



N° d'ordre:

N° de série:



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Sciences et de La Technologies Filière: Genie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En: Télécommunication

Spécialité: Systèmes de télécommunication

Par: Ghilani Fouad, Rezzig Hicham, Nasri Adel

Thème

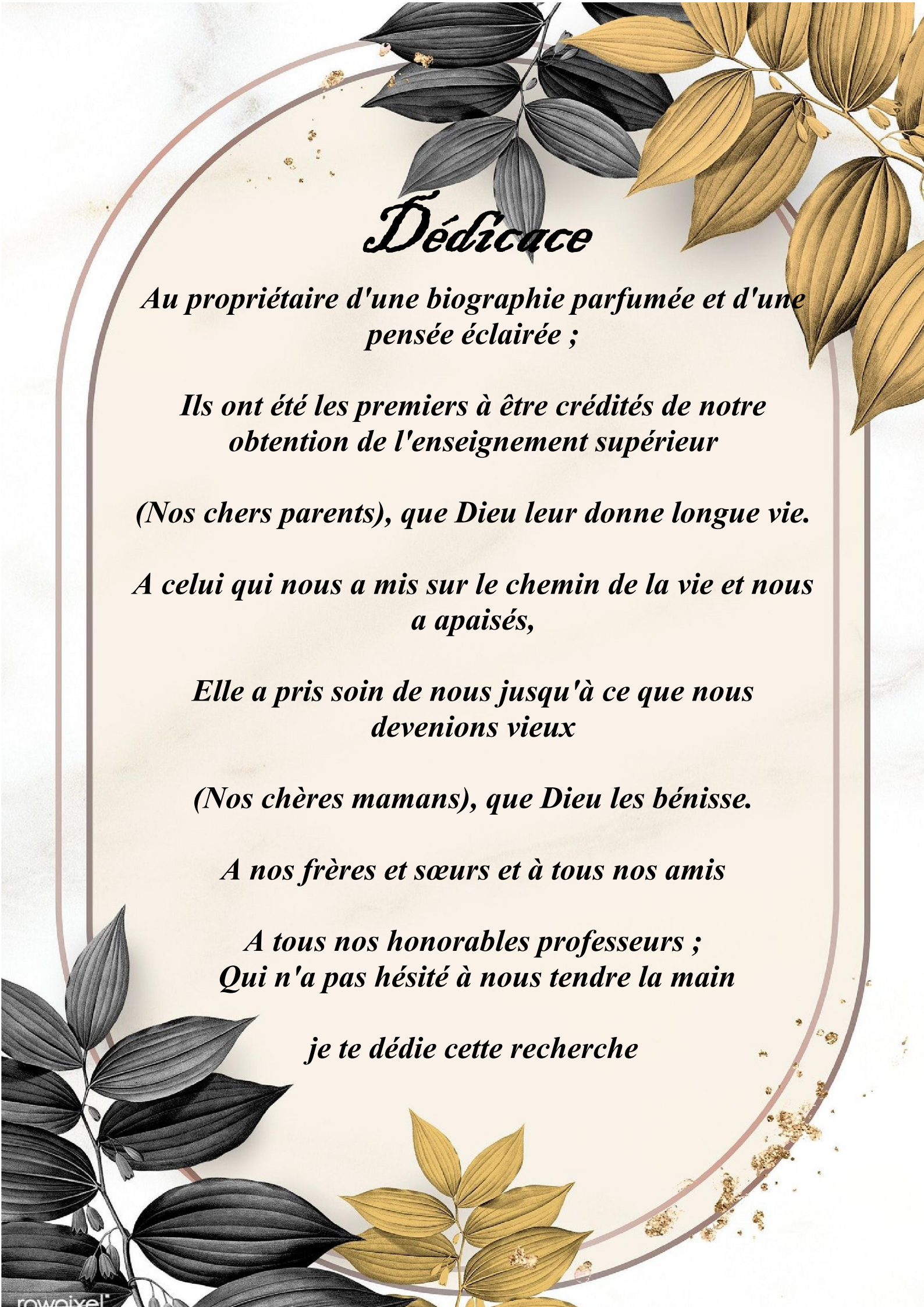
**Etude d'un amplificateur optique à base
d'une fibre dopée à l'erbium**

Devant le jury composé de:

Mr.		Président
Mr.		Examineur
Mr. Madjouri Abdelkader		Encadreur

2020-2021





Dédicace

*Au propriétaire d'une biographie parfumée et d'une
pensée éclairée ;*

*Ils ont été les premiers à être crédités de notre
obtention de l'enseignement supérieur*

(Nos chers parents), que Dieu leur donne longue vie.

*A celui qui nous a mis sur le chemin de la vie et nous
a apaisés,*

*Elle a pris soin de nous jusqu'à ce que nous
devenions vieux*

(Nos chères mamans), que Dieu les bénisse.

A nos frères et sœurs et à tous nos amis

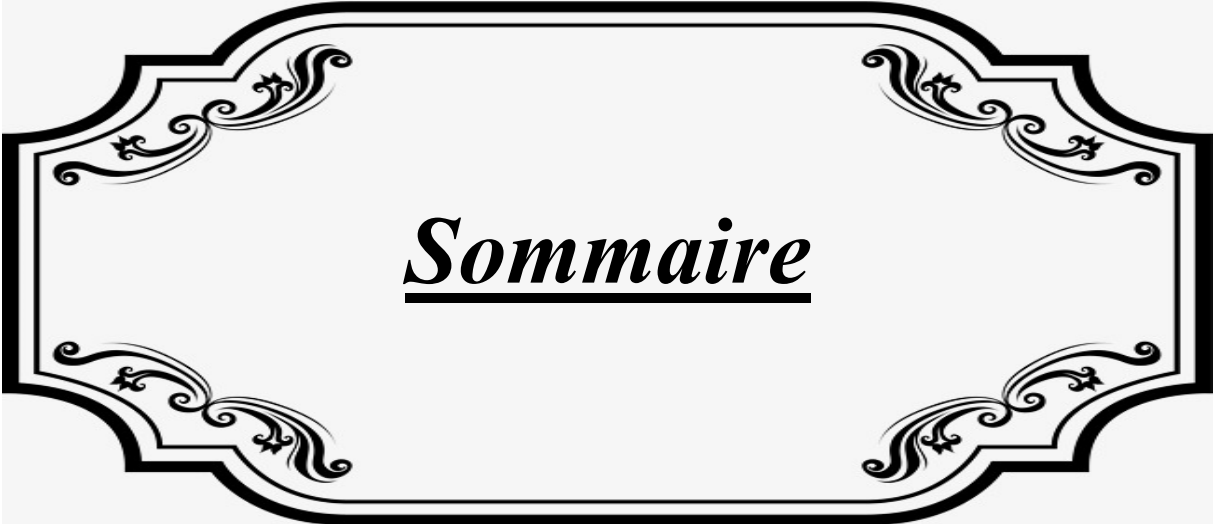
*A tous nos honorables professeurs ;
Qui n'a pas hésité à nous tendre la main*

je te dédie cette recherche

Remerciements

*Tout d'abord nous remercions Dieu pour la plus grande miséricorde de nous avoir permis de présenter ce projet sous la meilleure forme que nous voulions être, nous tenons à remercier notre superviseur de ce projet, **Dr.Madjouri Abdelkader** pour son aide précieuse et conseils pour sortir de ce projet.*

Nous remercions nos professeurs et médecins qui nous ont fourni toutes les connaissances. Surtout, nous sommes tous reconnaissants envers nos familles pour leur amour, leur aide, leur soutien et leurs encouragements sans fin. Et à nos amis pour leur compréhension et leur soutien pour nous permettre de mener à bien ce projet.



Sommaire

Sommaire

	page
Dédicace	
Remerciements	
Sommaire	i
Introduction générale	01
Chapitre I : Introduction Aux Communication Optique	
I.1. Introduction:	04
I.2. Types des systèmes des communication optiques	04
I.2.1. Local Area Network (LAN)	05
I.2.2. Metropolitan Area Network (MAN)	05
I.2.3. Wide Area Network (WAN)	06
I.3. Techniques de multiplexage	06
I.3.1. Multiplexage FDM	06
I.3.2. Multiplexage TDM	08
I.3.3. Multiplexage WDM/DWDM	09
I.4. Le fibre optique	13
I.4.1. La fibre multi-mode	14
I.4.2. La fibre monomode	14
I.4.3. La fibre à gradient d'indice	14
I.4.4. La fibre à saut d'indice	15
I.5. Les pertes dans les fibres optiques	15
I.5.1. Pertes par absorption	16
I.5.2. Pertes par diffusion	16
I.5.3. Pertes par confinements	17
I.5.4. Pertes totales	18
I.5.5. La biréfringence de phase	20
I.5.6. L'aire effective de mode	21
I.6. Conclusion	22
Chapitre II : Amplificateur à fibre dopée erbium EDFA	
II.1. Introduction	24
II.2. Amplificateurs à effet Raman	25
II.3. Amplificateurs paramétriques à fibre	26
II.3.1. Amplificateur à fibre dopée	26
II.3.2. Amplificateur à fibre dopée à l'erbium	26
II.3.3. Pourquoi l'Erbium ?	27
II.3.4. Amplificateur optique EDFA - Amélioration des signaux optiques plus efficacement	27
II.4. Comment fonctionne un EDFA?	28
II.4.1 Spectre de pompage et de gain	29
II.4.2. Modèle à deux niveaux	31

II.4.3. Bruit de l'amplificateur	35
II.4.4. Amplification multi-canal	38
II.5. Conclusion	42
Chapitre III: Résultats de simulations	
III.1. Introduction	44
III.2. Amplificateur à fibre dopée Erbium	44
III.3. Simulation de système	45
III.3.1. Gain de signal dans une fibre "typique"	47
III.3.2. Génération d'ASE	54
III.4. Conclusion	58
Conclusion générale	60
Bibliographie	62

liste de Figure

	Page
Chapitre I : Introduction Aux Communication Optique	
Figure I.1 : Schéma d'un système de communication optique	04
Figure I.2 : Architecture d'un réseau LAN	05
Figure I.3 : Architecture d'un réseau WAN	06
Figure I.4 : Exemple de multiplexage fréquentiel de trois canaux téléphoniques	07
Figure I.5 : Multiplexage des fréquences en ADSL	07
Figure I.6 : Séparation du téléphone et des données chez l'utilisateur en ADSL	08
Figure I.7 : Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps	08
Figure I.8 : Multiplexage temporel dans la hiérarchie PDH en Europe	09
Figure I.9 : Peigne des fréquences en DWDM	10
Figure I.10 : DWDM unidirectionnel et bidirectionnel	10
Figure I.11 : Principe d'une liaison WDM/DWDM	11
Figure I.12 : Indépendance des débits et formats de chaque canaux en WDM	10
Figure I.13 : Combinaisons entre les différents couches services et transports	12
Figure I.14 : Schémas de principe d'un multiplexeur à insertion/extraction optiques	12
Figure I.15 : Schéma de principe d'un brasseur optique (Optical Cross-Connect OXC)	13
Figure I.16 : Structure d'un fibre optique	13
Figure I.17 : La fibre à saut d'indice	14
Figure I.18 : La fibre à gradient d'indice	15
Figure I.19 : La fibre monomode	15
Figure I.20 : Diffusion dans le cœur d'une fibre optique	17
Figure I. 21: les différentes sources d'atténuation dans les fibres de silice	17
Figure I. 22 : Illustration de l'effet tunnel optique dans une fibre droite à saut d'indice.	18
Figure I.23 : Evolution de la dispersion chromatique de matériau, de guide et totale	20
Chapitre II : Amplificateur à fibre dopée erbium EDFA	
Figure II.1 : amplificateur optique	25

Figure II.2 : Amplification Raman	26
Figure II.3 : Diagramme schématique d'un amplificateur à fibre dopée	26
Figure II.4 : le diagramme d'atténuation en fonction la longueur d'onde dans les différents bandes	28
Figure II.5 : Schéma d'un système générale d'amplification en utilisant l'EDFA	29
Figure II.6 : (a) diagramme du niveau d'énergie des ions erbium dans les fibres de sélica - (b) spectres d'absorption et de gain d'un edfa dont le coeur a été codopé avec germania	29
Figure II.7 : petit gain de signal en fonction de (a) la puissance de la pompe et (b) la longueur de l'amplificateur pour un EDFA supposé pompé à 1,48 μm	33
Figure II.8: (a) facteur de bruit et (b) gain de l'amplificateur en fonction de la longueur pour plusieurs niveaux de pompage.	37
Figure II.9: (a) facteur de bruit et (b) gain de l'amplificateur en fonction de la longueur pour plusieurs niveaux de pompage.	38
Figure II.10 : Schéma d'un EDFA conçu pour fournir un gain uniforme sur la bande passante de 1530-1570 nm à l'aide d'un filtre optique contenant plusieurs réseaux de fibres à longue période. La conception en deux étapes permet de réduire le niveau de bruit	40
Figure II.11: Schéma d'un EDFA en bande L fournissant un gain uniforme sur la bande passante de 1570 - 1610 nm avec une conception à deux étages	41
Chapitre III: Résultats de simulations	
Figure III.1 : Configuration double pompe d'un système d'amplification optique	44
Figure III.2 : Niveaux énergétiques de molécules Er 3+	44
Figure III.3 : Spectres d'émission et d'absorption de l'Erbium	45
Figure III.4 : Schéma du système à simuler	46
Figure III.5 (a): Le gain en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 14 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium (fibre A) pompée à 980 nm et 1480 nm	47
Figure III.5 (b): la population à l'état supérieur en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 14 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium (fibre A) pompée à 980 nm et 1480 nm	48
Figure III.6 (a): La population dans l'état supérieur en fonction de la position le long d'une longueur de 14 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium, pompée à 980 nm	49
Figure III.6 (b): La population dans l'état supérieur à 1530 nm en fonction de la position le long d'une longueur de 14 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium, pompée à 980 nm	50
Figure III.7 (a): Le gain de signal à 1550 nm en fonction de la position le long de la fibre, pour des puissances de pompe injectées à $z = 0$ à 980 nm	51
Figure III.7 (b): Le gain de signal à 1550 nm en fonction de la position le long de la fibre, pour des puissances de pompe injectées à $z = 0$ à 980 nm	51
Figure III.8 (a): l'ASE à déplacement en amont et en aval dans une fibre dopée à l'erbium de 14 m de long et pompée à 980 nm pour une puissances de pompage 10 Mw	52
Figure III.8 (b): l'ASE à déplacement en amont et en aval dans une fibre dopée à l'erbium de 14 m de long et pompée à 980 nm pour une de pompage 40 mW.	53
Figure III.9 : l'ASE se déplaçant en amont et en aval dans une fibre dopée à l'erbium de 14 m de long en fonction de la puissance de pompage, pour les longueurs d'onde de pompage de 980 nm et 1480 nm	54
Figure III.10 : La puissance de pompage en fonction de la position, pour des puissances de pompage injectées à $z = 0$ de 4, 10, 20 et 40 mW à 980 nm	55
Figure III.11 (a): Le gain de signal en fonction de la puissance de pompage pour une	55

longueur de 8 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium pompée à 980 nm et 1480 nm .	
Figure III.11 (b): Le la population à l'état supérieur en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 8 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium pompée à 980 nm et 1480 nm .	56
Figure III.12 (a) :Le gain de signal en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 25 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium pompée à 980 nm et 1480 nm .	57
Figure III.12 (b) : La population à l'état supérieur en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 25 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium pompée à 980 nm et 1480 nm.	57

Liste de tableau

	page
Chapitre III: Résultats de simulations	
Tableau III. 1 : Paramètres de simulation	45



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 la plus grande portée.

Les pertes dans les fibres optiques représentent un problème majeur dans les systèmes de communications optiques modernes. Une solution directe pour résoudre ce problème est d'utiliser les amplificateurs optoélectroniques et fibrés.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est d'analyser les performances d'un amplificateur à fibre dopée erbium .

Ce mémoire est structuré en trois chapitre :

Dans le première chapitre on abordera avec un introduction aux communication optique , on parle a les types des systèmes des communication optiques (LAN,MAN,WAN), ainsi que les technique de multiplexage. Nous allons aussi exposer un définition de la fibre optique et ses types , et nous terminons par les pertes dans les fibres optiques .

Dans le deuxième chapitre "Amplificateur à fibre dopée erbium

EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)" présente premièrement une introduction sur l'amplification optique , les types des amplificateurs optique, l'Erbium et pourquoi nous l'utilisons dans ce amplificateur "EDFA" et la façon dont ça marche .

Dans le troisième chapitre nous ont montré les différentes caractéristiques des fibres optiques amplifiées dopées à l'erbium. Elle nous a donné un aperçu du choix des paramètres qui seraient utilisés pour optimiser l'EDFA, dans ce cas la longueur de la fibre dopée, la puissance de la pompe, ainsi que le gain directement corrélé à la population de l'état supérieur. Ces paramètres sont très importants dans le système de transmission par fibre optique.

Et on termine avec une conclusion là où on adresse les principaux résultats de simulation numériques .

Chapitre I:
Introduction Aux
Communications Optiques

I.1. Introduction:

il s'agit d'un type de communication dans lequel la lumière est utilisée pour transmettre le signal à l'extrémité distante au lieu du courant électrique, et la communication optique repose sur des fibres optiques pour transmettre les signaux vers leurs destinations. Le modulateur ou démodulateur, émetteur, récepteur, le signal optique et le canal transparent sont les éléments de base d'un système de communication optique et, en raison de leurs avantages, les fibres optiques ont largement remplacé les connexions en fil de cuivre dans les réseaux dorsaux du monde développé.

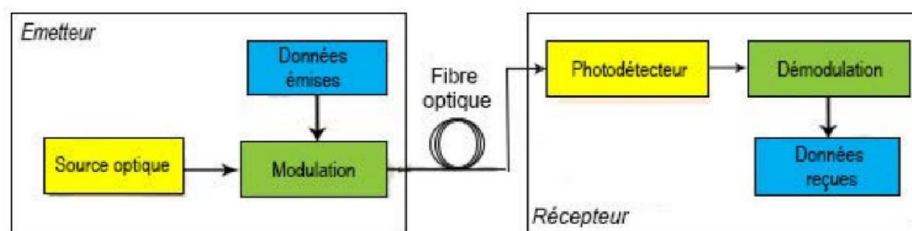


Figure I. 1 : Schéma d'un système de communication optique

R. Karthikeyan, S. Prakasam, "A Survey on Radio over Fiber (RoF) for wireless Broadband Access Technologies", International Journal of Computer Applications, Vol. 64, No .12, February 2013.

I.2. Types des systèmes des communication optiques :

Un réseau informatique ou plus simplement un réseau fait référence à un nombre quelconque de systèmes informatiques indépendants qui sont reliés entre eux pour que **l'échange de données** soit réalisable. Pour cela, en plus d'une connexion physique, il doit aussi exister une connexion logique des systèmes en réseau. Cette dernière est produite par des protocoles réseau spécifiques comme par exemple le protocole TCP (*Transmission Control Protocol*, littéralement protocole de contrôle de transmissions). Même seulement deux ordinateurs reliés entre eux peuvent être considérés comme un réseau.

Les réseaux sont mis en place dans le but notamment de transférer des données d'un système à un autre ou de fournir des ressources partagées comme par exemple les serveurs, les bases de données ou une imprimante sur le réseau. Il est possible selon la taille et la portée du réseau informatique de différencier et de catégoriser les réseaux. Voici ci-dessous les principales catégories de réseaux informatiques :

- Local Area Network (LAN) ou réseau local
- Metropolitan Area Network (MAN) ou réseau métropolitain
- Wide Area Network (WAN) ou réseau étendu

I.2.1. Local Area Network (LAN) :

LAN est une interconnexion d'un groupe de périphériques réseau associés dans une petite zone géographique où la distance entre ces périphériques est petite. Certains des réseaux locaux couvrent également les réseaux au bureau, à l'école et à la maison. La plupart des réseaux locaux sont construits dans le but de partager des ressources vitales telles que des imprimantes et d'échanger des fichiers.

Le LAN est également largement utilisé pour fournir des services tels que le partage d'applications informatiques, les jeux et l'accès à Internet. Ce type de réseau est sous le contrôle d'un administrateur qui est en charge des configurations et des paramètres et des autres périphériques connectés via des câbles Ethernet et des routeurs sans fil.

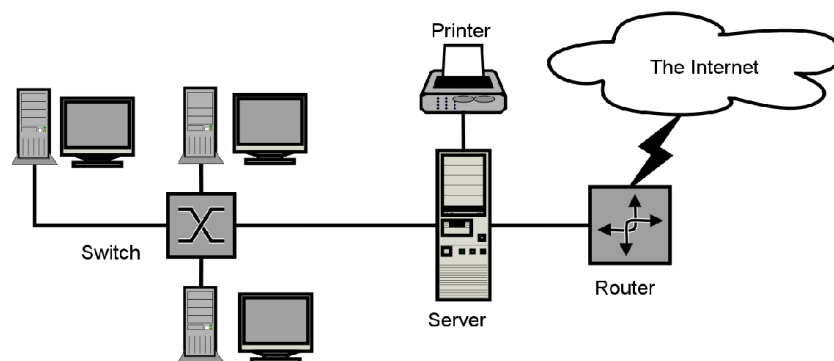


Figure I. 2 : Architecture d'un réseau LAN

I.2.2. Metropolitan Area Network (MAN) :

Comme son nom l'indique, MAN est un type de réseau qui connecte des périphériques réseau dans une zone géographique spécifique. MAN se situe entre LAN et WAN. La zone couverte par le réseau MAN est plus grande que celle du LAN mais plus petite que celle du WAN. Les MAN sont principalement utilisés pour fournir des connexions rapides vers les villes et les grandes institutions.

MAN connaît des vitesses relativement élevées pour faciliter le partage rapide de ressources telles que des fichiers dans une ville. L'un des principaux inconvénients du MAN

est son coût élevé. La technologie déployée pour le réseau MAN est plus chère que celle du LAN et du WAN.

I.2.3. Wide Area Network (WAN) :

Le WAN est une sorte de connexion réseau entre plusieurs périphériques réseau sur une vaste zone géographique. La connexion peut être entre différentes villes ou même des pays. Un réseau WAN peut être un ensemble de petits réseaux qui ont été combinés, ou cela peut être le résultat de diverses entités commerciales privées. Un bon exemple de WAN est Internet, car il connecte des ordinateurs de différents coins du monde.

Le réseau WAN est trop complexe pour être géré par des administrateurs privés. Par conséquent, les WAN ont généralement une propriété publique, où les périphériques réseau de ce réseau peuvent être connectés soit par des câbles, soit via une connexion sans fil.

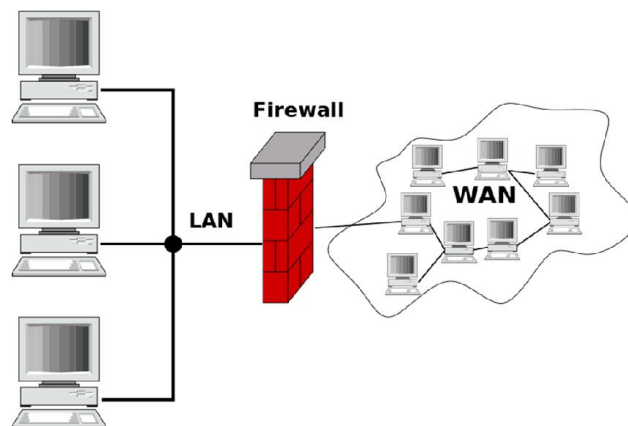


Figure I. 3 : Architecture d'un réseau WAN

Gateway Firewall via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0

I.3. Les technique de multiplexage :

I.3.1. Multiplexage FDM :

FDM (Frequency Division Multiplexing) est une technique de multiplexage par répartition de fréquence (MRF). Elle est utilisée pour accroître les débits sur paires torsadées et plus particulièrement des lignes téléphoniques.

Le multiplexage fréquentiel consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux ou sous-bandes plus étroites et à affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur ou à un usage exclusif.

L'organisation du groupe primaire ou groupe de base utilisé en téléphonie est basé sur un multiplexage fréquentiel. Ce dernier consiste à regrouper 12 voix téléphoniques de 4000 Hz chacune (3000 Hz utilisables plus 2 espaces inter-bandes de 500 Hz) ce qui donne une largeur de bande de 48 kHz répartie entre 60 et 108 kHz.

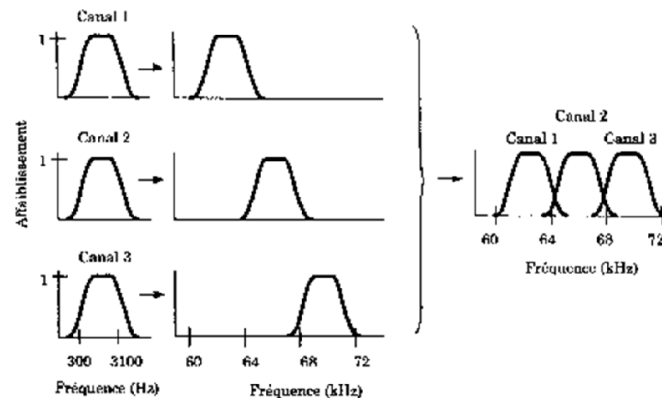


Figure I. 4 : Exemple de multiplexage fréquentiel de trois canaux téléphoniques

On trouve également un bon exemple de l'utilisation de FDM avec ADSL (Asynchronous Digital Subscriber Line). ADSL est né de l'observation qu'une ligne téléphonique possède une bande passante d'environ 1 Mhz dans laquelle seule, une largeur de bande de 4 KHz est utilisée pour les communications téléphoniques. Il reste donc une bande passante importante disponible pour un autre usage. C'est un multiplexage en fréquence qui va permettre son utilisation :

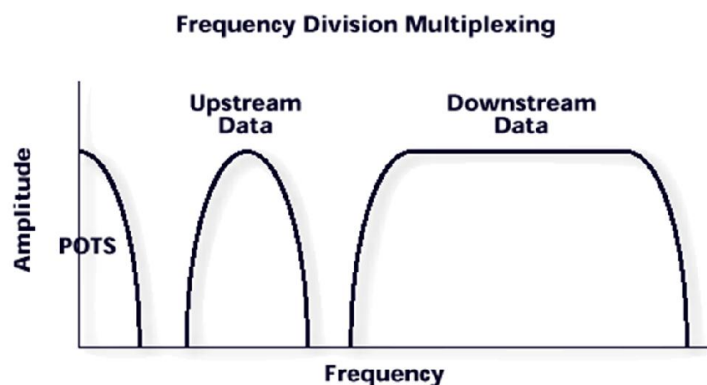


Figure I. 5 : Multiplexage des fréquences en ADSL

Une bande de 4 kHz est réservée pour la téléphonie classique (POTS : Plain Old Téléphone Service)

Une bande est réservée pour le flux de données usager vers réseau. (Upstream Data : Voie montante).

Une bande est réservée pour le flux de données réseau vers usager. (Downstream Data : Voie descendante)

L'ensemble de la bande passante s'étend sur 1,1 MHz.

Le canal dédié au téléphone est séparé des canaux dédiés aux données par un filtre passe-bas (Splitter) passif. Le filtre envoie également l'intégralité du signal au modem ADSL (ATU-R : ADSL transceiver unit-remote). Celui-ci est doté d'un filtre passe-haut qui élimine le canal dédié au téléphone. Le signal est ensuite traité par la technologie DMT pour être transmis à l'équipement informatique via une liaison de type Ethernet 10BaseT ou ATM25.

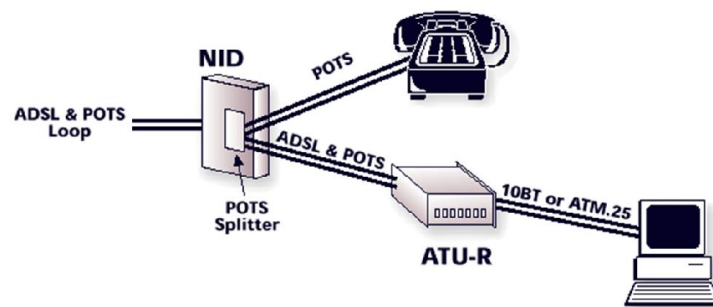


Figure I. 6 : Séparation du téléphone et des données chez l'utilisateur en ADSL

I.3.2. Multiplexage TDM :

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing) ou MRT (Multiplexage à répartition dans le temps) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant et à tour de rôle pour chaque utilisateur.

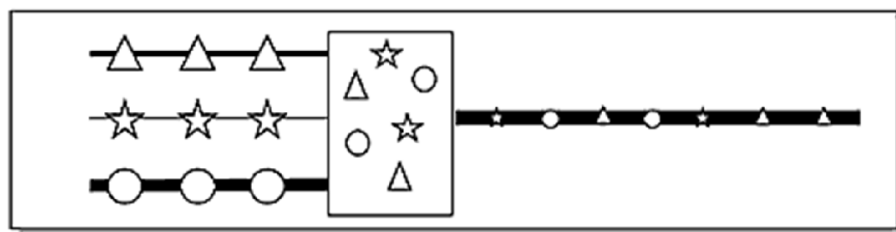
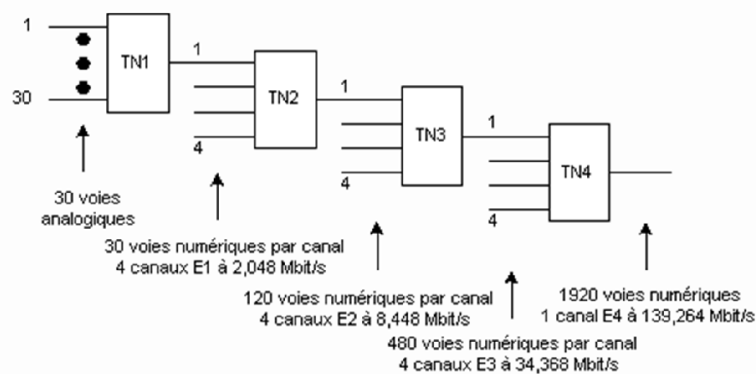


Figure I. 7 : Schéma de principe d'un multiplexage à répartition dans le temps

Le multiplexage TDM permet de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un

On retrouve ce type d'utilisation sur les canaux T1 aux Etats-Unis qui regroupent par multiplexage temporel 24 voies à 64 kbit/s en une voie à 1,544 Mbit/s ou sur les canaux E1 en Europe qui regroupent 30 voies analogiques en une voie à 2,048 Mbit/s.

Les canaux T1 ou E1 peuvent être multiplexés entre eux pour former des canaux à plus hauts débits, etc. Cette hiérarchie des débits est appelée hiérarchie numérique plésiochrone ou PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy).

**Figure I. 8 : Multiplexage temporel dans la hiérarchie PDH en Europe**

Andrew TANENBAUM Réseaux Dunod, juillet 1997, 3^{ème} édition

Cette technique présente toutefois un inconvénient dans le cas de PDH. L'accès ou l'insertion d'une information dans un canal E4 oblige à démultiplexer l'ensemble du train numérique.

De même les technologies SONET (Synchronous Optical NETwork) et SDH (Synchronous Digital Hierarchy) utilisées comme techniques de transport dans les réseaux téléphoniques des grands opérateurs pratiquent un multiplexage temporel pour assembler plusieurs lignes en une seule ligne de débit supérieur.

Le multiplexage TDM peut être utilisé indifféremment sur paire torsadée ou fibre optique, il est indépendant du média de transmission.

I.3.3. Multiplexage WDM/DWDM :

A l'inverse de la technologie TDM qui n'utilise qu'une seule longueur d'onde par fibre

optique, la technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) met en œuvre un multiplexage de longueurs d'onde. L'idée est d'injecter simultanément dans une fibre optique plusieurs trains de signaux numériques sur des longueurs d'ondes distinctes.

La fibre optique se prête bien à ce type d'usage car sa bande passante est très élevée : de l'ordre de 25 000 GHz. Elle présente donc un fort potentiel au multiplexage de très nombreux canaux sur de longues distances.

La norme ITU-T G692 définit la plage de longueurs d'ondes dans la fenêtre de transmission de 1530 à 1565 nm. L'espacement normalisé entre deux longueurs d'ondes est de 1,6 ou 0,8 nm. La fibre optique utilisée est de type monomode.

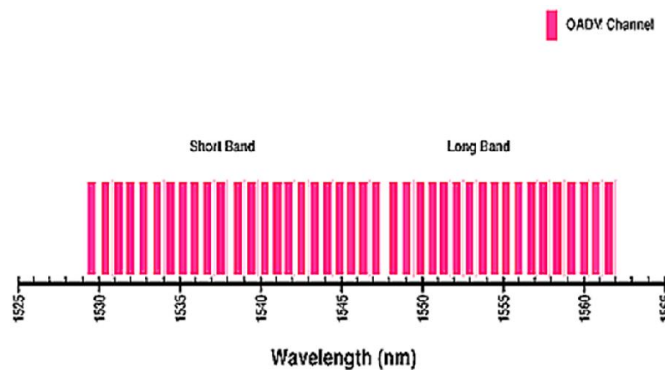


Figure I. 9 : Peigne des fréquences en DWDM

La technologie WDM est dite DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 0,8 nm ou lorsque plus de 16 canaux sont utilisés. Des tests ont déjà été effectués avec des espacements de 0,4 et 0,2 nm.

L'utilisation d'une fibre peut-être unidirectionnelle ou bidirectionnelle.

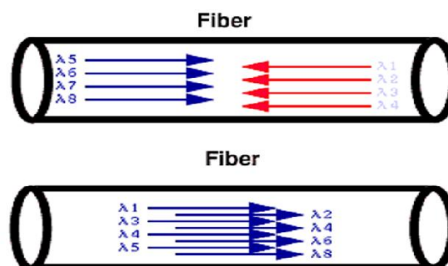


Figure I. 10 : DWDM unidirectionnel et bidirectionnel

Les systèmes commercialisés aujourd'hui proposent 4, 8, 16, 32 et même 80 canaux optiques à 2,5 Gbit/s par canal. Les débits atteints avec de tels systèmes sont de 10, 20, 40, 80 et même 200 Gbit/s. Un système à 16 canaux de 2,5 Gbit/s, soit 40 Gbit/s permet l'acheminement de 500 000 conversations téléphoniques simultanément sur une seule paire de fibre optique. Il faut également s'attendre à un accroissement du débit offert sur chaque canal qui pourrait rapidement atteindre 10 Gbit/s.

Principe d'une liaison WDM/DWDM

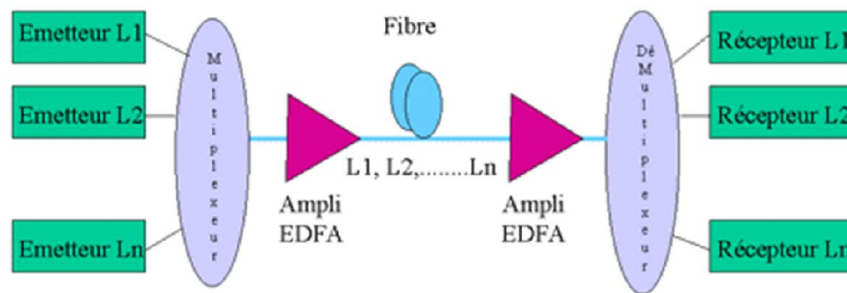
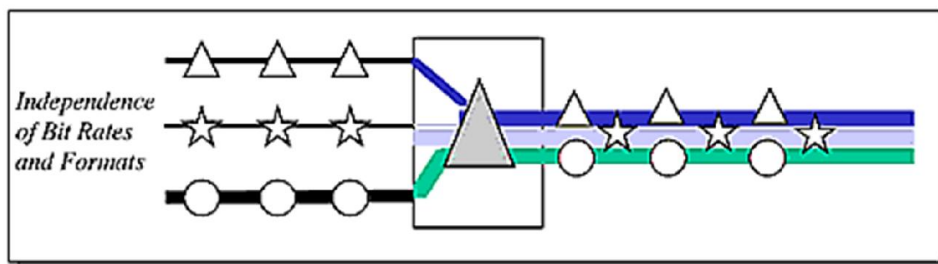


Figure I. 11 : Principe d'une liaison WDM/DWDM

Un des éléments clefs est l'amplificateur à fibre dopée erbium, EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Il compense les pertes d'insertion dues aux multiplexage/démultiplexage des longueurs d'onde. Il permet également une réduction du bruit. Ce type de technologie nécessite des amplificateurs tous les 50 à 100 km. Ceci est dû à des phénomènes non linéaires qui se développent lors de la propagation du signal dans la fibre et qui introduisent des risques de diaphonie et de mélange des canaux.

Les travaux récents du C.N.E.T (Centre National d'Etudes en Télécommunications) sur la transmission soliton montrent que l'on peut repousser cette limite à 1000 kilomètres. Un soliton est une onde qui se propage sans déformation remarquable de sa forme ni variation de sa vitesse. Ce phénomène a été remarqué pour la première fois sous la forme d'une vague dans un canal, mais il existe dans de nombreux domaines, dont la lumière.

Chaque train de signaux numériques est véhiculé sur sa propre longueur d'onde comme sur une seule fibre. Ils peuvent donc être de débits et de formats différents.



On peut trouver par exemple sur une même fibre optique et véhiculés simultanément de la voix data

Figure I. 12 : Indépendance des débits et formats de chaque canaux en WDM

optique ce que l'on sait faire transiter unitairement sur ce type média.

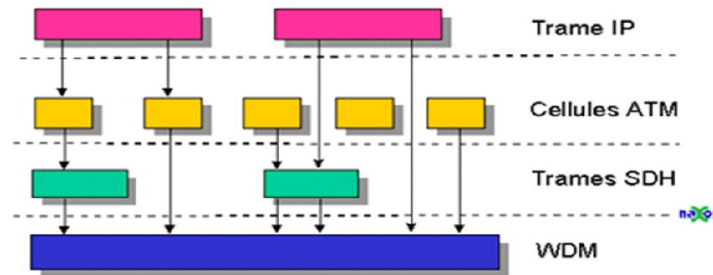


Figure I. 13 : Combinaisons entre les différents couches servies et transports

Chaque canal peut être attribué à un usage particulier. Il est ainsi possible dans le cas d'un réseau métropolitain ayant une architecture physique en anneau de déployer à travers différents canaux des structures logiques maillées, en bus, point à point, en anneau ou en diffusion. L'attribution d'une longueur d'onde pour une utilisation donnée se fait par reconfiguration logicielle du système et ne nécessite aucune modification matérielle.

Les enjeux de cette technologie sont importants. Jusqu'à présent le développement des réseaux de télécommunications était basé sur l'utilisation des technologies de type SONET/SDH/TDM. Mais les besoins en bande passante ont dépassé les prévisions. Le câble transatlantique Gemini a ainsi saturé dès 1997, alors que cela n'aurait pas dû se passer avant 2001. Les opérateurs installent en moyenne des réseaux de 12, 24 voire 48 paires de fibres. La technologie DWDM va permettre de multiplier par au moins 16 la bande passante disponible sur ces réseaux.

Il faut noter que d'autres composants sont essentiels au développement des réseaux optiques pour qu'ils deviennent "tout optique", il s'agit des multiplexeurs à insertion/extraction optiques, des brasseurs optiques et des commutateurs optiques.

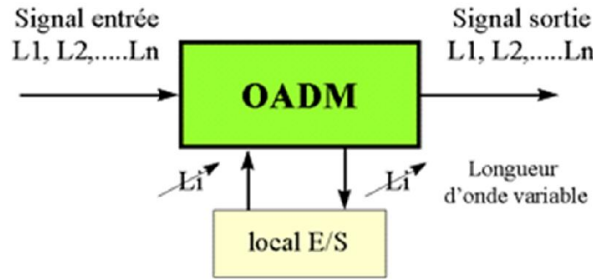


Figure I. 14 : Schémas de principe d'un multiplexeur à insertion/extraction optiques

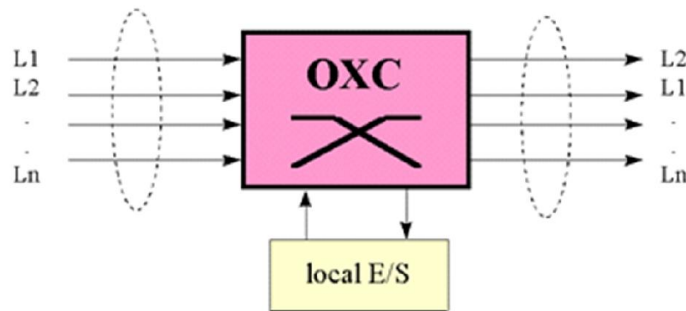


Figure I. 15 : Schéma de principe d'un brasseur optique (Optical Cross-Connect : OXC)

Ces fonctions sont aujourd'hui encore assurées par du matériel électrique; mais le temps de conversion des signaux électriques en signaux optiques et inversement est important. Une meilleure exploitation de la fibre et de DWDM passe donc par la mise en place de réseaux tout optiques.

I.4. Le fibre optique:

Les fibres optiques sont des fibres transparentes flexibles en verre pur (silice) ou en plastique, d'un diamètre légèrement plus épais que le diamètre d'un cheveu humain, et sont utilisées dans les communications optiques, en raison de leur capacité à transmettre des distances plus éloignées et des ondes longitudinales plus élevées (taux de transfert de données) que les câbles métalliques traditionnels.

Les fibres sont utilisées à la place des fils métalliques car les signaux y circulent avec le moins de risque de perte, et les fibres sont insensibles aux interférences électromagnétiques dont les fils métalliques souffrent énormément.

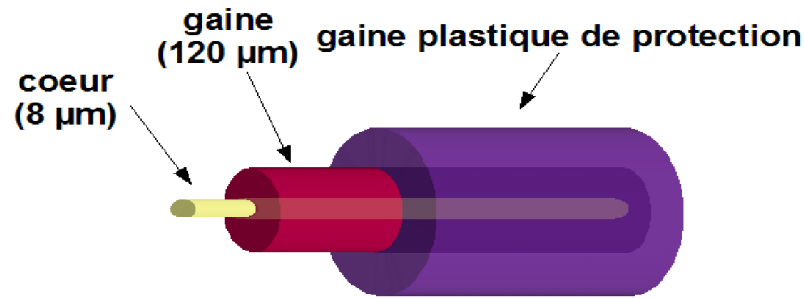


Figure I. 16 : Structure d'un fibre optique

Il existe plusieurs types de fibres optiques, et ce sont :

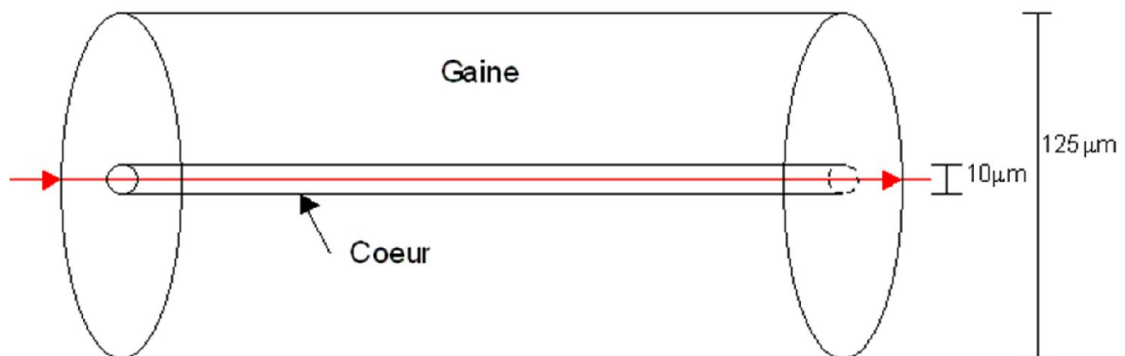
I.4.1. La fibre multi mode:

Chaque ligne de produits émetteur/récepteur FO existe en version multimode et monomode, la fibre multi mode quant à elle se définit par les rayons lumineux qui peuvent suivre des parcours différents, suivant l'angle de réfraction.

I.4.2. La fibre monomode :

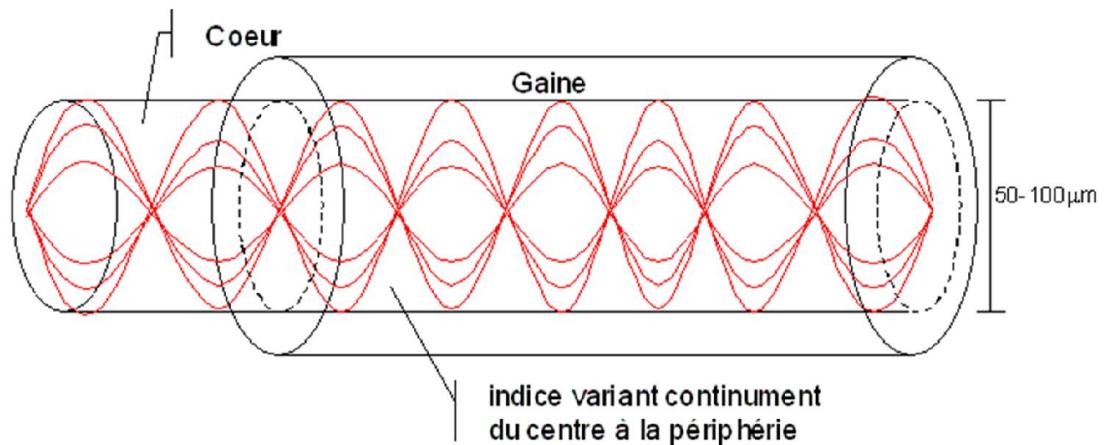
La différence de la fibre monomode avec la fibre multimode, vous l'aurez compris, se trouve au niveau des rayons qui ne suivent qu'un seul chemin. Son cœur est si fin que le parcours de propagation des différents modes est quasiment direct. La dispersion du signal est inexistante, donc très peu déformé, sa capacité est d'environ 100 gigabits/Km, l'indice de réfraction est constant ou décroissant.

Son usage est essentiellement utilisé pour les sites à distance et son diamètre de cœur est petit nécessitant une grande puissance d'émission. Son coût est onéreux par rapport à la fibre multimode en partie à cause de ses diodes au laser.



*Figure I. 17 : La fibre à saut d'indice***I.4.3. La fibre à gradient d'indice :**

Une fibre essentiellement conçue pour les télécommunications, son cœur n'est plus homogène et sa valeur d'indice de réfraction décroît depuis l'axe, jusqu'à atteindre l'indice de la gaine. Cela implique une propagation par effet de focalisation, le rayon lumineux est continuellement dévié vers l'axe optique de la fibre, ce qui oblige le signal optique à une forme de signal sinusoïdal.

*Figure I. 18 : La fibre à gradient d'indice***I.4.4. La fibre à saut d'indice :**

La fibre à saut d'indice dispose de faibles signaux d'impulsion de sortie, ce type de fibre est la plus ordinaire utilisée dans les réseaux de type LAN. Il existe plusieurs modes de propagation de la lumière au sein de son cœur, étant donné que la fibre à saut d'indice est multimode. Cette fibre subit une très grande variation entre l'indice de réfraction du cœur et la gaine optique, ce qui explique pourquoi les rayons lumineux se propagent par réflexion totale interne en dents de scie.

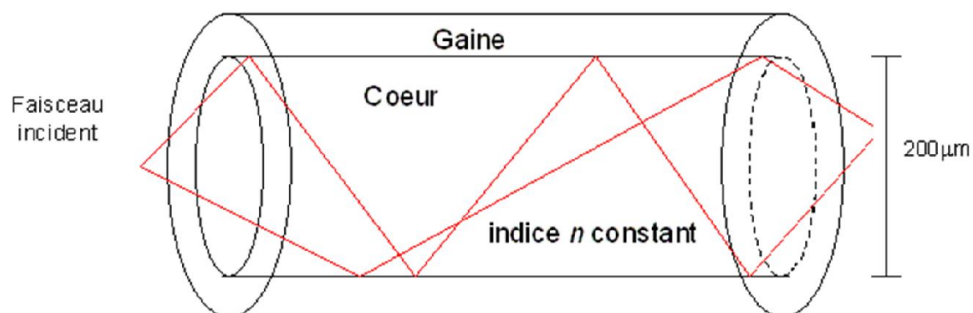


Figure I. 19 : La fibre monomode

I.5. Les pertes dans les fibres optiques :

Une onde se propageant dans une fibre optique est atténuée tout le long de sa propagation. Plusieurs processus participent à l'atténuation. Ces processus peuvent être classés en deux catégories: ceux qui sont liés au matériau du coeur (la silice) et sa qualité de fabrication (absorption, diffusion) et d'autres qui sont relatifs à la capacité de la gaine de piéger l'onde dans le coeur. Dans la première catégorie, on trouve l'absorption électronique, l'absorption multiphotonique, la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie. Dans la deuxième catégorie, on trouve les pertes par confinement et les pertes par courbure.

I.5.1. Pertes par absorption :

Ce type de perte se traduit par une conversion de l'énergie des photons en une autre forme d'énergie (vibration par exemple). En effet, la plage de transparence (appelée aussi bande optique) d'un matériau s'étend des bandes d'absorption électronique aux faibles longueurs d'ondes (Band Gap) aux bandes d'absorption de réseau (absorption multiphoton) aux grandes longueurs d'ondes. Ces deux bandes, centrées sur des dipôles électroniques ou atomiques, déterminent le domaine d'utilisation du matériau (200-2000 nm pour la silice). Entre ces deux bandes intrinsèques existent bien souvent des bandes d'absorption localisées (extrinsèques) dues à la présence d'impuretés comme le carbone, les métaux de transitions, l'eau,...etc. Ces impuretés peuvent provenir des matières premières et peuvent également être intégrées au matériau lors de sa synthèse.

I.5.2. Pertes par diffusion :

Les pertes par diffusion proviennent de variations microscopiques de la densité du matériau, de fluctuations de composition et d'inhomogénéité ou de défauts induits durant le processus de fabrication de la fibre. En présence d'un centre diffusant, une onde se propageant subit une diffusion dans toutes les directions (Figure I. -1-). Une partie des rayons diffusés sortent du coeur de la fibre et se dispersent dans la gaine, provoquant ainsi une perte de puissance de l'énergie lumineuse transmise, donc une atténuation du signal qui est fonction de λ , et qui décroît rapidement lorsque λ augmente. Il existe deux types de diffusion: la diffusion linéaire (élastique), pour laquelle les photons diffusés gardent la même fréquence, et la diffusion non linéaire (inélastique), pour laquelle les photons diffusés voient leur fréquence

modifiée. On distingue deux sous-types de diffusion linéaire, selon les dimensions du centre diffusant: la diffusion Rayleigh qui se manifeste lorsque les dimensions sont très petites devant la longueur d'onde et la diffusion de Mie qui se manifeste les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde.

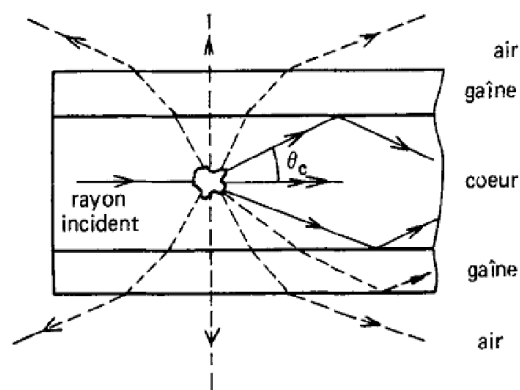


Figure I. 20 : Diffusion dans le cœur d'une fibre optique

La Figure(I. 21) illustre les différents mécanismes de pertes due au matériau.

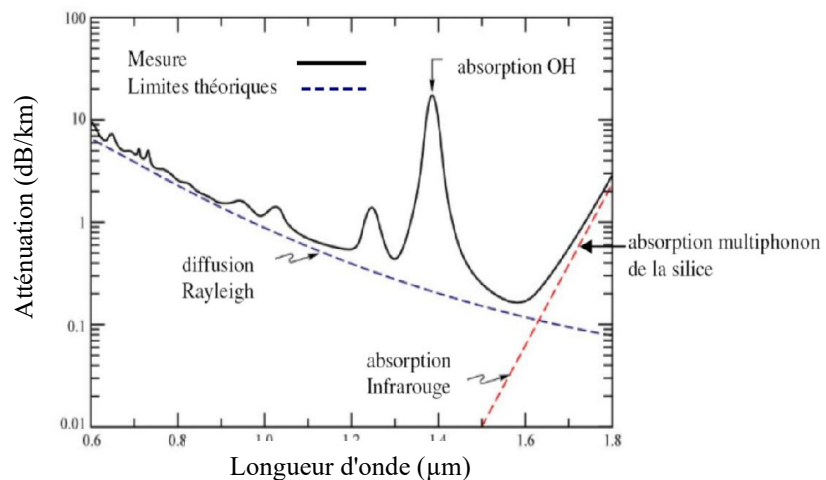


Figure I. 21: les différentes sources d'atténuation dans les fibres de silice

I.5.3. Pertes par confinements :

Les pertes par confinement sont dues à la dimension finie de la gaine, qui peut entraîner un transfert d'énergie des modes de cœur vers les modes de la gaine externes (non confinés) par effet tunnel optique.

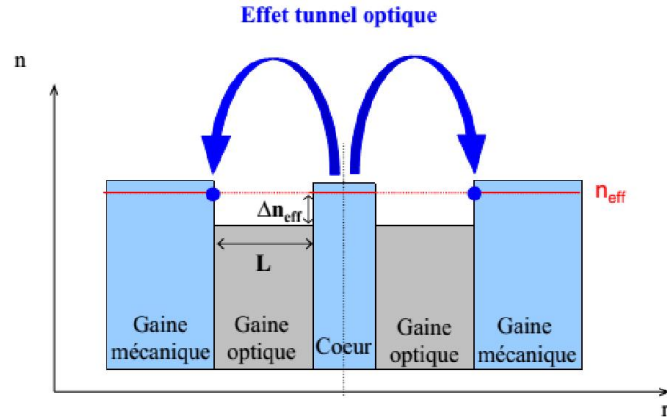


Figure I. 22 : Illustration de l'effet tunnel optique dans une fibre droite à saut d'indice.

Les points bleus sur la coupe d'indices effectifs à λ fixe indiquent l'égalité d'indice effectif entre mode de cœur et modes de gaine

I.5.4. Pertes totales :

Les pertes cumulées dans les fibres optiques, après la propagation d'une distance z , peuvent être exprimées par la relation suivantes:

$$P_{out}(z) = P_{in} e^{-\alpha z} \quad (I.1)$$

L'expression des pertes en dB est donnée par:

$$\alpha_{dB} = -10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} = 4.343 \alpha z \quad (I.2)$$

Un guide d'onde optique est dispersif lorsque l'indice effectif de son mode fondamental est fonction de la longueur d'onde. Ainsi une impulsion se propageant dans une fibre optique subira un étalement temporel plus ou moins important en fonction de sa longueur d'onde centrale et de sa largeur temporelle. En effet, lorsqu'une impulsion lumineuse se propage dans

un guide, la phase spectrale associée à chacune des composantes spectrales de l'onde peut s'exprimer par:

$$\varphi(\omega) = \beta(\omega)L \quad (I.3)$$

où β est la constante de propagation et à la fréquence porteuse $f = \omega/2\pi$ et L est la longueur de propagation.

L'impulsion ayant une largeur spectrale non nulle autour de la fréquence f_0 , nous pouvons utiliser le développement de Taylor autour de la pulsation ω_0 pour exprimer la constante de propagation β à la pulsation ω :

$$\beta(\omega) = \sum_n \frac{\beta^{(n)}}{n!} (\omega - \omega_0)^n \quad \text{avec} \quad \beta^{(n)} = \left. \frac{\partial^n \beta}{\partial \omega^n} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (I.4)$$

Le terme β_1 est inversement proportionnel à la vitesse de groupe v_g de l'onde et β_2 correspond à la dérivée (par rapport à ω) de la vitesse de groupe plus connue sous le nom de dispersion de vitesse de groupe (GVD: Group Velocity Dispersion):

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (I.5)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \quad (I.6)$$

Dans le domaine des fibres optiques, on utilise plus le terme de dispersion chromatique, notée D_c , exprimé en ps/(nm.km) et donné par :

$$D_c = -\frac{2\pi c}{\lambda} \beta_2 \quad (I.7)$$

La dispersion chromatique résulte de la contribution de deux sources: la dispersion du matériau et la dispersion de guide:

$$D_c = D_m + D_g \quad (I.8)$$

La dispersion de matériau D_m traduit le fait que l'indice de matériau (la silice) varie en fonction de la longueur d'onde. Cette variation est souvent exprimée par le formule de Sellmeier donnée par:

$$n_{silice}^2(\lambda) = 1 + \sum_{k=1}^3 \frac{b_k \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_k^2} \quad (I.9)$$

avec: $b_1 = 0.6961663$, $b_2 = 0.4079426$, $b_3 = 0.8974794$, $\lambda_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$ et $\lambda_3 = 9.896161 \mu\text{m}$.

La dispersion de matériau est donnée par:

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{silice}}{d\lambda^2} \quad (I.10)$$

La dispersion de la silice est négative pour des longueurs d'onde inférieures à $1,27 \mu\text{m}$ et positive au-delà de cette valeur.

Quant à la dispersion de guide, son expression est donnée par:

$$D_g = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \quad (I.11)$$

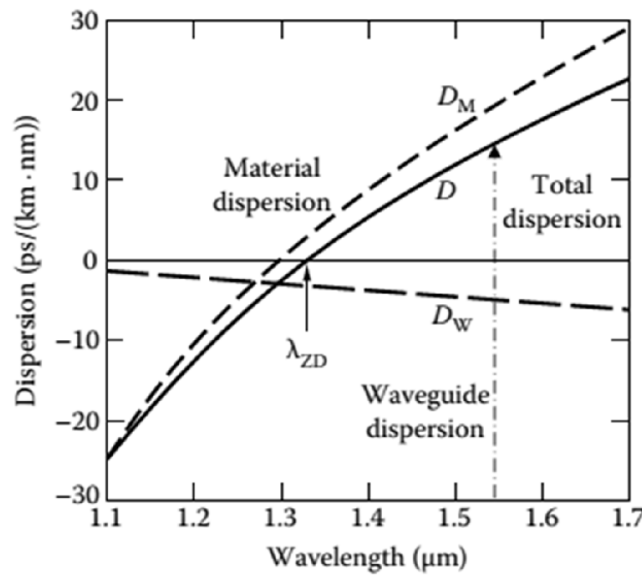


Figure I. 23 : Evolution de la dispersion chromatique de matériau, de guide et totale

I.5.5. La biréfringence de phase :

Dans une fibre optique conventionnelle monomode, le mode fondamental se décompose sur deux modes dont la polarisation est quasi linéaire (le mode LP_{01x} polarisé dans la direction des x , et le mode LP_{01y} polarisé dans la direction des y , perpendiculaire). Toute onde injectée dans une fibre monomode se décompose donc sur la base de ces deux modes.

Si la fibre est isotrope, les directions de polarisation x et y sont quelconques (x et y restent néanmoins perpendiculaires) et les indices effectifs des deux modes n_{effx} et n_{effy} sont identiques. Cela signifie que l'état de polarisation d'une onde injectée dans la fibre est conservé au cours de la propagation.

Au contraire, dans une fibre anisotrope, il existe seulement deux directions x et y perpendiculaires (axes neutres) dans le plan de la section droite de la fibre telles qu'une onde injectée polarisée linéairement suivant cette direction conserve sa polarisation linéaire.

Les deux modes LP_{01x} et LP_{01y} polarisés linéairement dans les directions x et y (modes propres de polarisation) ont des indices effectifs n_{effx} et n_{effy} différents. Une onde polarisée linéairement dans une direction quelconque se décompose sur la base des deux modes de polarisation qui se propagent en se déphasant. L'état de polarisation de l'onde guidée évolue donc tout au long de la propagation. La biréfringence linéaire de phase est définie par:

$$B = |n_{effx} - n_{effy}| \quad (I.12)$$

L'anisotropie d'une fibre qui induit la levée de la dégénérescence des deux modes de polarisation et l'apparition de la biréfringence de phase peut avoir deux causes. La première réside dans la rupture, volontaire ou non, de la symétrie de la section droite de la fibre. La deuxième est l'existence éventuelle de contraintes anisotropes au sein du matériau constitutif de la fibre qui donnent alors à l'indice de réfraction un caractère tensoriel. Ces contraintes ont pu apparaître contre la volonté des fabricants lors des étapes de fabrication ou, au contraire, être introduites délibérément en vue d'augmenter la biréfringence pour des raisons que nous allons rappeler maintenant.

I.5.6. L'aire effective de mode :

Lorsque la puissance optique est injectée dans la fibre, le champ électrique créé suit une loi de distribution qui n'est pas uniforme. L'intensité du champ est plus élevée sur l'axe de la fibre et diminue progressivement quand on s'éloigne. L'aire effective est déduite de la répartition transverse du module du champ électrique $\vec{E}(x, y)$:

$$A_{eff} = \frac{\left(\iint_{\infty} |\vec{E}(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\iint_{\infty} |\vec{E}(x, y)|^4 dx dy} \quad (I.13)$$

L'aire effective nous renseigne sur le seuil d'apparition en puissance d'effets non linéaires dans le cœur de la fibre, celui-ci diminuant avec l'aire effective du mode. Une aire effective faible par rapport à la taille du cœur nous indique une forte localisation transverse de l'énergie du mode, correspondant généralement à un mode de défaut. Au contraire, une aire effective grande par rapport à la taille du cœur correspond à un mode dont l'énergie est très étalée dans la structure, généralement un mode de gaine.

I.6. Conclusion:

Les communications optiques ne cessent pas à développer vu la demande croissante en terme de débit et service. Deux problèmes majeurs à palier afin de répondre aux besoins de clients: la dispersion chromatique et les pertes. Pour la dispersion chromatique, on emploie souvent des fibres spéciales à profile de dispersion exceptionnel pour compenser l'effet cumulé de la dispersion. Quant aux pertes, ce sont les amplificateurs qui jouent le rôle décisif. L'objectif de prochain chapitre est d'analyser les différents types d'amplificateurs y compris ceux à base de fibre dopée à l'erbium.

Chapitre II:

Amplificateur à fibre dopée erbium

EDFA

II.1. Introduction :

L'amplification optique est l'amplification directe d'un flux de photons à travers un composant, longtemps utilisée seule après l'apparition des lasers dont elle est l'un des deux phénomènes indispensables avec le phénomène de résonance. Les amplificateurs optiques sont utilisés dans le domaine des télécommunications à fibres optiques et dans certaines applications métrologiques de faible flux lumineux. Les matériaux utilisés peuvent être aussi bien des cristaux (semi-conducteurs) que des matériaux amorphes (silice dopée).

Le phénomène physique à la base de l'amplification optique est l'émission stimulée qui correspond à l'émission d'un photon consécutivement au passage d'un autre photon. Ce phénomène est le phénomène inverse de l'absorption avec un paramètre g appelé gain qui est l'opposé du coefficient d'absorption a . Un matériau devient amplificateur lorsqu'on a réalisé l'inversion de population qui consiste à peupler les niveaux énergétiques supérieurs de manière plus importante que les niveaux inférieurs à l'aide d'une source extérieure appelée pompe. Les amplificateurs optiques à fibres ont connu un essor important grâce aux télécommunications optiques pour régénérer le signal. Elles ont l'avantage d'une faible sensibilité à la polarisation par rapport aux amplificateurs à semi-conducteurs. Comme elles amplifient toutes les longueurs d'onde dans un domaine, elles ont permis le développement de la technologie DWDM. [1]

Un amplificateur optique est un appareil qui amplifie directement un signal optique, sans le convertir au préalable en un signal électrique. Un amplificateur optique peut être considéré comme un laser sans cavité optique, ou un laser dans lequel les réactions de la cavitation sont inhibées. Les amplificateurs optiques sont importants dans la communication optique et la physique des lasers. Ils sont utilisés comme répéteurs optiques dans les longs câbles à fibres optiques qui transportent de nombreuses liaisons de communication dans le monde.

Il existe de nombreux mécanismes physiques différents qui peuvent être utilisés pour amplifier le signal lumineux, qui sont compatibles avec les principaux types d'amplificateurs optiques. Dans les amplificateurs radio et laser en vrac, l'émission stimulée au milieu du gain de l'amplificateur amplifie la lumière entrante. Dans les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA), la recombinaison se produit au niveau de la fente électronique. Dans les amplificateurs Raman, la diffusion Raman de la lumière entrante avec les phonons dans le

réseau moyen se traduit par le gain des photons cohérents avec les photons entrants. Les amplificateurs paramétriques utilisent une amplification paramétrique.

Un dispositif pour amplifier directement un signal optique selon le principe de l'émission stimulée. Il utilise le même principe que le laser, mais contrairement au laser lui-même il n'émet pas de lumière (transmet), il amplifie fidèlement l'incident du signal optique de l'extérieur. Équipement indispensable pour la communication optique. Il est également appliqué au traitement optique de l'information et à la fusion laser.[2]



Figure II.1 : amplificateur optique

Il existe plusieurs types d'amplificateurs optiques :

II.2. Amplificateurs à effet Raman :

Les amplificateurs Raman n'utilisent pas les transitions atomiques d'ions dopés terres-rare dans les fibres mais se basent sur un échange d'énergie par diffusion Raman. Tous les matériaux ont un spectre Raman caractéristique. Un faisceau laser de pompage injecté dans la fibre (dans le sens de propagation du signal ou préférentiellement en sens inverse) va amplifier la lumière décalée vers les basses fréquences d'environ 13,2 THz, valeur caractéristique du décalage Raman dans la silice. Pour les télécommunications optiques usuelles à 1 550 nm, il faut donc utiliser un laser de pompage autour de 1 450 nm.

L'amplification Raman présente divers avantages. Elle ne nécessite pas de fibres spéciales. Elle peut donc être utilisée directement dans les fibres de communication et elle se répartit naturellement le long de la fibre. On parle alors d'amplification Raman distribuée. Une amplification distribuée dégrade moins le rapport signal à bruit qu'une amplification localisée. L'amplification Raman présente également des atouts non négligeables dans les communications multiplexées en longueurs d'onde car sa bande passante de gain est

supérieure à celles offertes par les autres techniques d'amplification. En revanche, elle requiert une forte puissance optique de pompage. [3]

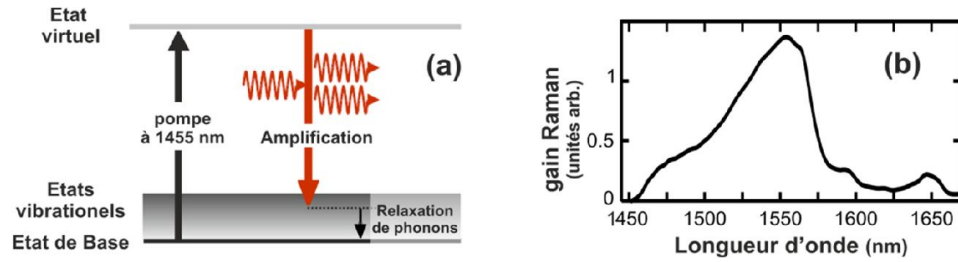


Figure II.2: Amplification Raman

II.3. Amplificateurs paramétriques à fibre :

II.3.1. Amplificateur à fibre dopée :

Un amplificateur à fibre dopée fonctionne à la manière d'un laser. Une portion de fibre optique est dopée et est pompée optiquement avec un laser afin de placer les ions de dopage dans un état excité. Lorsqu'un signal lumineux passe à travers ce morceau de fibre optique, il désexcite les ions par effet laser en produisant un photon en tout point identique au photon incident. Le signal lumineux a donc été doublé.

Par effet d'avalanche, l'amplification du signal se fait jusqu'à la sortie de la section dopée de la fibre optique. [3]

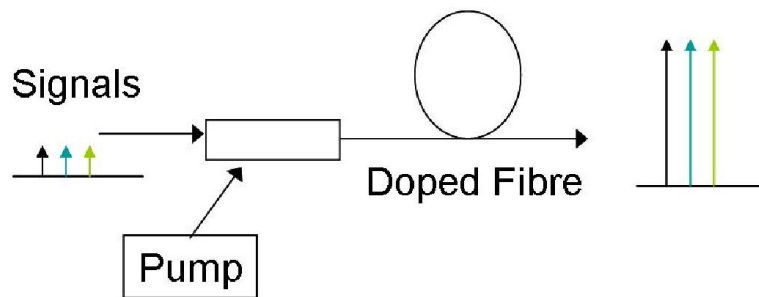


Figure II.3 : Diagramme schématique d'un amplificateur à fibre dopée

II.3.2. Amplificateur à fibre dopée à l'erbium :

En tant que partie intégrante de la transmission de données longue distance, un amplificateur optique est capable d'amplifier des signaux optiques directement sans qu'il soit nécessaire de convertir le signal en signal électrique avant l'amplification, ce qui est également la caractéristique la plus importante. Parmi les nombreux amplificateurs optiques différents qui peuvent réaliser une amplification via une communication optique longue

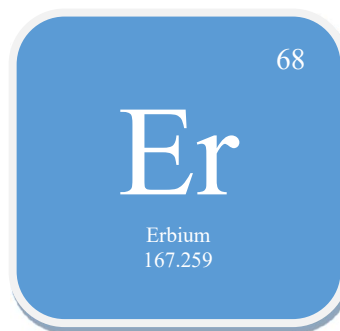
distance, l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) est l'un des types les plus couramment utilisés.

II.3.3. Pourquoi l'Erbium ?

Les ions erbium ont des niveaux quantiques qui leur permettent d'être stimulés pour émettre dans la bande de 1540 nm, ce qui a la plus faible perte de puissance dans la fibre à base de silice.

Les niveaux quantiques d'erbium lui permettent également d'être excité par un signal à 980 nm ou 1480 nm, qui a la plus forte perte dans la fibre à base de silice.

- **Nombre atomique :** 68
- **Masse atomique:** 167.259
- **Densité :** 9.07 g/cm³
- **Etat à température ambiante:** Solide
- **Classification:** Métal
- **Groupe:** Lanthanide
- **Nombre d'isotopes stables:** 6
- **Energie d'ionisation:** 6.108 eV
- **Etat d'oxydation:** +3
- **Famille:** Terre rare



II.3.4. Amplificateur optique EDFA - Amélioration des signaux optiques plus efficacement :

Lorsqu'il est transmis sur de longues distances, le signal optique doit être amplifié plusieurs fois entre les deux en raison de la perte de signal due à l'atténuation de la fibre, aux pertes de connectivité, aux pertes d'épissage de fibre, etc. Avant d'inventer un amplificateur optique, le signal optique doit être le premier. converti en un signal électrique, amplifié, puis reconverti en un signal optique. Le processus est très compliqué et coûteux. Pour surmonter un tel problème, l'amplificateur optique a depuis été inventé pour amplifier directement les signaux de sorte que ce procédé soit nettement moins cher et a entamé une révolution de la fibre optique. [4]

Il existe plusieurs types d'amplificateurs à fibre optique: l'amplificateur optique à semi-conducteur (SOA), l'amplificateur à fibre Raman et Brillouin et l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA). Parmi ces types d'amplificateurs optiques, l'EDFA est le plus largement déployé dans le système WDM. Il utilise la fibre dopée à l'erbium comme milieu d'amplification optique pour améliorer directement les signaux. De nos jours, l'EDFA est couramment utilisé pour compenser la perte de fibre dans les communications optiques longue distance. La caractéristique la plus importante est qu'il peut amplifier plusieurs signaux optiques simultanément et facilement combiné avec la technologie WDM. Généralement, il est utilisé dans la bande C et la bande L, presque dans la plage de 1530 à 1565 nm. Mais il faut également noter que les EDFA ne peuvent pas amplifier des longueurs d'onde inférieures à 1525 nm. [4]

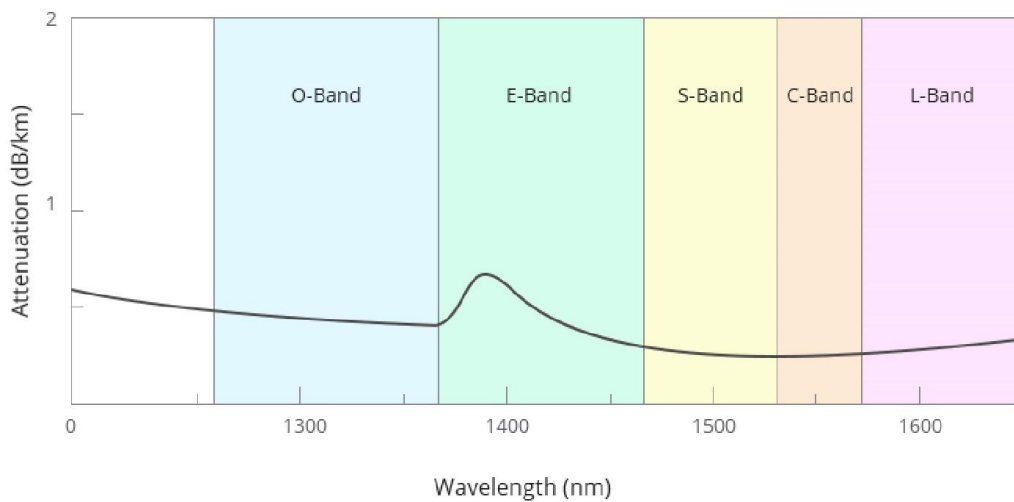


Figure II. 4 : le diagramme d'atténuation en fonction la longueur d'onde dans les différents bandes

II.4. Comment fonctionne un EDFA?

La structure de base d'un EDFA se compose d'une longueur de fibre dopée à l'erbium (EDF), d'un laser à pompe et d'un combineur WDM. Le combineur WDM est destiné à combiner le signal et la longueur d'onde de la pompe afin qu'ils puissent se propager simultanément à travers l'EDF. L'image du bas montre un diagramme schématique plus détaillé de l'EDFA.[4]

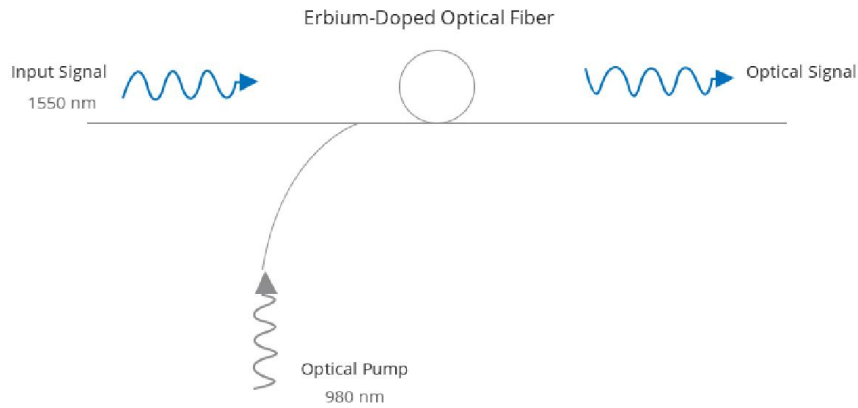


Figure II. 5 : Schéma d'un système générale d'amplification en utilisant l'EDFA

II.4.1 Spectre de pompage et de gain :

Le noyau de fibre à l'intérieur d'un EDFA contient des ions erbium (Er^{3+}), et leur pompage à une longueur d'onde appropriée fournit le gain optique par inversion de population. Le spectre de gain dépend du schéma de pompage ainsi que de la présence d'autres dopants, tels que la germanie et l'alumine, dans le cœur de la fibre. La nature amorphe de la silice élargit les niveaux d'énergie d' Er^{3+} en bandes. La Figure II. (a) ci-dessous montre quelques bandes d'énergie d' Er^{3+} dans des verres de silice [5] .

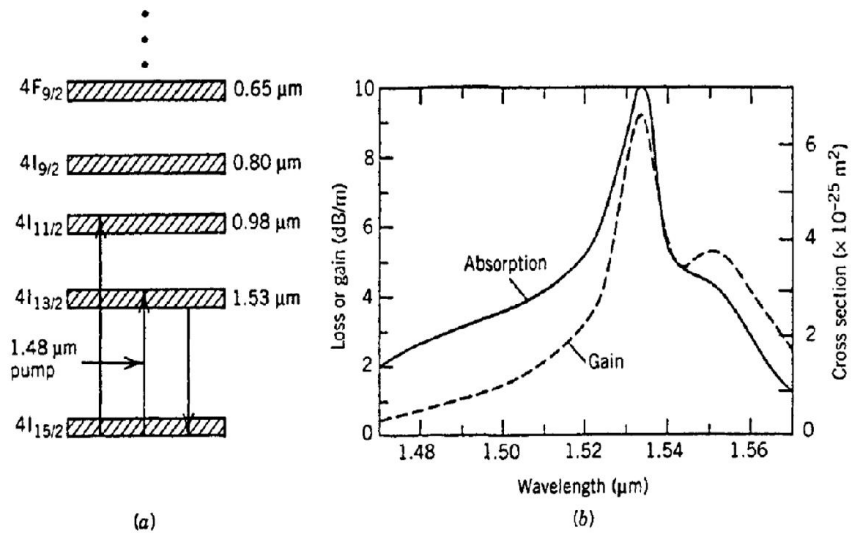


Figure II. 6 : (a) diagramme du niveau d'énergie des ions erbium dans les fibres de sélica - (b) spectres d'absorption et de gain d'un edfa dont le coeur a été codopé avec germania

De nombreuses transitions peuvent être utilisées pour pomper un EDFA. Un pompage EDFA efficace est possible en utilisant des lasers à semi-conducteurs fonctionnant à des longueurs d'onde proches de 0,98 et 1,48 μm . En effet, le développement de ces lasers à pompe a été alimenté par l'avènement des EDFA. Il est possible d'obtenir un gain de 30 dB avec seulement 15 à 20 mW de puissance absorbée de la pompe. Des rendements aussi élevés que 11 dB / mW ont été atteints en 1990 avec un pompage de 0,98 μm . La plupart des EDFA utilisent des lasers à pompe de 980 nm car ces lasers sont disponibles dans le commerce et peuvent fournir plus de 100 mW de puissance de pompe. Le pompage à 1480 nm nécessite des fibres plus longues et des puissances plus élevées car il utilise la queue de la bande d'absorption représentée sur la Figure II. (b) ci-dessus.

Les EDFA peuvent être conçus pour fonctionner de telle manière que la pompe et les faisceaux de signaux se propagent dans des directions opposées, une configuration appelée pompage vers l'arrière pour le distinguer de la configuration de pompage vers l'avant. Les performances sont à peu près les mêmes dans les deux configurations de pompage lorsque la puissance du signal est suffisamment faible pour que l'amplificateur reste insaturé. En régime de saturation, le rendement de conversion de puissance est généralement meilleur en configuration de pompage vers l'arrière, principalement en raison du rôle important joué par l'émission spontanée amplifiée (ASE). Dans la configuration de pompage bidirectionnel, un EDFA est pompé dans les deux sens simultanément en utilisant deux lasers à semi-conducteurs situés aux deux extrémités de la fibre. Cette configuration nécessite deux lasers à pompe mais présente l'avantage que l'inversion de population [5] .

La Figure II. (b) ci-dessus montre les spectres de gain et d'absorption d'un EDFA dont le coeur a été dopé avec de la germania. Le spectre de gain est assez large et a une structure à double pic. Sa forme est considérablement affectée par la nature amorphe de la silice et par la présence d'autres dopants à l'intérieur du coeur de la fibre comme l'alumine. Le spectre de gain est élargi de manière homogène pour les ions erbium isolés. Cependant, les désordres structuraux conduisent à un élargissement inhomogène du spectre de gain, alors que le fractionnement de Stark de différents niveaux d'énergie est responsable d'un élargissement homogène. Mathématiquement, le gain doit être moyenné sur la distribution des fréquences de transition atomique ω_0 résultant en un gain effectif de la forme est donné par :

$$g_0(z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(z, \omega, \omega_0) f(\omega_0) d\omega_0 \quad (\text{II.1})$$

où $f(\omega)$ est la fonction de distribution dont la forme dépend également de la présence d'autres dopants dans le cœur de la fibre.

Le facteur par lequel un signal d'entrée faible est amplifié est obtenu en intégrant sur la longueur de l'amplificateur L . Si nous négligeons les pertes de fibre en raison des petites longueurs de fibre (~ 10 m) utilisées pour fabriquer des EDFA, le facteur d'amplification est donné par :

$$G(\omega) = \exp \left[\int_0^L g_0(z, \omega) dz \right] \quad (\text{II.2})$$

Bien que $G(\omega)$ soit aussi souvent appelé spectre de gain, il ne faut pas le confondre avec $g_0(z, \omega)$. Cela peut varier d'un amplificateur à l'autre car cela dépend également de la longueur de l'amplificateur. En pratique, la bande passante et la planéité de $G(\omega)$ sont importantes pour les systèmes WDM. Ce problème est abordé plus loin dans cette section [5].

II.4.2. Modèle à deux niveaux :

Le gain d'un EDFA dépend d'un grand nombre de paramètres de l'appareil tels que la concentration d'erbium-ion, la longueur de l'amplificateur, le rayon du noyau et la puissance de la pompe. Un modèle d'équation de débit à trois niveaux utilisé couramment pour les lasers peut être adapté pour les EDFA. Il est parfois nécessaire d'ajouter un quatrième niveau pour inclure l'absorption à l'état excité. En général, les équations résultantes doivent être résolues numériquement [5].

Un aperçu considérable peut être obtenu en utilisant un modèle simple à deux niveaux qui est valide lorsque l'ASE et l'absorption à l'état excité sont négligeables. Le modèle suppose que le niveau supérieur du système à trois niveaux reste presque vide en raison d'un transfert rapide de la population pompée à l'état excité. Il est cependant important de prendre en compte les différentes sections efficaces d'émission et d'absorption pour les champs de pompe et de signal. Les densités de population des deux états, N_1 et N_2 , satisfont aux deux équations de taux suivantes:

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = (\sigma_p^a N_1 - \sigma_p^e N_2) \varphi_p + (\sigma_s^a N_1 - \sigma_s^e N_2) \varphi_s - \frac{N_2}{T_1} \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = (\sigma_p^e N_2 - \sigma_p^a N_1) \varphi_p + (\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1) \varphi_s + \frac{N_2}{T_1} \quad (\text{II.4})$$

où σ_j^a et σ_j^e sont les sections efficaces d'absorption et d'émission à la fréquence ω_j avec $j = p, s$. De plus, T_1 est la durée de vie spontanée de l'état excité (environ 10 ms pour les EDFA). Les grandeurs ϕ_p et ϕ_s représentent le flux de photons pour les ondes de pompe et de signal, défini de telle sorte que $\phi_j = P_j / (a_j h \nu_j)$, où P_j est la puissance optique, σ_j est la section efficace de transition à la fréquence ν_j , et a_j est l'aire de la section transversale du mode fibre pour $j = p, s$ [5].

Les puissances de la pompe et du signal varient le long de la longueur de l'amplificateur en raison de l'absorption, de l'émission stimulée et de l'émission spontanée. Si la contribution de l'émission spontanée est négligée, P_s et P_p satisfont aux équations simples :

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = \tau_s(\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1)P_s - \alpha P_s \quad (\text{II.5})$$

$$s \frac{\partial P_p}{\partial z} = \tau_p(\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1)P_p - \alpha' P_p \quad (\text{II.6})$$

où α et α' prennent en compte les pertes de fibre aux longueurs d'onde du signal et de la pompe, respectivement. Ces pertes peuvent être négligées pour des longueurs d'amplificateur typiques de 10 à 20 m, mais elles doivent être incluses dans le cas d'une amplification distribuée. Les facteurs de confinement Γ_s et Γ_p rendent compte du fait que la région dopée à l'intérieur du cœur fournit le gain pour tout le mode fibre. Le paramètre $s = \pm 1$ en fonction du sens de propagation de la pompe; $s = -1$ dans le cas d'une pompe à propagation vers l'arrière.

Ces quatre équations peuvent être résolues analytiquement, malgré leur complexité, après quelques approximations justifiables. Pour les amplificateurs localisés, la longueur de la fibre est suffisamment courte pour que α et α' puissent être mis à zéro. En notant que $N_1 + N_2 = N_t$ où N_t est la densité ionique totale, une seule équation doit être résolue. En notant à nouveau que les termes d'absorption et d'émission stimulée dans les équations de champ et de population sont liés, l'état d'équilibre, obtenu en fixant la dérivée temporelle à zéro, peut s'écrire :

$$TN_{2(z)} = -\frac{T_1}{a_d h \nu_s} \frac{\partial P_s}{\partial z} - \frac{s T_1}{a_d h \nu_p} \frac{\partial P_p}{\partial z} \quad (\text{II.7})$$

où $a_d = \Gamma_s a_s = \Gamma_p a_p$ est la section transversale de la partie dopée du coeur de la fibre. En substituant cette solution aux deux dernières équations et en les intégrant sur la longueur de la fibre, les puissances P_s et P_p en sortie de fibre peuvent être obtenues sous forme analytique. Ce modèle a été étendu pour inclure la propagation ASE dans les deux sens avant et arrière.

Bien que l'approche précédente soit essentielle lorsque la puissance totale du signal à l'intérieur de l'amplificateur est suffisamment grande pour provoquer une saturation du gain, un traitement beaucoup plus simple est applicable dans le régime dit petit signal dans lequel l'EDFA reste saturé. Dans ce cas, le terme ϕ_s peut être négligé et le coefficient de gain, $g(z) = (\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1)$, ne dépend pas de la puissance du signal P_s . Le gain total de l'amplificateur G pour un EDFA de longueur L est alors donné par :

$$N_2(z) = -\frac{T_1}{a_d h \nu_s} \frac{\partial P_s}{\partial z} - \frac{s T_1}{a_d h \nu_p} \frac{\partial P_p}{\partial z} \quad (\text{II.8})$$

La Figure II. suivante montre le gain du petit signal à $1,55 \mu\text{m}$ en fonction de la puissance de la pompe et de la longueur de l'amplificateur en utilisant des valeurs de paramètres typiques.

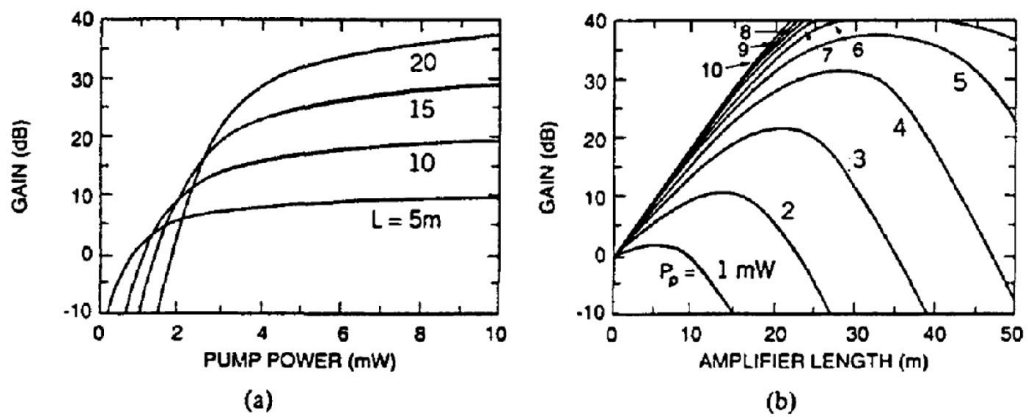


Figure II. 7 : petit gain de signal en fonction de (a) la puissance de la pompe et (b) la longueur de l'amplificateur pour un EDFA supposé pompé à $1,48 \mu\text{m}$

Pour une longueur d'amplificateur L donnée, le gain de l'amplificateur augmente initialement de façon exponentielle avec la puissance de la pompe, mais l'augmentation devient beaucoup plus faible lorsque la puissance de la pompe dépasse une certaine valeur [correspondant au «genou» de la Figure II. (a)]. Pour une puissance de pompe donnée, le gain de l'amplificateur devient maximum à une valeur optimale de L et chute fortement lorsque L

dépasse cette valeur optimale. La raison en est que la dernière partie de l'amplificateur reste non pompée et absorbe le signal amplifié. Comme la valeur optimale de L dépend de la puissance de la pompe P_p , il est nécessaire de choisir à la fois L et P_p de manière appropriée. La Figure II. (b) ci-dessus montre qu'un gain de 35 dB peut être réalisé à une puissance de pompe de 5 mW pour un pompage $L = 30$ m et $1,48 \mu\text{m}$. Il est possible de concevoir des amplificateurs de manière à obtenir un gain élevé pour des longueurs d'amplificateur aussi courtes que quelques mètres. Les caractéristiques qualitatives illustrées dans la Figure II. ci-dessus sont observées dans tous les EDFA; l'accord entre la théorie et l'expérience est généralement assez bon.

L'analyse qui précède suppose que les ondes de pompage et de signal se présentent sous la forme de faisceaux CW. En pratique, les EDFA sont pompés à l'aide de lasers à semi-conducteurs CW, mais le signal est sous la forme d'un train d'impulsions (contenant une séquence aléatoire de 1 et 0 bits), et la durée des impulsions individuelles est inversement proportionnelle au débit binaire. La question est de savoir si toutes les impulsions connaissent le même gain ou non. Il s'avère que le gain reste constant avec le temps dans un EDFA, même pour des impulsions de l'ordre de la microseconde. La raison est liée à une valeur relativement grande du temps de fluorescence associé aux ions erbium excités ($T_1 \sim 10$ ms). Lorsque l'échelle de temps des variations de puissance du signal est beaucoup plus courte que T_1 , les ions erbium sont incapables de suivre des variations aussi rapides. Comme les énergies à impulsion unique sont généralement bien inférieures à l'énergie de saturation ($\sim 10 \mu\text{J}$), les EDFA répondent à la puissance moyenne. En conséquence, la saturation du gain est régie par la puissance moyenne du signal et le gain de l'amplificateur ne varie pas d'une impulsion à l'autre pour un signal WDM. C'est une fonctionnalité extrêmement utile des EDFA.

Dans certaines applications telles que les réseaux à commutation de paquets, la puissance du signal peut varier sur une échelle de temps comparable à T_1 . Le gain de l'amplificateur dans ce cas est susceptible de devenir dépendant du temps, une caractéristique indésirable du point de vue des performances du système. Un mécanisme de contrôle de gain qui maintient le gain de l'amplificateur fixé à une valeur constante consiste à faire osciller l'EDFA à une longueur d'onde contrôlée en dehors de la plage d'intérêt (généralement inférieure à $1,5 \mu\text{m}$). Etant donné que le gain reste bloqué à la valeur de seuil pour un laser, le signal est amplifié du même facteur malgré les variations de la puissance du signal. Dans une mise en œuvre de ce schéma, un EDFA a été forcé d'osciller à $1,48 \mu\text{m}$ en fabriquant deux

réseaux de Bragg à fibres agissant comme des miroirs à haute réflectivité aux deux extrémités de l'amplificateur [5].

II.4.3. Bruit de l'amplificateur :

Le bruit de l'amplificateur est le facteur limitant ultime pour les applications système. Tous les amplificateurs dégradent le rapport signal sur bruit (SNR) du signal amplifié en raison de l'émission spontanée qui ajoute du bruit au signal lors de son amplification. En raison de cette émission spontanée amplifiée (ASE), le SNR est dégradé, et l'étendue de la dégradation est quantifiée par un paramètre F_n , appelé le facteur de bruit de l'amplificateur. Par analogie avec les amplificateurs électroniques, il est défini comme :

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad (II.9)$$

où SNR se réfère à la puissance électrique générée lorsque le signal optique est converti en un courant électrique. En général, F_n dépend de plusieurs paramètres du détecteur qui régissent le bruit thermique associé au détecteur. Une expression simple pour F_n peut être obtenue en considérant un détecteur idéal dont les performances sont limitées par le bruit de tir uniquement.

Considérons un amplificateur avec le gain G tel que les puissances de sortie et d'entrée soient liées par $P_{out} = GP_{in}$. Le SNR du signal d'entrée est donné par :

$$\langle SNR \rangle_{in} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_s^2} = \frac{(R_d P_{in})^2}{2q(R_d P_{in})\Delta f} = \frac{P_{in}}{2h\nu\Delta f} \quad (II.10)$$

où $\langle I \rangle = R_d P_{in}$ est le photo-courant moyen, $R_d = q / h\nu$ est la réactivité d'un photo-détecteur idéal à efficacité quantique unitaire, et :

$$\sigma_s^2 = 2q(R_d P_{in})\Delta f \quad (II.11)$$

pour le bruit de tir en réglant le courant d'obscurité $I_d = 0$. Ici Δf est la largeur de bande du détecteur. Pour évaluer le SNR du signal amplifié, il faut ajouter la contribution de l'ASE au bruit du récepteur.

La densité spectrale de l'ASE est presque constante (bruit blanc) et peut s'écrire :

$$S_{ASE}(\nu) = n_{sp} h\nu_0 (G - 1) \quad (II.12)$$

où ν_0 est la fréquence porteuse du signal amplifié. Le paramètre n_{sp} est appelé facteur d'émission spontanée (ou facteur d'inversion de population) et est donné par :

$$N_{sp} = \frac{\sigma_e N_2}{(\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1)} \quad (\text{II.13})$$

où N_1 et N_2 sont les populations atomiques pour les états fondamental et excité, respectivement. L'émission spontanée a pour effet d'ajouter des fluctuations au signal amplifié; ceux-ci sont convertis en fluctuations de courant pendant le processus de photo-détection.

Il s'avère que la contribution dominante au bruit du récepteur provient du battement de l'émission spontanée avec le signal. Le rayonnement émis spontanément se mélange au signal amplifié et produit le courant :

$$I = R_d |\sqrt{G} E_{in} + E_{sp}|^2 \quad (\text{II.14})$$

au photo-détecteur de sensibilité R . Notant que E_{in} et E_{sp} oscillent à des fréquences différentes avec une différence de phase aléatoire, il est facile de voir que le battement de l'émission spontanée avec le signal produira un courant de bruit :

$$\Delta I = 2R_d (GP_{in})^{1/2} |E_{sp}| \cos \theta \quad (\text{II.15})$$

où θ est une phase aléatoire variant rapidement. En faisant la moyenne sur la phase, la variance du photo-courant peut s'écrire :

$$\sigma^2 = 2q(R_d GP_{in})\Delta f + 4(R_d GP_{in})(R_d S_{ASE})\Delta f \quad (\text{II.16})$$

où $\cos^2 \theta$ a été remplacé par sa valeur moyenne $1/2$. Le SNR du signal amplifié est donc donné par :

$$(SNR)_{out} = \frac{(R_d GP_{in})^2}{\sigma^2} \approx \frac{GP_{in}}{(4S_{ASE} + 2h\nu)\Delta f} \quad (\text{II.17})$$

Le facteur de bruit de l'amplificateur est obtenu en remplaçant les expressions $(SNR)_{in}$ et $(SNR)_{out}$ dans la définition F_n et est donné par :

$$F_n = 2n_{ps} \left(1 - \frac{1}{G}\right) + \frac{1}{G} \approx 2n_{sp} \quad (\text{II.18})$$

où la dernière approximation est valable pour $G \gg 1$. Cette équation montre que le SNR du signal amplifié est dégradé de 3 dB même pour un amplificateur idéal pour lequel $n_{sp} = 1$.

Pour la plupart des amplificateurs pratiques, F_n dépasse 3 dB et peut être aussi grand que 6-8 dB.

L'analyse précédente supposait que n_{sp} était constant sur la longueur de l'amplificateur. Dans le cas d'un EDFA, N_1 et N_2 varient avec z . Le facteur d'émission spontanée peut toujours être calculé pour un EDFA en utilisant le modèle à deux niveaux discuté précédemment, mais le facteur de bruit dépend à la fois de la longueur de l'amplificateur et de la puissance de pompe P_p , tout comme le gain de l'amplificateur. La Figure II. (a) ci-dessous montre la variation de F_n avec la longueur de l'amplificateur pour plusieurs valeurs de P_p / P_p^{sat} lorsqu'un signal de $1,53 \mu m$ est amplifié avec une puissance d'entrée de 1 mW. Le gain de l'amplificateur dans les mêmes conditions est également représenté sur la Figure II. (b). Les résultats montrent qu'un facteur de bruit proche de 3 dB peut être obtenu pour un amplificateur à gain élevé.

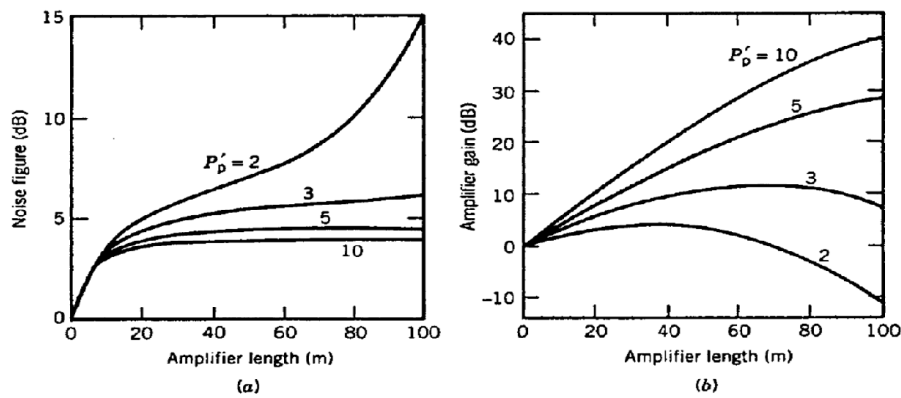


Figure II. 8: (a) facteur de bruit et (b) gain de l'amplificateur en fonction de la longueur pour plusieurs niveaux de pompe.

Les résultats expérimentaux confirment que F_n proche de 3 dB est possible dans les EDFA. Un facteur de bruit de 3,2 dB a été mesuré dans un EDFA de 30 m de long pompé à $0,98 \mu m$ avec 11 mW de puissance. Une valeur similaire a été trouvée pour un autre EDFA pompé avec seulement 5,8 mW de puissance de pompe à $0,98 \mu m$. En général, il est difficile d'obtenir simultanément un gain élevé, un faible bruit et une efficacité de pompage élevée. La principale limitation est imposée par le déplacement de l'ASE vers l'arrière vers la pompe et l'épuisement de la puissance de la pompe. L'incorporation d'un isolateur interne atténue ce problème dans une large mesure. Dans une mise en œuvre, un gain de 51 dB a été réalisé avec un facteur de bruit de 3,1 dB à une puissance de pompe de seulement 48 mW.

Les valeurs mesurées de F_n sont généralement plus importantes pour les EDFA pompés à $1,48 \mu\text{m}$. Un facteur de bruit de 4,1 dB a été obtenu pour un EDFA de 60 m de long lorsqu'il est pompé à $1,48 \mu\text{m}$ avec 24 mW de puissance de pompe. La raison d'un chiffre de bruit plus élevé pour les EDFA pompés de $1,48 \mu\text{m}$ peut être comprise à partir de la Figure II. ci-dessous, qui montre que le niveau de la pompe et le niveau excité se situent dans la même bande pour un pompage de $1,48 \mu\text{m}$. Il est difficile d'obtenir une inversion complète de la population ($N_1 \approx 0$) dans de telles conditions. Il est néanmoins possible de réaliser $F_n < 3,5$ dB pour des longueurs d'onde de pompage proches de $1,46 \mu\text{m}$.

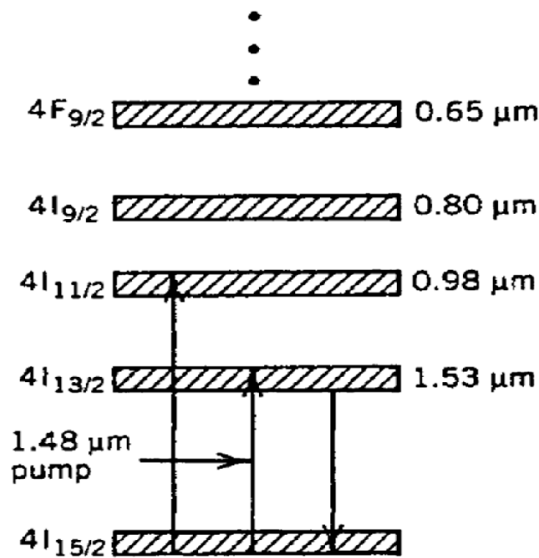


Figure II. 9: diagramme du niveau d'énergie des ions erbium dans les fibres de silice

Les niveaux de bruit relativement faibles des EDFA en font un choix idéal pour les systèmes à ondes lumineuses WDM. Malgré un faible bruit, les performances des systèmes de communication à fibre optique longue distance utilisant des EDFA sont souvent limitées par le bruit de l'amplificateur. Le problème de bruit est particulièrement grave lorsque le système fonctionne dans la région de dispersion anormale de la fibre car un phénomène non linéaire appelé instabilité de modulation augmente le bruit de l'amplificateur et dégrade le spectre du signal. Le bruit de l'amplificateur introduit également une gigue de synchronisation. Ces problèmes sont abordés plus loin dans ce didacticiel.

II.4.4. Amplification multi-canal :

La bande passante des EDFA est suffisamment grande pour qu'ils se soient avérés être l'amplificateur optique de choix pour les applications WDM. Le gain fourni par eux est presque insensible à la polarisation. De plus, la diaphonie entre les canaux ne se produit pas

dans les EDFA en raison d'une valeur relativement élevée de τ_1 (environ 10 ms) par rapport aux durées de bits typiques (0,1 ns à un débit binaire de 10 Gb / s) dans les systèmes à ondes lumineuses. La lenteur de la réponse des EDFA garantit que leur gain ne peut pas être modulé à des fréquences bien supérieures à 10 kHz.

Une deuxième source de diaphonie entre les canaux est la saturation du gain croisé qui se produit parce que le gain d'un canal spécifique est saturé non seulement par sa propre puissance (auto-saturation) mais également par la puissance des canaux voisins. Ce mécanisme de diaphonie est commun à tous les amplificateurs optiques, y compris les EDFA. Cela peut être évité en faisant fonctionner l'amplificateur en régime non saturé. Les résultats expérimentaux appuient cette conclusion. Dans une expérience de 1989, une pénalité de puissance négligeable a été observée lorsqu'un EDFA a été utilisé pour amplifier deux canaux fonctionnant à 2 Gb / s et séparés de 2 nm tant que les puissances des canaux étaient suffisamment faibles pour éviter la saturation du gain.

La principale limitation pratique d'un EDFA provient de la non-uniformité spectrale du gain de l'amplificateur. Même si le spectre de gain d'un EDFA est relativement large, le gain est loin d'être uniforme (ou plat) sur une large gamme de longueurs d'onde. En conséquence, différents canaux d'un signal WDM sont amplifiés de différentes quantités. Ce problème devient assez grave dans les systèmes long-courriers utilisant une chaîne en cascade d'EDFA. La raison en est que de petites variations du gain de l'amplificateur pour les canaux individuels croissent de manière exponentielle sur une chaîne d'amplificateurs en ligne. Même une différence de gain de 0,2 dB augmente jusqu'à 20 dB sur une chaîne de 100 amplificateurs en ligne, ce qui fait varier les puissances des canaux jusqu'à un facteur 100, une plage de variation inacceptable en pratique. Pour amplifier tous les canaux à peu près de la même quantité .

La largeur de bande entière d'environ 40 nm peut être utilisée si le spectre de gain est aplati en introduisant des pertes sélectives en longueur d'onde. L'idée de base de l'aplatissement du gain est assez simple. Si un filtre optique dont les pertes de transmission imitent le profil de gain (élevé dans la région à gain élevé et faible dans la région à faible gain) est inséré après la fibre dopée, la puissance de sortie deviendra presque constante pour tous les canaux. Bien que la fabrication d'un tel filtre ne soit pas simple, plusieurs techniques d'aplatissement de gain ont été développées. Entre autres, des filtres d'interférence à couche mince, des filtres Mach-Zehnder, des filtres acousto-optiques et des réseaux de fibres à longue période ont été utilisés pour aplatir le profil de gain et égaliser les gains de canal.

Les techniques d'aplatissement du gain peuvent être divisées en catégories actives et passives. Les méthodes basées sur les filtres sont passives en ce sens que les gains des canaux ne peuvent pas être ajustés de manière dynamique. L'emplacement du filtre optique lui-même nécessite une réflexion en raison des pertes élevées qui lui sont associées. Le placer avant l'amplificateur augmente le bruit, tandis que le placer après l'amplificateur réduit la puissance de sortie. Une configuration en deux étapes illustrée dans la Figure II. ci-dessous est souvent utilisée. Le deuxième étage agit comme un amplificateur de puissance mais le facteur de bruit est principalement déterminé par le premier étage dont le bruit est relativement faible en raison de son faible gain.

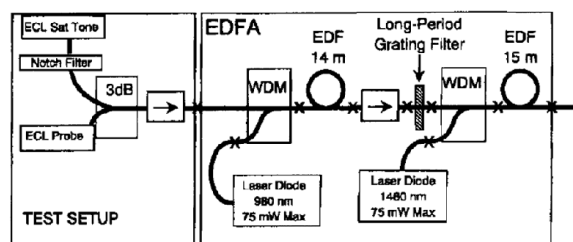


Figure II. 10 : Schéma d'un EDFA conçu pour fournir un gain uniforme sur la bande passante de 1530-1570 nm à l'aide d'un filtre optique contenant plusieurs réseaux de fibres à longue période. La conception en deux étapes permet de réduire le niveau de bruit

Idéalement, un amplificateur optique devrait fournir le même gain pour tous les canaux dans toutes les conditions de fonctionnement possibles. Ce n'est pas le cas en général. Par exemple, si le nombre de canaux transmis change, le gain de chaque canal changera car il dépend de la puissance totale du signal (en raison de la saturation du gain). Un contrôle actif des gains de canal est donc souhaitable pour les applications WDM. De nombreuses techniques ont été développées à cet effet. La technique la plus couramment utilisée stabilise dynamiquement le gain en incorporant dans l'amplificateur un laser qui fonctionne en dehors de la bande passante utilisée. De tels dispositifs sont appelés EDFA à gain limité (car leur gain est limité par un laser intégré) et ont été largement étudiés.

Des systèmes d'ondes lumineuses WDM capables de transmettre plus de 80 canaux sont apparus en 1998. De tels systèmes utilisent les bandes C et L simultanément et nécessitent un gain d'amplification uniforme sur une bande passante supérieure à 60 nm. De plus, l'utilisation de la bande L nécessite des amplificateurs optiques capables de fournir un gain dans la gamme de longueurs d'onde 1570-1610 nm. Il s'avère que les EDFA peuvent fournir un gain sur cette gamme de longueurs d'onde, avec une conception appropriée. Un EDFA en bande L

nécessite de grandes longueurs de fibre (> 100 m) pour maintenir le niveau d'inversion relativement bas. La Figure II. ci-dessous montre un amplificateur en bande L avec une conception à deux étages.

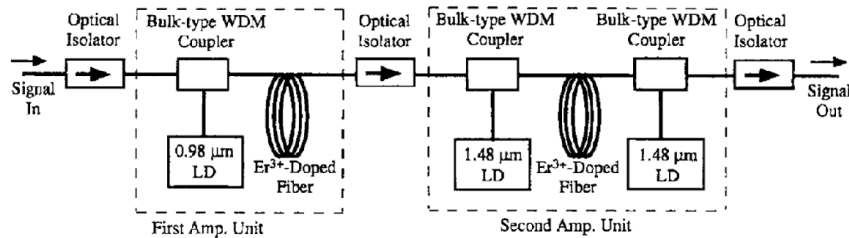


Figure II. 11: Schéma d'un EDFA en bande L fournissant un gain uniforme sur la bande passante de 1570 - 1610 nm avec une conception à deux étages

Le premier étage est pompé à 980 nm et agit comme un EDFA traditionnel (longueur de fibre 20-30 m) capable de fournir un gain de l'ordre de 1530-1570 nm. En revanche, le deuxième étage a une fibre dopée de 200 m de long et est pompé de manière bidirectionnelle à l'aide de lasers à 1480 nm. Un isolateur optique entre les deux étages fait passer l'ASE du premier étage au deuxième étage (nécessaire pour pomper le deuxième étage) mais empêche l'ASE à propagation vers l'arrière d'entrer dans le premier étage. De tels amplificateurs à deux étages en cascade peuvent fournir un gain plat sur une large bande passante tout en maintenant un niveau de bruit relativement faible. Dès 1996, un gain plat à 0,5 dB près a été réalisé sur la gamme de longueurs d'onde de 1544 à 1561 nm. Le deuxième EDFA a été codopé avec de l'ytterbium et du phosphore et a été optimisé de telle sorte qu'il a agi comme un amplificateur de puissance. Depuis, Des EDFA offrant un gain plat sur l'ensemble des bandes C et L ont été réalisés. L'amplification Raman peut également être utilisée pour la bande L. En combinant l'amplification Raman avec un ou deux EDFA, un gain uniforme peut être réalisé sur une bande passante de 75 nm couvrant les bandes C et L.

Une configuration parallèle a également été développée pour les EDFA capables d'amplifier simultanément sur les bandes C et L. Dans cette approche, le signal WDM entrant est divisé en deux branches, qui amplifient les signaux en bande C et en bande L séparément en utilisant un EDFA optimisé dans chaque branche. La conception à deux bras a produit un gain relativement uniforme de 24 dB sur une bande passante aussi grande que 80 nm lorsqu'elle est pompée avec des lasers à semi-conducteurs de 980 nm tout en maintenant un facteur de bruit d'environ 6 dB. Les amplificateurs à deux bras ou à deux étages sont des dispositifs complexes et contiennent plusieurs composants, tels que des filtres optiques et des

isolateurs, pour optimiser les performances de l'amplificateur. Une approche alternative aux EDFA à large bande utilise un fluorure-fibre à la place de la fibre de silice comme milieu hôte dans lequel les ions erbium sont dopés. Le gain de planéité sur une bande passante de 76 nm a été réalisé en dopant une fibre de tellurite avec des ions erbium. Bien que ces EDFA soient de conception plus simple par rapport aux amplificateurs à plusieurs étages, ils souffrent des difficultés d'épissage en raison de l'utilisation de verres sans silice.

Les systèmes d'ondes lumineuses à haute capacité ainsi que les systèmes WDM grossiers (espacement des canaux > 5 nm) sont susceptibles de faire en sorte que la région des longueurs d'onde courtes - la bande dite S, s'étendant de 1470 à 1520 nm - en plus du C et Bandes L. Les amplificateurs à fibre dopée au thulium ont été initialement développés à cet effet, et ils sont capables de fournir un gain plat dans la gamme de longueurs d'onde 1480-1510 nm lorsqu'ils sont pompés à l'aide de lasers à semi-conducteurs 1420 nm et 1560 nm. Plus récemment, l'attention s'est concentrée sur les EDFA qui peuvent fournir un gain simultanément dans les trois bandes avec une conception appropriée. Des amplificateurs optiques à semi-conducteurs sont également envisagés pour les systèmes WDM grossiers. Cependant, des amplificateurs Raman à base de fibres sont également susceptibles d'être déployés car ils peuvent fournir des amplifications dans n'importe quelle région spectrale avec un choix approprié de lasers à pompe [5] .

II.5. Conclusion:

Un amplificateur à pour mission de compenser l'effet de pertes dans les fibres optiques. Dans ce chapitre nous avons mené une analyse sur les différents types d'amplificateurs. Dans Les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium, un processus d'émission stimulée est réalisée afin d'assurer le transfert d'énergie vers les signaux utiles à faible puissance. Un modèle mathématique basé sur les équations de propagation couplées et l'équation régissant la densité de population est présenté. Le but de chapitre prochain est de valider ce modèle et de présenter les différents résultats de simulations ainsi que l'impact différents paramètres initiaux tels que la puissance et la longueur d'onde de pompe.



Chapitre III:

Résultats de simulations

III.1. Introduction:

Dans ce que suit, on va présenter dans " INTERCONNECT, le simulateur de circuits intégrés photoniques de Lumerical " les résultats de la simulation d'un processus d'amplification d'un signal optique en utilisant un EDFA. On s'intéresse à une configuration à deux pompes autour de 980 nm et 1480 nm et dont l'amplification est réalisée autour de 1550 nm, ce qui correspond à la troisième fenêtre de télécommunications optiques. En plus, une série de simulations et fait dans le but d'optimiser les différents paramètres du système.

III.2. Amplificateur à fibre dopée Erbium :

Les guides d'ondes optiques dopés avec certains éléments de terres rares sont fréquemment utilisés comme milieu de gain d'un laser ou d'un amplificateur optique [1, 2]. Par exemple, les dispositifs à fibre dopée à l'erbium ont connu un succès extraordinaire en raison de leur faible bruit, de leur gain optique élevé et large, et continueraient à dominer dans le cadre des réseaux de télécommunications longue distance dites "backbone" [2].

Une configuration typique d'une simple pompe bidirectionnelle EDFA est illustrée ci-dessous :

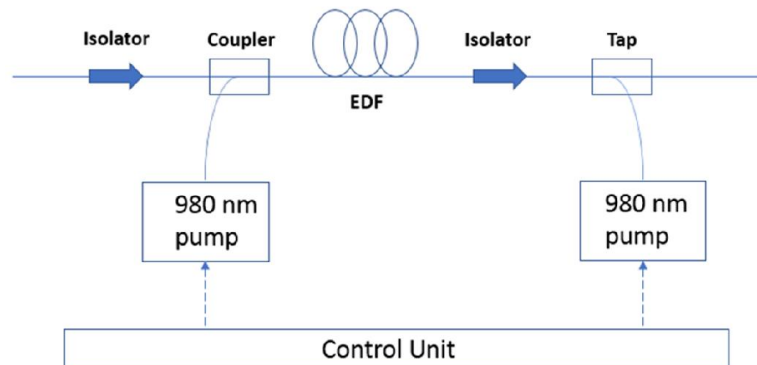


Figure III.1 : Configuration double pompe d'un système d'amplification optique

Le diagramme énergétique du système dopé Er^{3+} est présenté dans la figure suivante. Le pompage s'effectue entre le niveau bas $^4I_{15/2}$ et le niveau excité $^4I_{13/2}$ (pompe 1480) ou $^4I_{11/2}$ (pompe 980) avec des populations fractionnaires respectives n_1 , n_2 et n_3 .

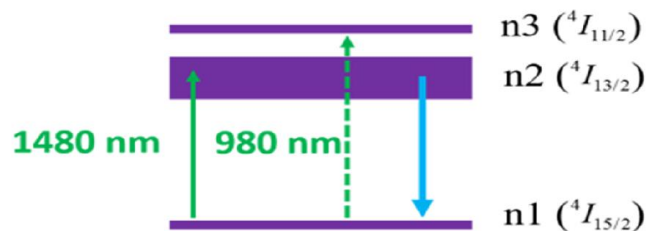
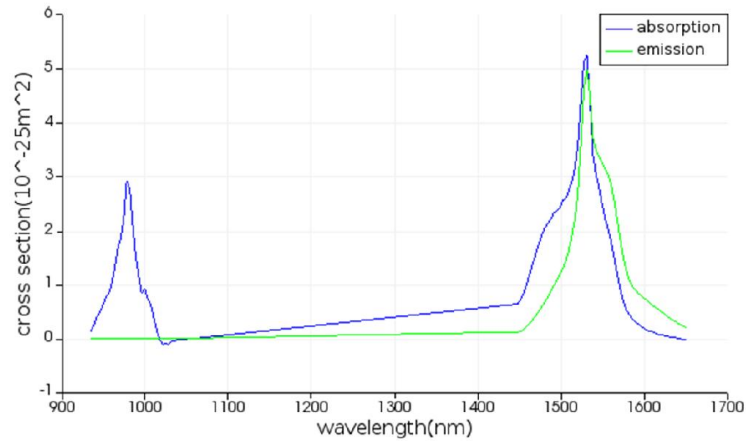


Figure III.2 : Niveaux énergétiques de molécules Er 3+

Deux paramètres critiques dans la résolution numérique des équations de taux et de propagation couplées sont les sections efficaces d'absorption et d'émission. Les informations de section transversale Er peuvent être chargées à partir d'un fichier de données. La figure ci-dessous montre la section efficace d'absorption et d'émission par défaut dans le modèle.

**Figure III.3 : Spectres d'émission et d'absorption de l'Erbium**

➤ **Remarque :**

- Nous avons remarqué que l'absorption était enregistrée à la longueur d'onde de 980 nm, et une valeur plus élevée à la longueur d'onde de 1530 nm.
- Alors que l'émission a été enregistrée à la longueur d'onde de 1530 nm seulement.

III.3. Simulation de système:

Dans cette section, nous montrons le cas de l'exemple que nous avons utilisé pour reproduire les résultats de la référence [1]. Les résultats que nous avons reproduits sont en bon accord avec ceux de l'ouvrage de référence.

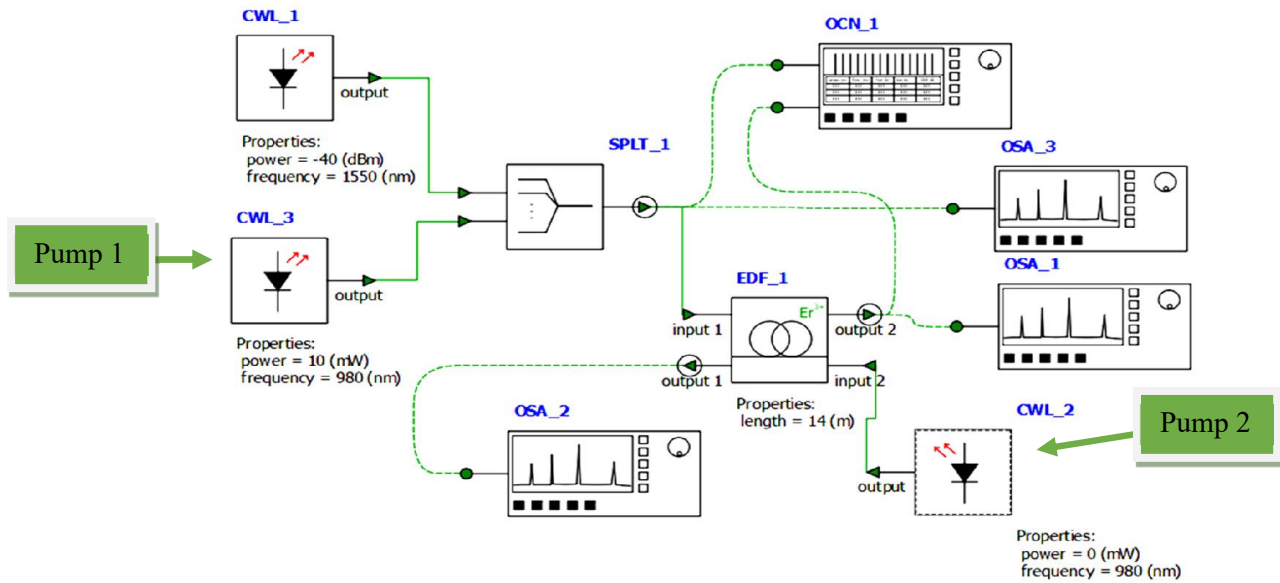


Figure III.4 : Schéma du système à simuler

où "CWL_1" est le signal à amplifier, "Pump 1" est la pompe de co-propagation et "Pump 2" est la pompe de contre-propagation. Les propriétés clés sont données dans le tableau suivant :

Propriété	Valeur	Propriété	Valeur
Configuration	unidirectional	Rayon du cœur de la fibre	1.4 μm
Longueur	14 mètres	Ouverture numérique de la fibre	0.28
Er densité	$7 \times 10^{24} \text{ m}^3$	Fréquence centrale du bruit	1540 nm
Temps de vie de Er	10.2 millisecondes	Bande passante de bruit	40 nm
Er Rayon Du coeur	1.05 μm	Tolérance de convergence	0.001

Tableau III. 1 : Paramètres de simulation

III.3.1. Gain de signal dans une fibre "typique"

Pour calculer le gain EDFA ainsi que les profils spectraux de bruit d'émission spontanée amplifiée (Amplified Spontaneous Emission: ASE), nous allons d'abord considérer une longueur de fibre spécifique de 14 m et étudier en profondeur la mécanique du processus de gain pour cette longueur. Le signal et la pompe sont supposés se propager et injectés à $z = 0$. Les gains aux deux longueurs d'onde de signal de 1530 nm et 1550 nm sont calculés en fonction de la puissance de pompe. La puissance de signal injectée a été considérée comme une petite valeur de signal, -40 dBm. Les deux longueurs d'onde de pompe considérées étaient 980 nm et 1480 nm.

La fig.5 montre le gain (a) et la population à l'état supérieur (b) en fonction de la puissance de pompe pour une longueur de 14 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium (fibre A) pompée à 980 nm et 1480 nm.

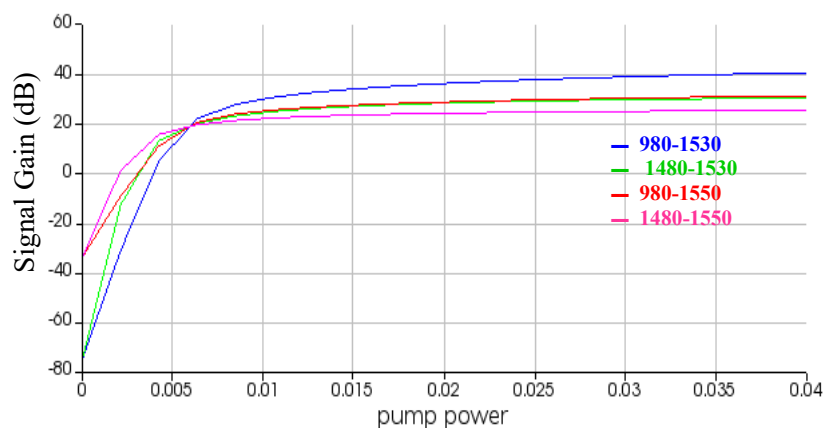


Figure III.5 (a): Le gain en fonction de la puissance de pompe pour une longueur de 14 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium (fibre A) pompée à 980 nm et 1480 nm

➤ **Remarque :**

- Nous remarquons que le signal de gain augmente de manière significative à mesure que la puissance de la pompe augmente dans la plage de 0 à 6 mW.
- Cette augmentation diminue avec l'augmentation de la puissance de pompe, à fixer à une valeur maximale à la puissance de pompe de 0,025 watt.

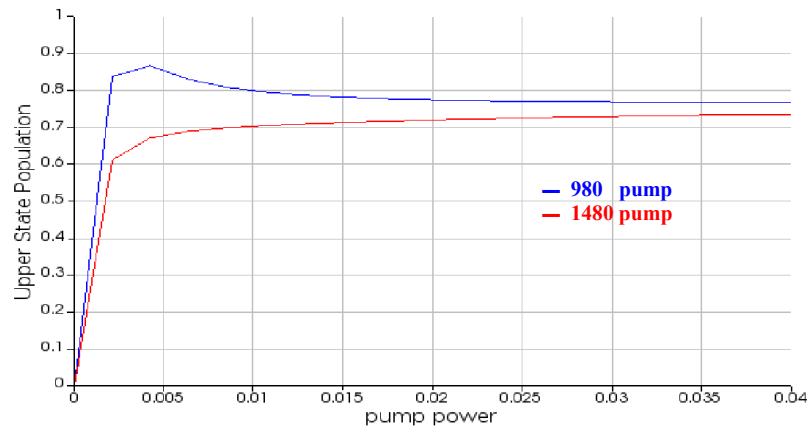


Figure III.5 (b): la population à l'état supérieur en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 14 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium (fibre A) pompée à 980 nm et 1480 nm

➤ **Remarque :**

- On note que la population de l'état supérieur augmente avec l'augmentation de la puissance de pompage et s'établit lorsque la puissance de pompage atteint 25 milliwatts dans les deux cas.
- Nous notons que la population de l'état supérieur avait la valeur la plus élevée à la longueur d'onde de 980 nm.

Nous portons ensuite notre attention sur la distribution d'autres paramètres et cela nous permettra d'explorer plus avant l'interaction subtile entre la pompe, le signal, l'ASE avant et arrière, et l'inversion de population dans la fibre.

La fig.6 montre la population dans l'état supérieur en fonction de la position le long d'une longueur de 14 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium, pompée à 980 nm dans un cas (a) et 1480 nm dans l'autre (b), pour les puissances de pompage indiquées sur les graphiques.

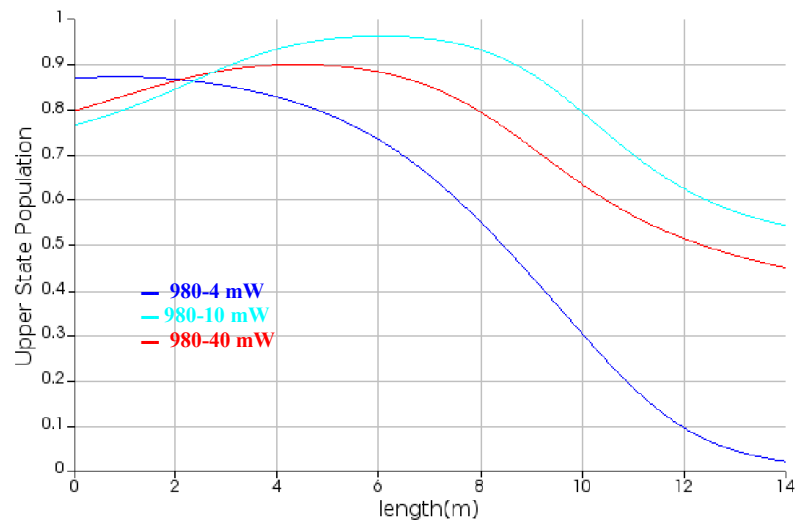


Figure III.6 (a): La population dans l'état supérieur en fonction de la position le long d'une longueur de 14 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium, pompée à 980 nm

➤ **Remarque :**

- Dans le cas de 980 nm - 4 milliwatts, nous avons observé une diminution de la population de l'état supérieur à mesure que la distance augmentait.
- Dans les cas 10 et 40 milliwatts, nous avons remarqué que la population de l'état supérieur augmentait avec l'augmentation de la distance puis commençait à diminuer lorsqu'elle atteignait la longueur de 6 mètres.
- Dans le cas de 980 nm - 10 milliwatts, nous avons enregistré la valeur la plus élevée de la population de l'état supérieur, où elle dépassait 95 %.

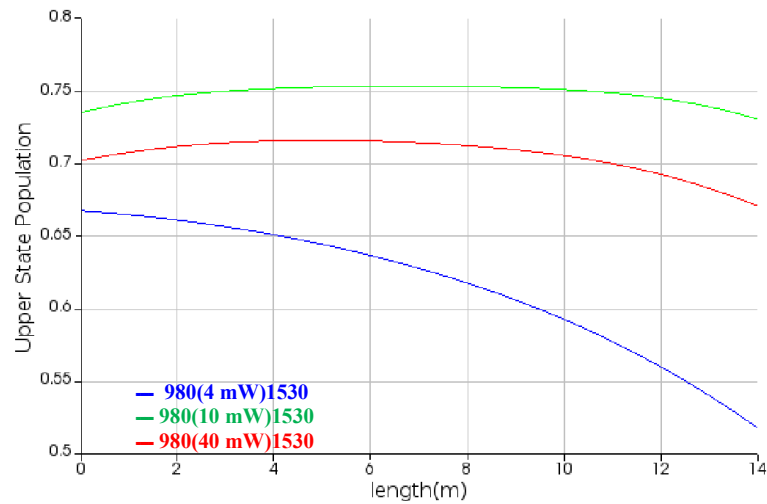


Figure III.6 (b): La population dans l'état supérieur à 1530 nm en fonction de la position le long d'une longueur de 14 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium, pompée à 980 nm

➤ **Remarque :**

- Dans le cas de 1480 nm - 4 mW, nous avons observé une diminution de la population de l'état supérieur à mesure que la distance augmentait.
- Dans le cas de 1480 nm (10 et 40 mW) nous avons observé une légère augmentation avec l'augmentation de la distance, puis elle diminuait en atteignant 8 m.
- Dans le cas de 1480 nm -10 milliwatts, nous avons enregistré la valeur la plus élevée pour la population de l'état supérieur, où elle ne dépassait pas 80 %.

La fig.7 montre le gain de signal à 1530 nm (a) et 1550 nm (b) en fonction de la position le long de la fibre pour une longueur de 14 m de fibre dopée à l'erbium, pour des puissances de pompe injectées à $z = 0$ de 4, 10, et 40 mW à 980 nm et une puissance de signal injectée de -40 dBm.

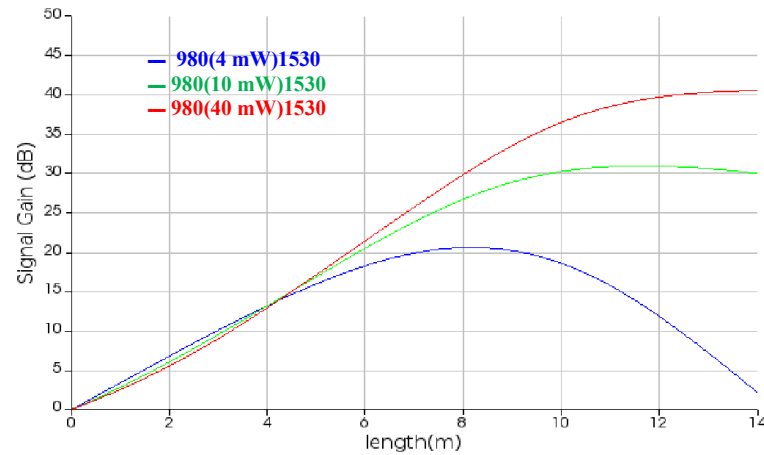


Figure III.7 (a): Le gain de signal à 1550 nm en fonction de la position le long de la fibre, pour des puissances de pompe injectées à $z = 0$ à 980 nm

➤ **Remarque :**

- Dans le cas de (980 nm - 4 milliwatts - 1530), nous avons remarqué que le signal de gain augmentait avec la distance croissante, jusqu'à ce qu'il atteigne 8 mètres, il commençait à diminuer fortement.
- Dans le cas de 10 et 40 milliwatts, nous avons remarqué une augmentation de la valeur du gain au fur et à mesure que la distance augmentait, jusqu'à ce qu'elle soit fixée à 10 mètres.
- Nous avons remarqué que la valeur la plus élevée du gain était dans le cas de 40 milliwatts, qui s'élevait à 40 dB.

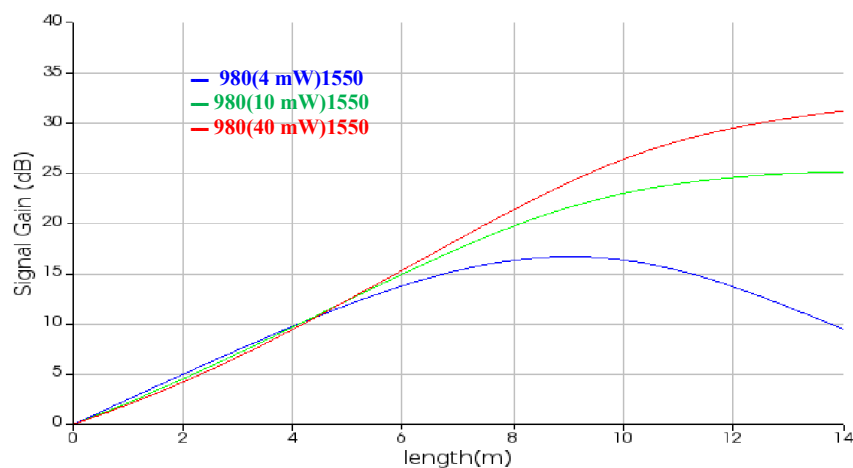


Figure III.7 (b): Le gain de signal à 1550 nm en fonction de la position le long de la fibre, pour des puissances de pompe injectées à $z = 0$ à 980 nm

➤ **Remarque :**

- Dans le cas de (980 nm - 4 milliwatts - 1550), nous avons remarqué que le signal de gain augmentait avec la distance croissante, jusqu'à ce qu'il atteigne 8 mètres, il commençait à diminuer légèrement.
- Dans le cas de 10 et 40 milliwatts, nous avons remarqué une augmentation de la valeur de gain à mesure que la distance augmentait.
- Nous avons remarqué que la valeur la plus élevée du gain était dans le cas de 40 milliwatts, ce qui équivalait à 32 décibels.

La Fig.8 montre l'ASE à déplacement en amont et en aval dans une fibre dopée à l'erbium de 14 m de long et pompée à 980 nm, pour les deux puissances de pompage 10 mW et 40 mW.

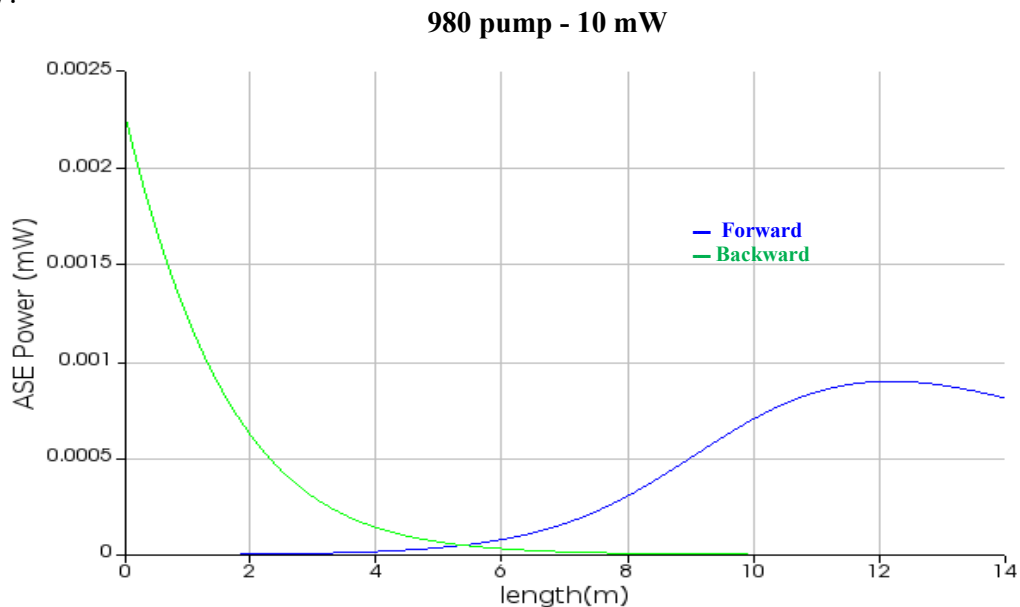


Figure III.8 (a): l'ASE à déplacement en amont et en aval dans une fibre dopée à l'erbium de 14 m de long et pompée à 980 nm pour une puissances de pompage 10 Mw

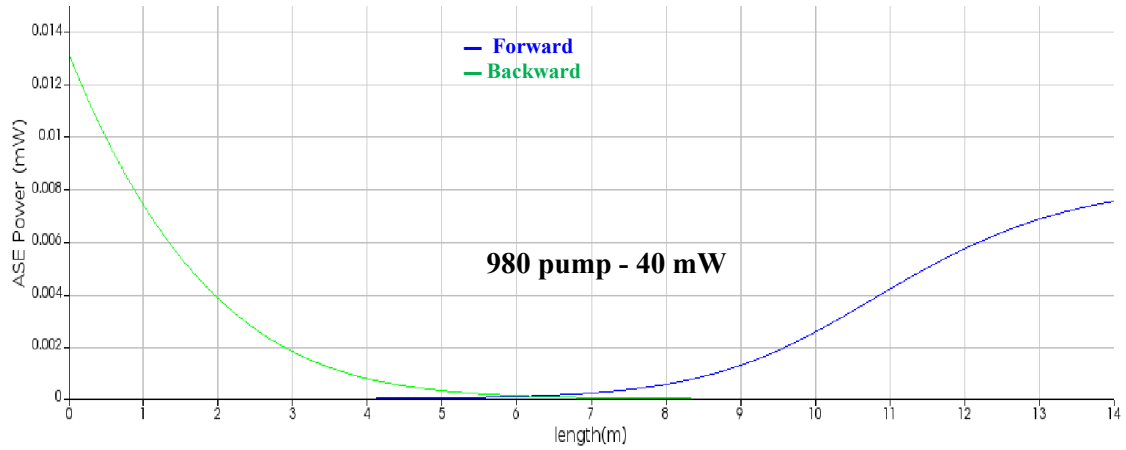


Figure III.8 (b): l'ASE à déplacement en amont et en aval dans une fibre dopée à l'erbium de 14 m de long et pompée à 980 nm pour une de pompage 40 mW.

➤ **Remarque :**

- Dans le cas de (980 nm - 4 milliwatts - 1550), nous avons remarqué que le signal de gain augmentait avec la distance croissante, jusqu'à ce qu'il atteigne 8 mètres, il commençait à diminuer légèrement.
- Dans le cas de 10 et 40 milliwatts, nous avons remarqué une augmentation de la valeur de gain à mesure que la distance augmentait.
- Nous avons remarqué que la valeur la plus élevée du gain était dans le cas de 40 milliwatts, ce qui équivalait à 32 décibels.

III.3.2. Génération d'ASE :

Un balayage de paramètres est utilisé dans la simulation pour obtenir la puissance ASE sortant de l'extrémité de la fibre en fonction de la puissance de la pompe. Les deux longueurs d'onde de pompage considérées étaient 980 nm et 1480 nm.

La Fig.9 montre l'ASE se déplaçant en amont et en aval dans une fibre dopée à l'erbium de 14 m de long en fonction de la puissance de pompage, pour les longueurs d'onde de pompage de 980 nm et 1480 nm.

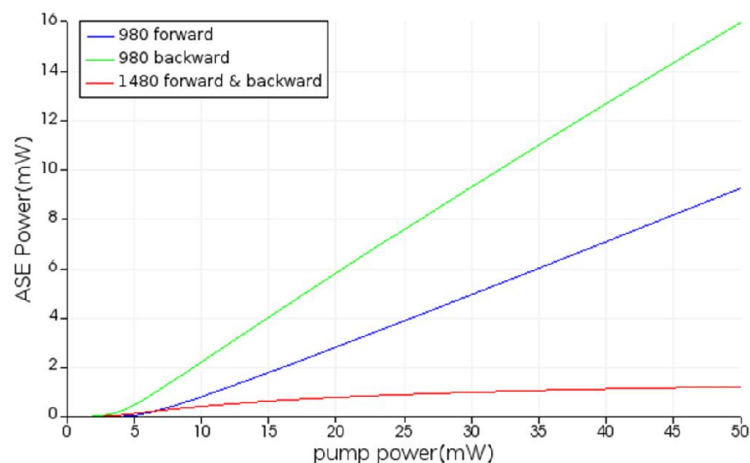


Figure III.9 : l'ASE se déplaçant en amont et en aval dans une fibre dopée à l'erbium de 14 m de long en fonction de la puissance de pompage, pour les longueurs d'onde de pompage de 980 nm et 1480 nm

➤ **Remarque :**

- Le bruit augmente avec l'augmentation de la puissance de la pompe :
- Dans le cas de 980 nm nous avons observé une augmentation significative.
- Dans le cas du 1480 nm, nous avons enregistré une très légère augmentation qui conduit à la stabilité.

La Fig.10 montre la puissance de pompage en fonction de la position le long de la fibre

pour une longueur de 14 m de fibre dopée à l'erbium (fibre A), pour des puissances de pompage injectées à $z = 0$ de 4, 10, 20 et 40 mW à 980 nm, et avec un signal injecté de puissance -40 dBm à 1550 nm. À des puissances de pompe plus élevées, la pompe chute très rapidement, en raison de l'épuisement de la pompe par l'ASE arrière. A l'extrémité de sortie, où l'ASE directe est forte, la pompe est à nouveau épuisée.

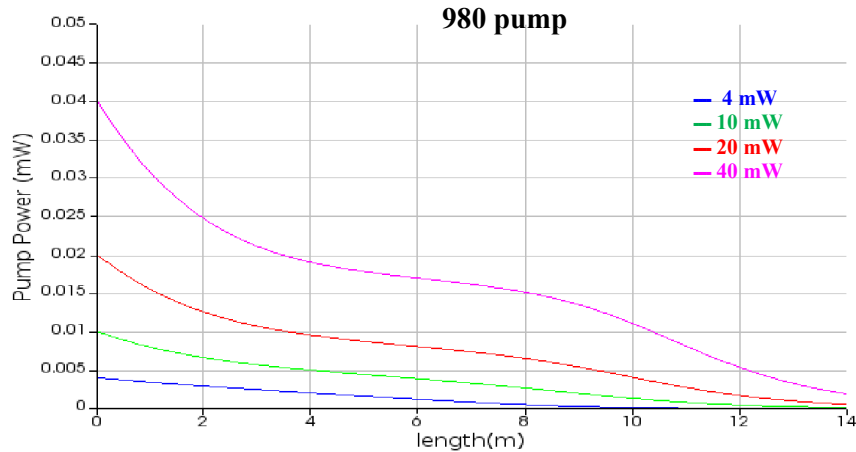


Figure III.10 : La puissance de pompage en fonction de la position, pour des puissances de pompage injectées à $z = 0$ de 4, 10, 20 et 40 mW à 980 nm

➤ **Remarque:**

On remarque une diminution de la puissance de la pompe à mesure que la distance augmente.

Nous portons ensuite notre attention sur deux autres longueurs, représentant une fibre "courte" de 8 m et une fibre "longue" de 25 m. La figure 8 montre le gain de signal (a) et la population à l'état supérieur moyennés le long de la longueur de fibre (b) en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 8 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium pompée à 980 nm et 1480 nm.

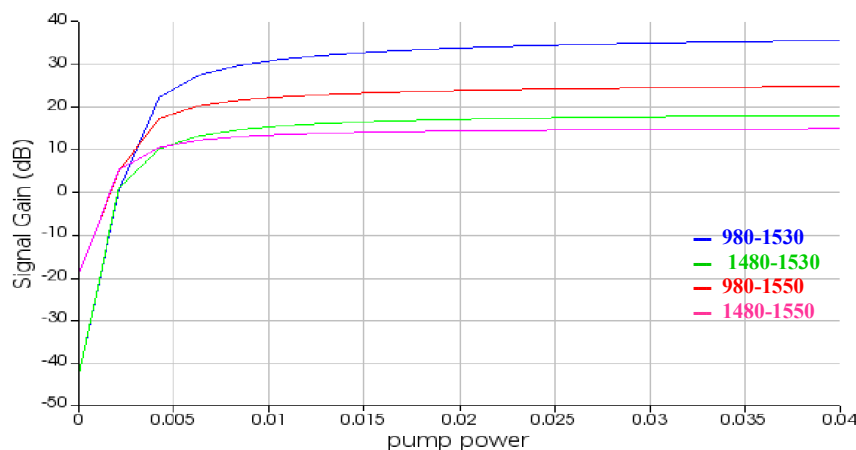


Figure III.11 (a): Le gain de signal en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 8 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium pompée à 980 nm et 1480 nm .

➤ **Remarque :**

- Nous remarquons que le signal de gain augmente de manière significative à mesure que la puissance de la pompe augmente dans la plage de 0 à 6 mW.
- Cette augmentation diminue avec l'augmentation de la puissance de pompage, à fixer à une valeur maximale à la puissance de pompage de 0,025 watt.

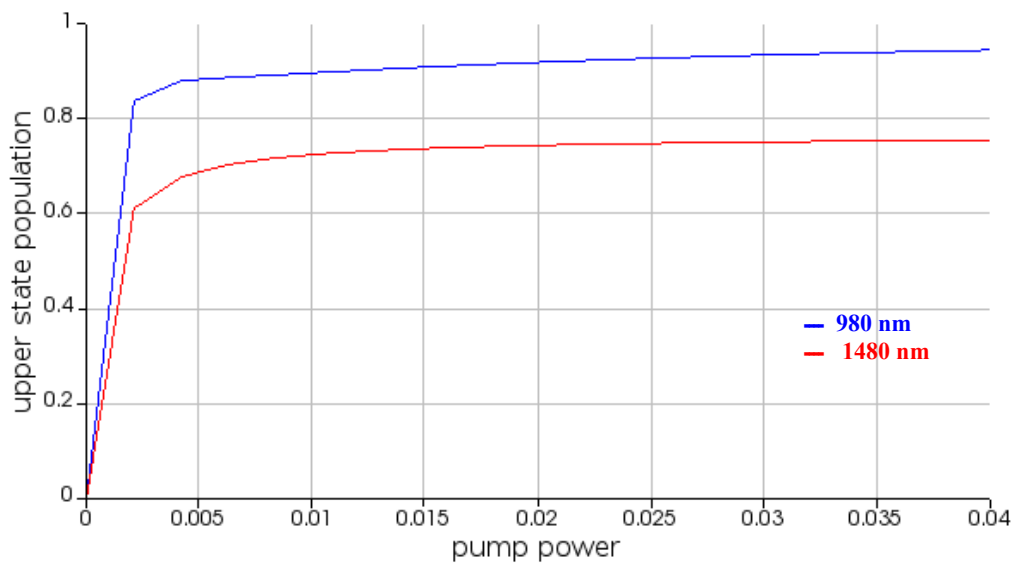


Figure III.11 (b): La population à l'état supérieur en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 8 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium pompée à 980 nm et 1480 nm .

➤ **Remarque :**

- [0--0,003w] Augmentation significative de la population de l'état supérieur dans les deux cas.
- [0,003--0,04w] Une légère augmentation conduit à la stabilité, où elle a atteint une valeur maximale de plus de 90 pour cent en 980 nm.
- Dans le cas de 1480 nm, il n'excédait pas 75 %

La Figure III.12 montre le gain de signal (a) et la population à l'état supérieur moyennés

le long de la longueur de fibre (b) en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 25 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium pompée à 980 nm et 1480 nm.

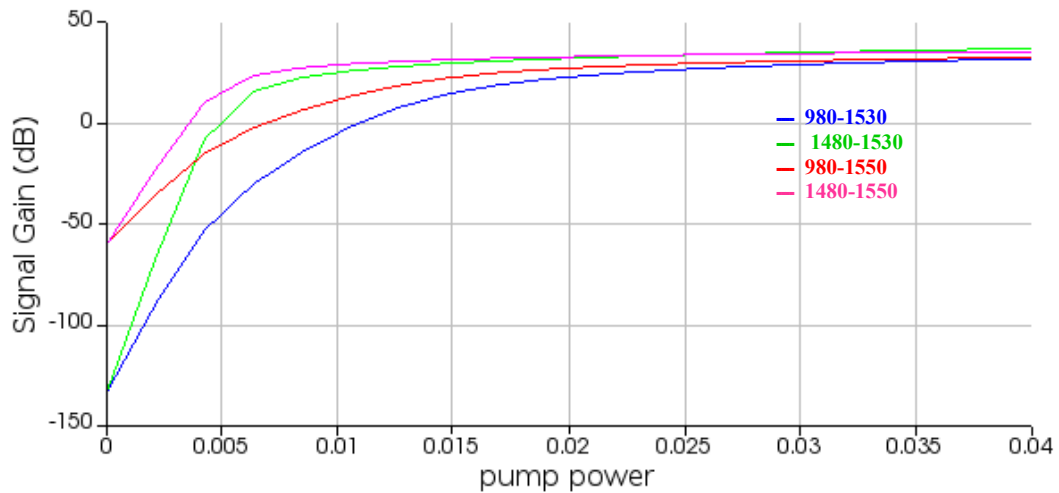


Figure III.12 (a) : Le gain de signal en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 25 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium pompée à 980 nm et 1480 nm .

➤ **Remarque :**

- Le gain augmente de manière significative lorsque la puissance de la pompe augmente jusqu'à ce qu'il soit fixé à une valeur de 40 dB lorsque la puissance de la pompe atteint 0,025 watt.
- Nous avons enregistré dans le cas de 1480 milliwatts, une augmentation de plus de 980 milliwatts.

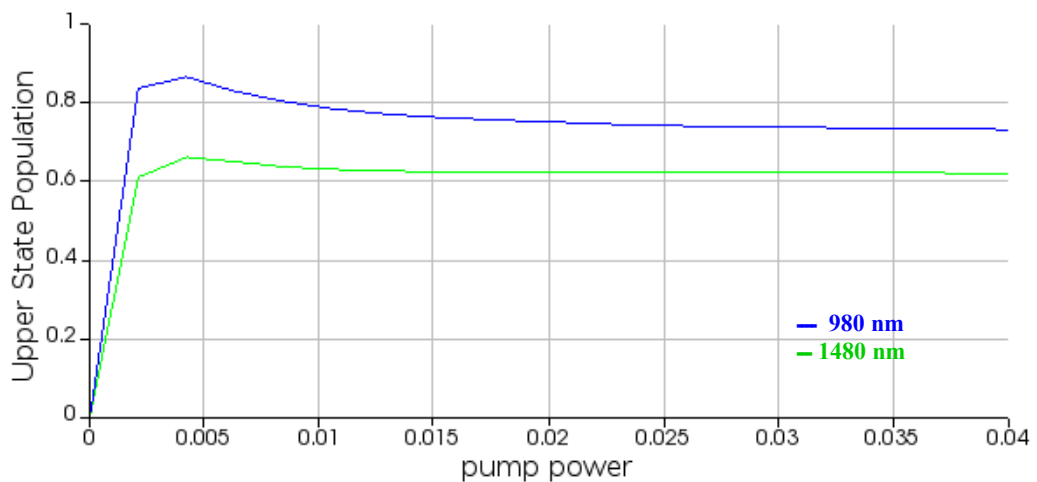


Figure III.12 (b) : La population à l'état supérieur en fonction de la puissance de pompage pour une longueur de 25 m de fibre de silice Al-Ge dopée à l'erbium pompée à 980 nm et 1480 nm.

➤ **Remarque :**

- On note que la population de l'état supérieur augmente avec l'augmentation de la puissance de pompage et s'établit lorsque la puissance de pompage atteint 15 milliwatts dans les deux cas.
- Nous notons que la population de l'état supérieur avait la valeur la plus élevée à la longueur d'onde de 980 nm.

III.4. Conclusion :

Ces simulations nous ont montré les différentes caractéristiques des fibres optiques amplifiées dopées à l'erbium. Elle nous a donné un aperçu du choix des paramètres qui seraient utilisés pour optimiser l'EDFA, dans ce cas la longueur de la fibre dopée, la puissance de la pompe, ainsi que le gain directement corrélé à la population de l'état supérieur. Ces paramètres sont très importants dans le système de transmission par fibre optique.



Conclusion générale

Conclusion générale

Les communications optiques ne cessent pas à développer vu la demande croissante en terme de débit et service. Deux problèmes majeurs à palier afin de répondre aux besoins de clients : la dispersion chromatique et les pertes. Pour la dispersion chromatique, on emploie souvent des fibres spéciales à profile de dispersion exceptionnel pour compenser l'effet cumulé de la dispersion. Quant aux pertes, ce sont les amplificateurs qui jouent le rôle décisif. Ce projet avait pour objectif l'étude et la simulation d'un amplificateur optique à base d'une fibre dopée à l'erbium.

Dans un premier temps nous avons mené une analyse sur les différents types d'amplificateurs. Dans Les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium, un processus d'émission stimulée est réalisé afin d'assurer le transfert d'énergie vers les signaux utiles à faible puissance. Un modèle mathématique basé sur les équations de propagation couplées et l'équation régissant la densité de population est présenté.

Ensuite, nous avons conduit une série de simulations numériques dans le but de valider le modèle mathématique et d'explorer l'influence de différents paramètres. Nous avons utilisé l'environnement INTERCONNECT de Lumerical pour simuler un amplificateur EDFA dont le pompage est effectué aux longueurs d'ondes 980 nm et 1480 nm, respectivement. Le signal utile ayant une longueur d'onde autour de 1550 nm et une puissance aussi faible que -40 dBm se propage dans la même direction que le signal pompe. Les résultats obtenus sont en accord avec la théorie présentée dans le deuxième chapitre. L'impact de la puissance de pompage et la longueur de la fibre sur le gain de signal, la densité de population de niveau excité et le bruit d'émission spontanée amplifiée a été discuté.

En guise de perspective, nous proposons de continuer dans cette thématique en étudiant l'influence de la structure du guide, la densité de dopage ainsi que la longueur de la fibre. L'implémentation d'un EDFA dans une chaîne de transmission optique numérique représente aussi un bon volet dont une optimisation de la qualité de communication et fortement liée aux paramètres de l'amplificateur.



Bibliographie

Bibliographie

1. Milton Ohring, in Materials Science of Thin Films (Second Edition), 2002.
2. www.lambdagain.com
3. www.aljazeera.net/encyclopedia/conceptsandterminology
4. David Massoubre InP-Based Passive Saturable Absorber-Based Switching Gate for High bit-rate All Optical Regeneration, in November 2006
5. Optique pour télécommunications - M.THUAL - IUT DE LANNION (Université de Rennes 1)
- Transmission sur fibre optique - M.THUAL - IUT DE LANNION (Université de Rennes 1)
6. *Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique*, Julien Maury, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Limoges, 2003 [lire en ligne]
- KDDI Research, Inc., « *Success of ultra-high capacity optical fiber transmission breaking the world record by a factor of five and reaching a 10 Petabits per Second* », *Press Release*, 13 octobre 2017
- NEC and Corning achieve petabit optical transmission [archive], sur le site optics.org du 22 janvier 2013
- Voir Marc Niklès, *La diffusion Brillouin dans les fibres optiques : étude et application aux capteurs distribués*, 1997.
7. <https://privacycanada.net>
8. Andrew TANENBAUM Réseaux Dunod, juillet 1997, 3^{ème} édition
- Pierrick ARLOT
Les commutateurs " tout optiques " disponibles en 2000
Electronique International, N°369 du 18 novembre 1999.
9. Encyclopedia Mypedia(1795) - Mimir Heibonsha Limited, Publishers, Tokyo
10. rp-photonics.com, Dr. Rüdiger Paschotta, « Erbium-doped Fiber Amplifiers », Encyclopedia of Laser Physics and Technology [archive] amplificateur optique » [archive], Hanel Photonics (consulté le 26 septembre 2014)
11. Optical Amplifier—EDFA (Erbium-doped Fiber Amplifier) for WDM System Sheldon August 13, 2019
12. ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIERS (EDFA) - May 10, 2020
13. E. Desurvire, Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications, Wiley-Interscience, 2002.
14. Jiang, C., Hu, W. and Zeng, Q., Numerical analysis of concentration quenching model of Er 3+-doped phosphate fiber amplifier. *IEEE journal of quantum electronics* 39, 266-1271, 2003.

Résumé:

Les pertes dans les fibres optiques représentent un problème majeur dans les systèmes de communications optiques modernes. Une solution directe pour résoudre ce problème est d'utiliser les amplificateurs optoélectroniques et fibrés. L'objectif de ce projet est l'étude et la simulation d'un amplificateur à base d'une fibre optique dopée avec les ions de terres rares (Erbium).

Mots clé : Fibre optique, communications optiques, amplification optique

Abstract:

Losses in optical fibers are a substantial problem in modern optical communication systems. A trivial solution to deal with it is to employ fiber based and optoelectronic amplifiers. The main goal of the present project is to study via numerical simulations a kind of amplifier based on a fiber doped with rare element ions (Erbium).

Key words: Optical fiber, optical communications, optical amplifiers.

ملخص:

ضياع الطاقة في الألياف البصرية يمثل أحد العوائق الكبيرة في أنظمة الاتصالات البصرية الحديثة. الحل المباشر لهذه المشكلة يكمن في استخدام المضخمات الكهروضوئية أو المعتمدة في تصميمها على الألياف البصرية. الهدف من هذا المشروع هو استخدام النمذجة الرقمية لرواسة مضخم معتمد على ليف بصري مطعم بشوارد عناصر الأرضيات النافرة (الاربيوم).

كلمات مفتاحية : الألياف البصرية, الاتصالات البصرية, المضخمات البصرية.