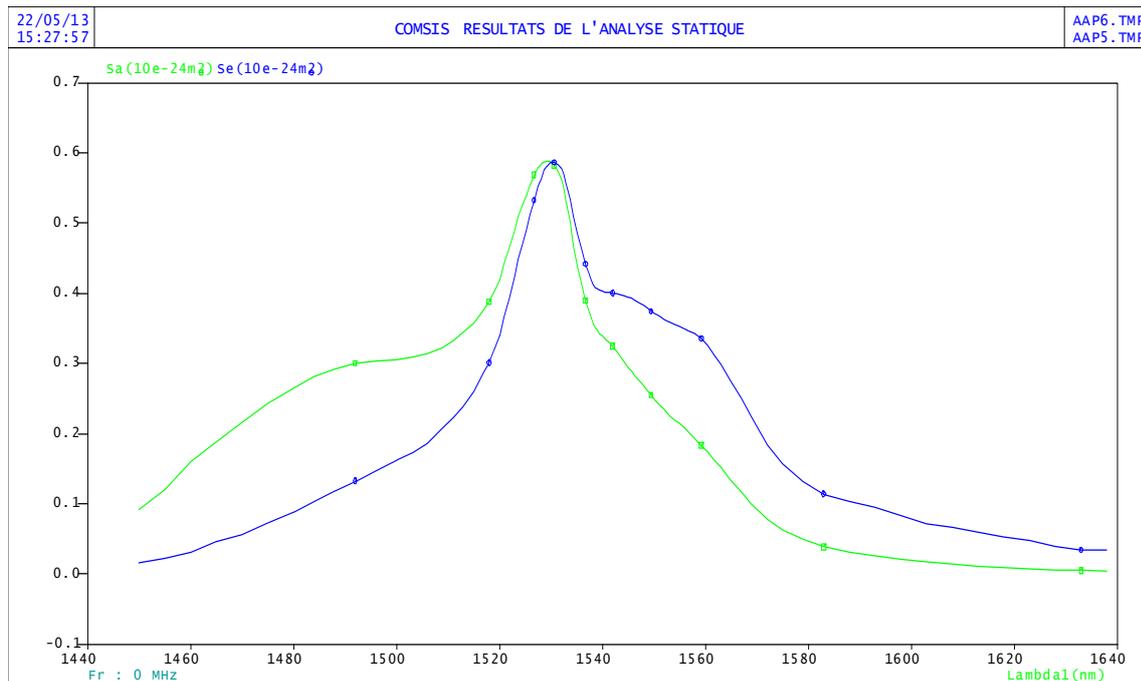
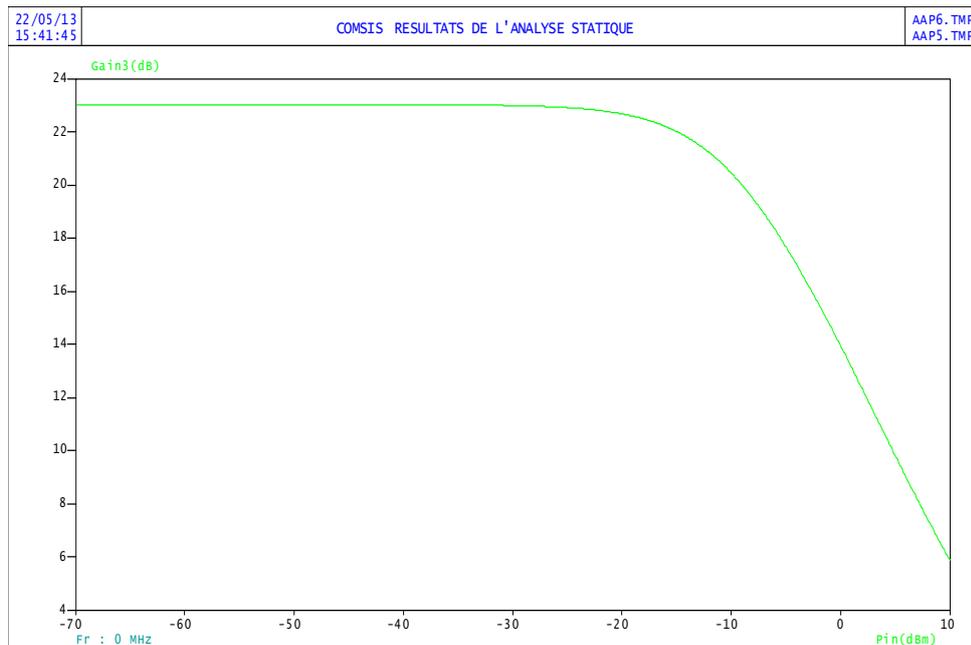


Figure (III.22) Variations des sections efficaces d'émission et d'absorption en fonction de la longueur d'onde du signal.

IX.6. Variation du gain en fonction de la puissance d'entrée du signal P_{in}

La figure ci-dessous montre l'effet de la puissance P_{in} du signal à amplifier sur le gain de l'amplificateur, en particulier la puissance de pompe (ici 50 mW), le gain décroît lorsque la puissance P_{in} est trop forte. On parle de saturation du gain de l'amplificateur. La puissance de pompe permet en effet une inversion de population donnée des ions Er^{3+} . Dans le même temps, l'émission stimulée de photon « signal » consomme l'inversion de population par passage d'ions Er^{3+} de l'état excité au niveau de base. Tant que le signal à amplifier est de faible puissance, l'inversion de population reste peu affectée. Lorsque celle-ci augmente, l'inversion de population en ions Er^{3+} diminue, donc le gain également.



Figure(III.23) Effet de la puissance d'entrée P_{in} sur le gain de l'amplificateur.

IX.7.Variation du gain en fonction de la puissance de sortie du signal P_{out}

Dans cette figure on remarque bien que le gain dans le milieu amplificateur est maximal et décroît lorsque la puissance P_{in} est trop forte. On parle de saturation du gain de l'amplificateur. La puissance de pompe ne permet en effet pas une inversion de population des ions Er^{3+} . Ce qui veut dire la puissance en sortie de la fibre amplificatrice est maximale, et dès qu'elle atteint -9 dB, le gain commence à chuter brusquement jusqu'à 6 dB.

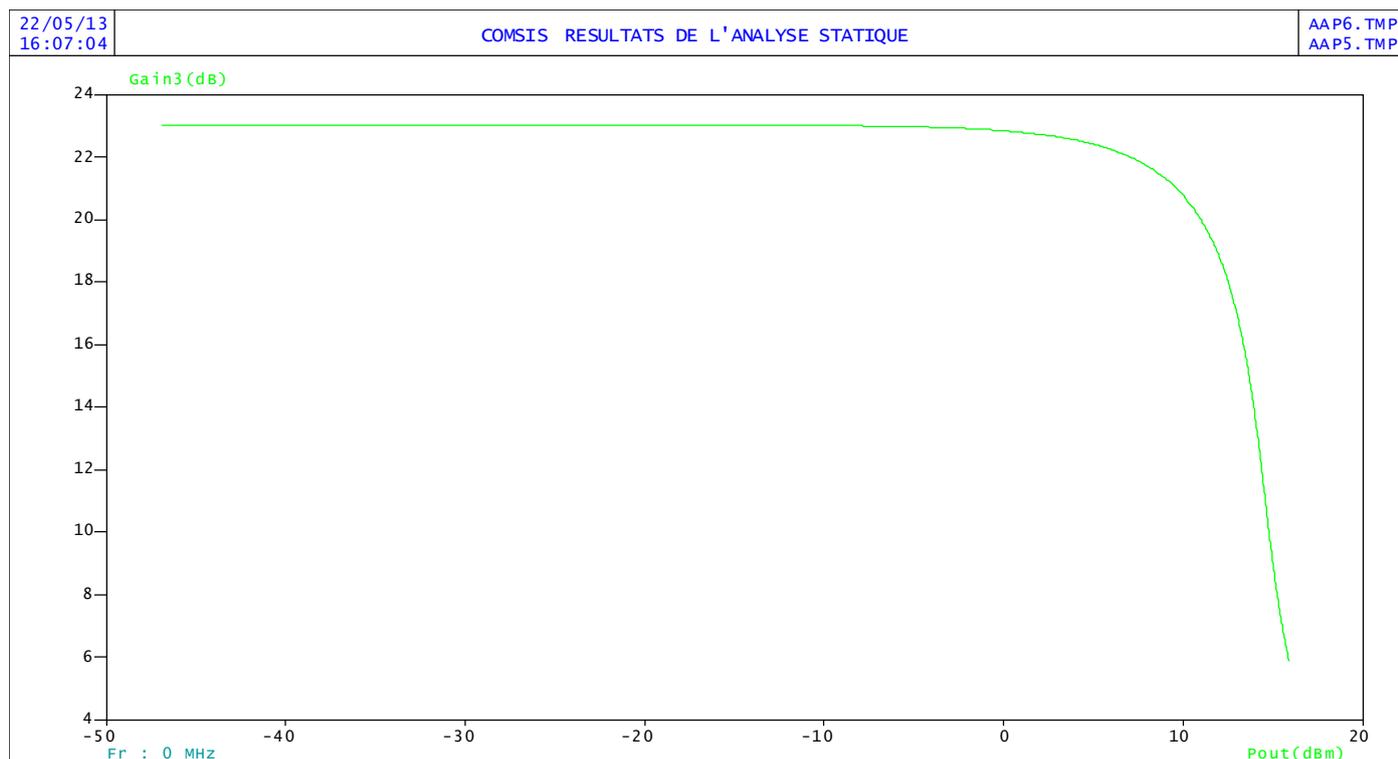
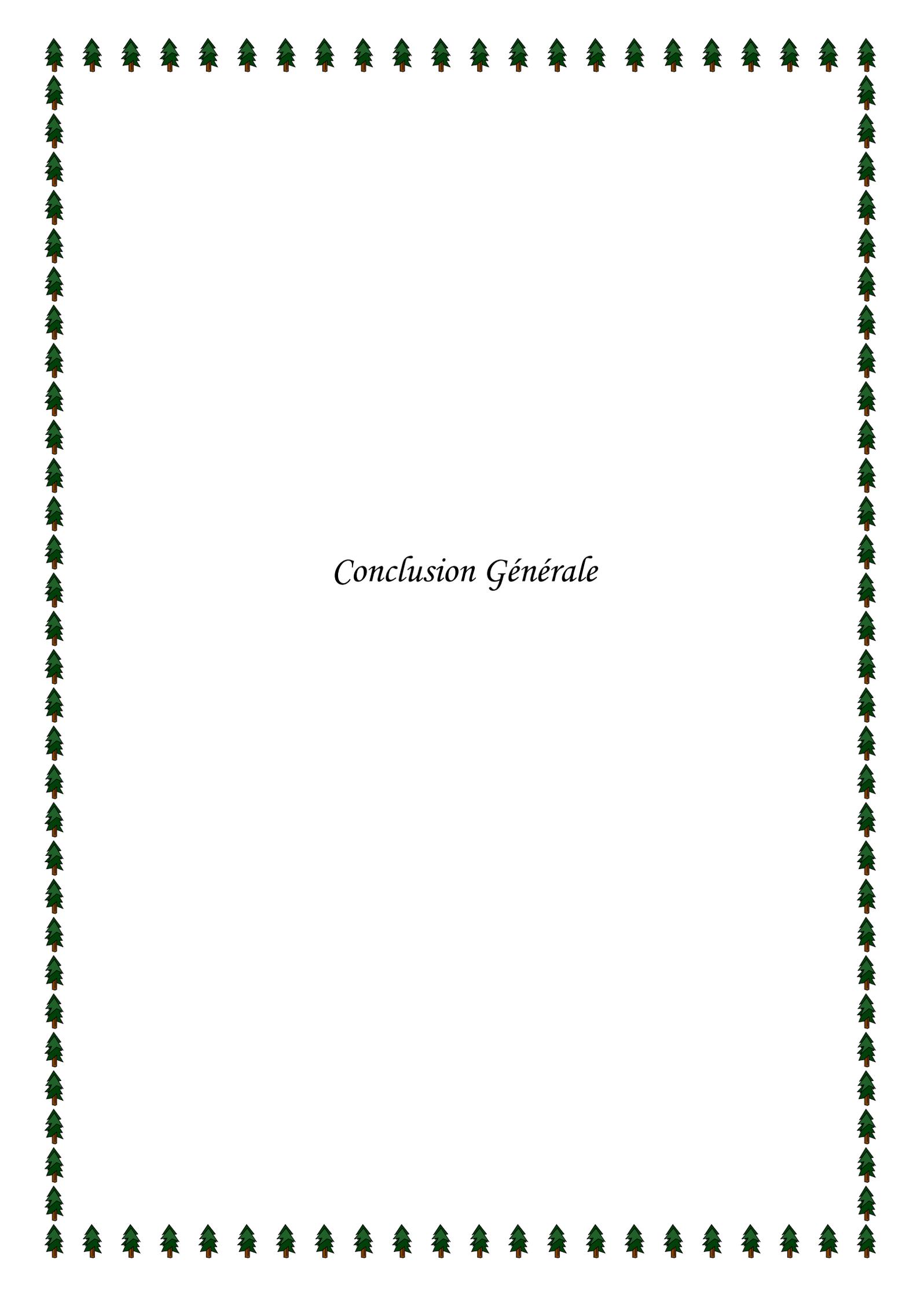


Figure (III.24) Effet de la puissance de sortie Pout sur le gain de l'amplificateur.

X. Conclusion

Ce travail de simulation avec COMSIS nous a bien montré les différentes variations des caractéristiques de l'amplificateur optique à fibre dopée à erbium.

Elles nous ont donné une bonne observation sur le choix des paramètres à utiliser dans l'optimisation du gain et de la puissance d'émission spontanée amplifiée (Pase) sous l'effet de la longueur d'onde du signal et de pompe, ainsi la puissance de saturation en sortie du milieu amplificateur qui sont les facteurs principaux dans le calcul du rapport signal sur bruit du système de transmission à fibre optique. Pour cela, on doit choisir les paramètres de l'amplificateur (la longueur de la fibre dopée, la concentration moyenne en ions erbium Er^{+3} , la longueur d'onde de pompe et de signal et la puissance de pompe P_p , et la puissance de signal d'entrée P_{in} .) qui permettent à la fois un gain élevé et une faible puissance d'émission spontanée amplifiée.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail de simulation nous a bien montré les différentes variations des caractéristiques de la fibre optique amplificatrice dopée en erbium. Elle nous a donné un aperçu sur le choix des paramètres à utiliser pour l'optimisation de l'EDFA, en occurrence la longueur de la fibre dopée, la puissance de la pompe et la concentration des ions d'erbium, ainsi que le gain. Ces paramètres sont très importants dans le système de transmission par fibre optique.

Cette étude a pour but d'aboutir à une meilleure compréhension de 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 : L'état de l'art de la fibre optique conventionnelle, 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 dopé Erbium. Ce modèle, est basé sur des équations d'évolution des populations des niveaux énergétiques des dopants.

Pour résoudre les équations de ce modèle, nous avons effectué la résolution sous MATLAB.

Nous avons commencé notre travail par une étude théorique sur la fibre optique simple de silice qui nous a permis de décrire sa fabrication et 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 et avantages de la fibre optique.

Nous avons montré dans le chapitre 2, que l'utilisation d'ion de terre rares, essentiellement l'erbium, Les niveaux de transition inter bande amplifient le signal initial à la longueur d'onde de 1550 nm. En outre nous avons assimilé les principes de transition électroniques, ainsi que les transitions non radiatives et radiatives tel que : l'émission spontanée et l'émission stimulée sur laquelle est basée le principe d'amplification optique d'un système à trois niveaux utilisés dans notre étude.

Nous avons présenté dans le chapitre 3 le fruit de notre travail sur la fibre optique dopée à l'erbium (Er). Pour cela, nous nous sommes intéressés donc, à la résolution numérique de quelques équations différentielles, le gain et la puissance en sortie ainsi que l'intensité de fluorescence au niveau de la fibre amplificatrice dopée. Aussi nous nous sommes intéressés à des simulations numériques sur un logiciel performant COMSIS (communication system interactive software) à fin d'optimiser et de voir l'influence de certains paramètres (la puissance de signal, la puissance de la pompe, la longueur d'onde du signal et de la pompe, la longueur de la fibre dopée et la concentration moyenne d'ions erbium) sur le gain et la puissance en sortie de la fibre amplificatrice dopée.

En vue de ce travail nous comptons étudier l'augmentation du gain en insistant sur le paramètre de la section efficace d'absorption de l'erbium dans le cas d'un Co-dopage Erbium/Ytterbium ($\text{Er}^{+3}/\text{Yb}^{+3}$). En effet l'incorporation de l'erbium près d'un sensibilisateur catalyseur comme l' Yb^{+3} à pour effet d'absorber efficacement le rayonnement d'une pompe large bande puis de transférer cette énergie vers les ions erbium. Dans l'avenir nous avons choisi de développer et analyser la faisabilité des fibres optiques amplificatrices dopées.



Liste des figures

➤ Liste des figures Chapitre I :

Figure (I.1) Liaison optique	03
Figure (I.2) Structure d'un émetteur optique	03
Figure (I.3) Structure d'un laser.....	04
Figure (I.4) Spectre d'émission d'une diode laser.....	04
Figure (I.5) L'émission stimulée d'un photon.....	04
Figure (I.6) Spectre d'émission DEL.....	05
Figure (I.7) L'émission spontanée d'un photon.....	05
Figure (I.8) Présentation d'une fibre.....	06
Figure (I.9) fibre optique avec revêtement.....	06
Figure (I.10) Représentation d'une onde E.M.....	09
Figure (I.11) Constitution d'une fibre optique.....	10
Figure (I.12) ouverture numérique d'une fibre optique.....	11
Figure (I.13) fibre avec profil à saut d'indice.....	12
Figure (I.14) fibre avec profil à gradient d'indice	13
Figure (I.15) fibre optique monomode.....	14
Figure (I.16) fenêtres d'atténuation de la fibre optique.....	15
Figure (I.17) Phénomène d'atténuation.....	15
Figure (I.18) Pertes par courbures.....	16
Figure (I.19) Pertes par raccordements	16
Figure (I.20) Phénomène de dispersion chromatique.....	17
Figure (I.21) Phénomène de dispersion modale.....	17
Figure (I.22) Amplificateur électronique	18
Figure (I.23) Amplificateur à fibre dopée en erbium.....	18
Figure (I.24) Schéma d'un récepteur de données.....	19
Figure (I.25) Photo diode PIN.....	20
Figure (I.26) Photo diode à avalanche.....	21

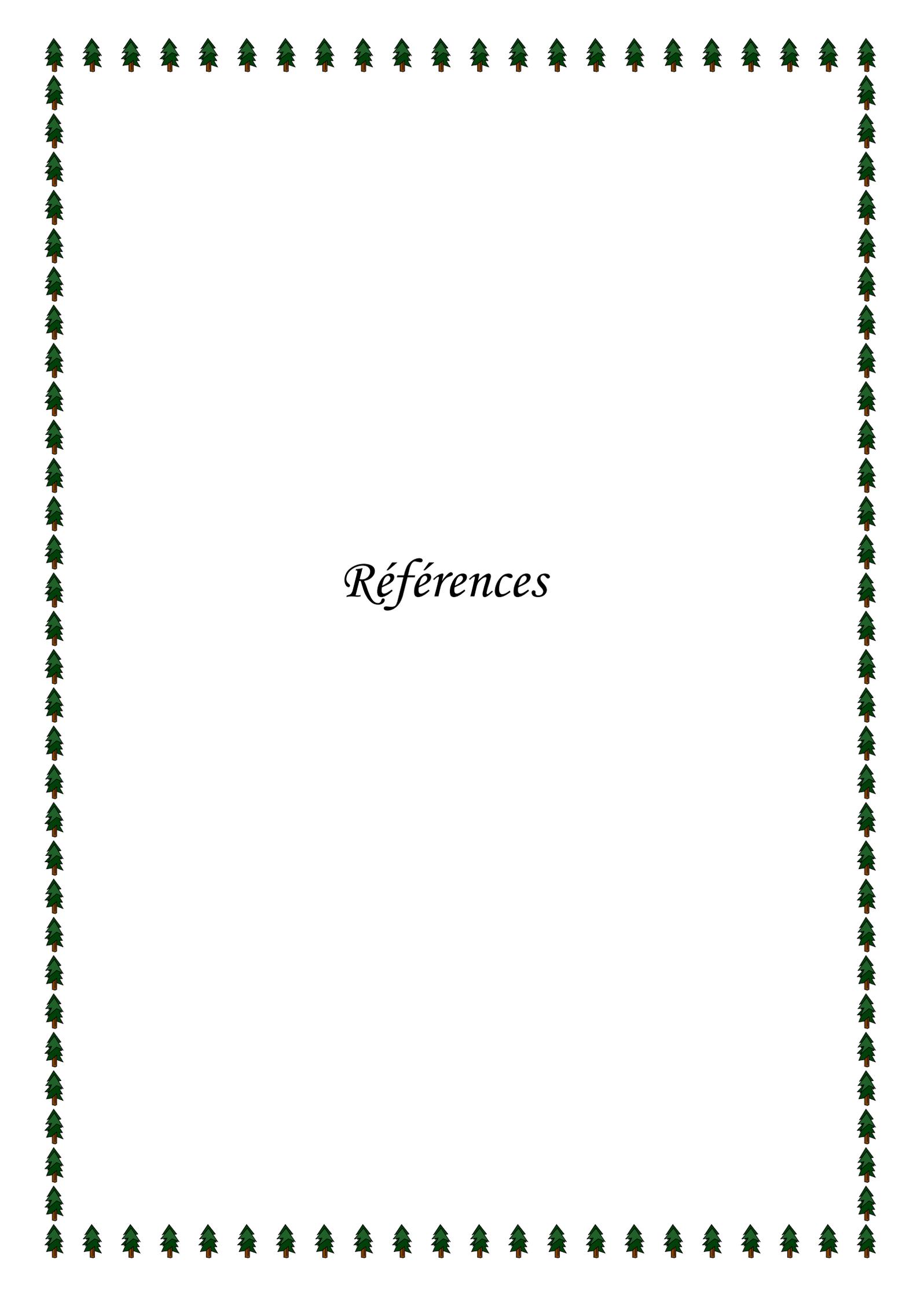
➤ Liste des figures Chapitre II :

Figure (II.1) Dopage de terre rare (l'erbium) en phase liquide.....	23
Figure (II.2) Elément tétraédrique (silicate) de la silice vitreuse.....	23
Figure (II.3) Place des lanthanides dans la classification périodique des éléments.....	24
Figure (II.4) Représentation schématique sur l'excitation de l'ion erbium.....	26
Figure (II.5) Principe de l'émission stimulée de l'ion erbium.....	26
Figure (II.6) Système à trois niveaux de l'ion erbium.....	27
Figure (II.7) Diagramme d'énergie partiel de l'ion erbium dans une matrice de verre	28
Figure (II.8) Effet starck sous l'action d'un champ électrique cristallin.....	29
Figure (II.9) Représentation de la répartition des ions erbium dans une matrice de silice.....	30
Figure (II.10) Effets de l'élargissement inhomogène dans le site.....	30
Figure (II.11) Schème de principe d'un ampli optique.....	31
Figure (II.12) Pompage contra-propagatif et bidirectionnel.....	31
Figure (II.13) Niveaux d'énergie mis en jeu pour un pompage à 800nm.....	32

Figure (II.14) Niveaux d'énergie mis en jeu pour un pompage à 980nm.....	33
Figure (II.15) Niveaux d'énergie mis en jeu pour un pompage à 1480nm.....	34

➤ Liste des figures Chapitre III :

Figure (III.1) Le transfert d'énergie de l'onde de pompe vers l'onde signal.....	35
Figure (III.2) Différentes transitions entre les niveaux d'énergie à 980nm.....	36
Figure (III.3) Variation du gain en fonction de la puissance de la pompe.....	42
Figure (III.4) Variation de la puissance de sortie en fonction de la pompe.....	43
Figure (III.5) Variation de l'intensité de fluorescence en fonction du temps.....	43
Figure (III.6) Fibre ordinaire connectée avec un tronçon de fibre dopée.....	44
Figure (III.7) L'atténuation de la puissance d'entrée.....	46
Figure (III.8) L'amplification du signal à l'entrée de la fibre dopée.....	46
Figure (III.9) Récupération de la puissance originale.....	47
Figure (III.10) Phénomène d'atténuation et l'amplification du signal.....	47
Figure (III.11) Editeur de schéma-bloc COMSIS.....	49
Figure (III.12) Interface alpha numérique.....	49
Figure (III.13) Bibliothèque de modèle COMSIS.....	50
Figure (III.14) Le menu d'analyse de COMSIS.....	50
Figure (III.15) Fenêtre d'évaluation des performances.....	52
Figure (III.16) Fenêtre variable et prétraitement à visualiser.....	52
Figure (III.17) Synoptique de la liaison optique a fibre dopée erbium.....	53
Figure (III.18) Variation du gain en fonction de la longueur d'onde du signal.....	56
Figure (III.19) Effet de la puissance de la pompe sur le Gain dans la fibre dopée.....	57
Figure (III.20) Variation de la PASE en fonction de la longueur d'onde du signal.....	58
Figure (III.21) Variation de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée.....	59
Figure (III.22) Variation des sections efficaces en fonction de.....	60
Figure (III.23) Effet de la puissance d'entrée sur le Gain.....	61
Figure (III.24) Effet de la puissance de sortie sur le Gain.....	62

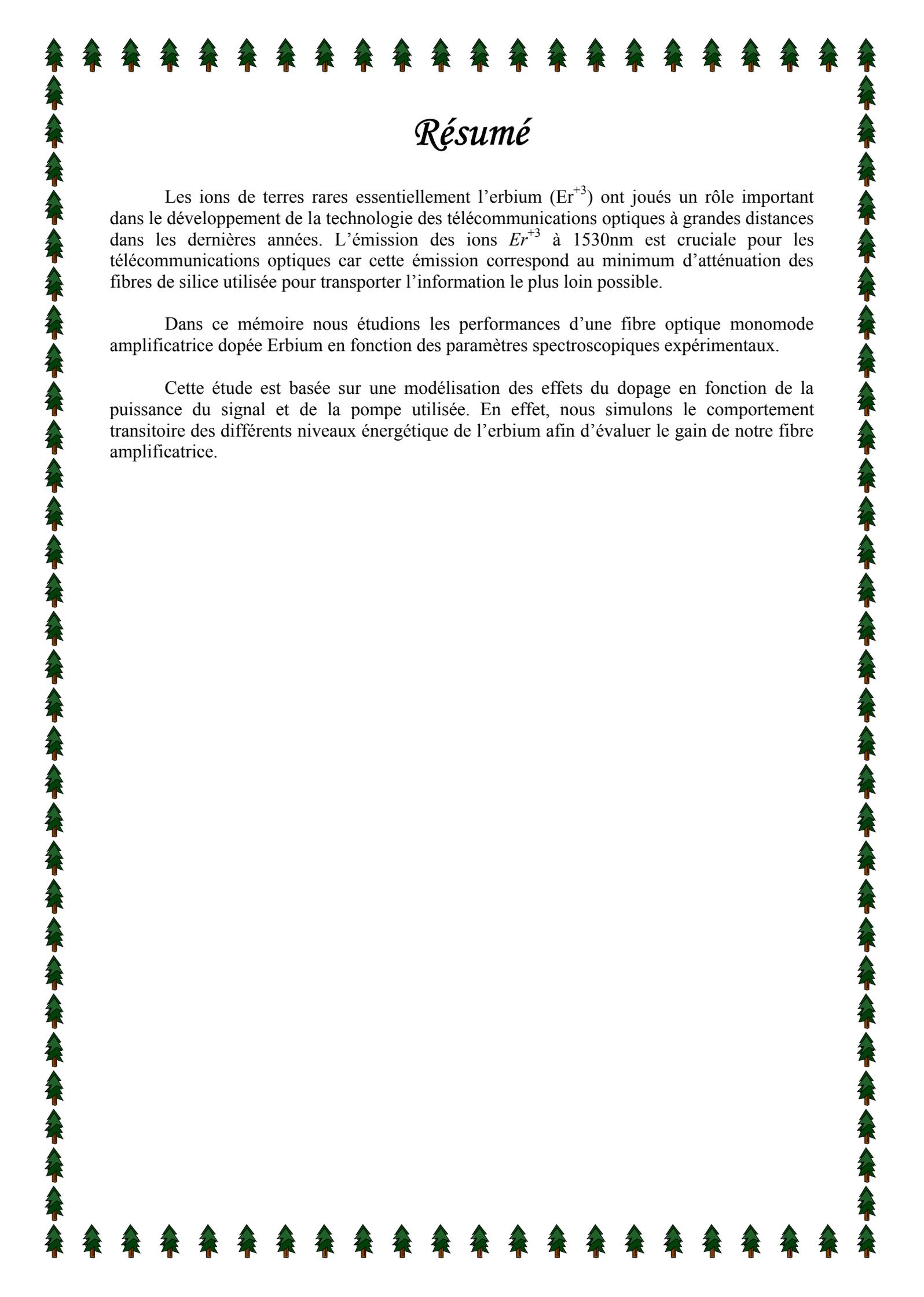


Références

Références :

- [1] Khalil MERZOUK. « Etude d'un système bas cout de transmission optique par multiplexage temporel », thèse de doctorat, L'Institut Polytechnique de Grenoble ; le 08 Avril 2008, France.
- [2] G. Hincelin– Amplis optiques « cours sur les amplificateurs optiques ».
- [3] JEAN-NOEL MARAN « Laser multi-longueur d'onde à fibre dopée à l'erbium utilisant un décaleur de fréquence dans la boucle de contrefaction », Thèse de doctorat en cotutelle présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de doctorat en Génie électrique pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)2005.
- [4] Mikhaël MYARA. FMSIE235-Master EEA « Amplification optique-Notes de cours », 1^{er} février 2008.
- [5] Cours MRIM: Etude des supports de transmission « la fibre optique »
- [6] Yves MOREAU, Université Montpellier II « Télécommunications optiques »
- [7] Mr. GHOUMAZI MEHDI « optimisation des performances d'une fibre optique dopée a l'erbium », mémoire de magistère ; le : 10 /06 /2009, Université Mentouri de Constantine.
- [8] Jean-François L'haire « cours sur les fibres optiques »
- [9] Mr Ag Mohamed Ikinen CHAIBATA- Melle Souley Harouna MARIETOU « Mémoire de fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Télécommunications Option : Systèmes des télécommunications, Institut de Télécommunications Abdelhafid Boussouf - Oran – », juin 2005.
- [10] Stéphane HILAIRE « conception, fabrication et caractérisation de fibres microstructurées dopées erbium pour application aux amplificateurs optiques », thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES ; le 26 Novembre 2004, France.
- [11] E. Cassan « Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples », IEF, Université Paris-Sud Orsay, Mis en ligne le 4 juin 2003.
- [12] Julien MAURY « Etude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES ; le 26 Novembre 2003, France.
- [13] MEDJDOUB Fadila « optimisation par la simulation d'une chaine de transmission numérique par fibre optique haut débit », Mémoire Pour l'obtention du DIPLOME DE MAGISTER EN TELECOMMUNICATIONS, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN ; 2010.
- [14] LEFIEVRE Rodolphe « Exposé Technique : La Fibre Optique » rlefievre; 28/02/2008.

- [15] Mr Boukaaza Nacer et Mr Makhloufi Mouhamed « Roseau sous-marin de télécommunication » «Mémoire de fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Télécommunications Option : Télécommunications, Institut de Télécommunications Abdelhafid Boussouf -Oran →», juin 2007.
- [16] M. PERETTI Romain « Saturation spectrale de gain dans les amplificateurs à fibres dopées erbium : largeurs homogène et inhomogène et approche des nanomatériaux », these de doctorat Présentée Devant l'UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD – LYON 1, le 7 octobre 2008, France.
- [17] Dr. Abdelkader TEMMAR« Caractérisation de l'amplificateur optique a fibre dopée a erbium», Communication, Institut des Télécommunications –Oran, 2004 Algérie.
- [18] M. Antoine AL CHOUEIRY « Nano particules de silicium et ions erbium pour l'amplification optique » ; thèse de doctorat ; L'université Claude Bernard - Lyon 1, France , 25 septembre 2007.
- [19] Dr Z.SIDI ALI MEBAREK « Télécommunication optiques, sources, fibres et détecteurs », cours de fibre optiques enseigné à l'institut des télécommunication d'Oran dans le cadre d'un programme de formation d'ingénieurs en Télécommunications
- [20] Amplificateurs et LASER à fibre, INSTITUT D'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL
TP amplificateur et laser à fibre 2012-2013
- [21] Pierre lecoy Réseaux et télécom sur fibre optique, en janvier 1997.
- [22] Mr degdag abderahmane et Mr sayeh Hamadouche «Etude des différents formats de modulation dans une liaison optique à haut débit » «Mémoire de fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Télécommunications Option : Télécommunications, Institut de Télécommunications Abdelhafid Boussouf -Oran →», juin 2006.



Résumé

Les ions de terres rares essentiellement l'erbium (Er^{+3}) ont joués un rôle important dans le développement de la technologie des télécommunications optiques à grandes distances dans les dernières années. L'émission des ions Er^{+3} à 1530nm est cruciale pour les télécommunications optiques car cette émission correspond au minimum d'atténuation des fibres de silice utilisée pour transporter l'information le plus loin possible.

Dans ce mémoire nous étudions les performances d'une fibre optique monomode amplificatrice dopée Erbium en fonction des paramètres spectroscopiques expérimentaux.

Cette étude est basée sur une modélisation des effets du dopage en fonction de la puissance du signal et de la pompe utilisée. En effet, nous simulons le comportement transitoire des différents niveaux énergétique de l'erbium afin d'évaluer le gain de notre fibre amplificatrice.