

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

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCCEN
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS

Mémoire pour l'obtention du diplôme de
Master en Télécommunications
Option : Système de Télécommunications

Thème

Etude et simulation d'un amplificateur SOA : convertisseur de longueurs d'ondes

PRÉSENTÉ PAR :

MR. ZIANE ILYAS

MR. BOUDAUD HICHEM

Soutenu le 29 Septembre 2021 devant le jury composé de :

Président : Mr.Bouabdallah.R MAA Université de Tlemcen

Examineur : Mlle.Djelti.H MCB Université de Tlemcen

Encadreur : Mr.Khelladi.M MCA Université de Tlemcen

Année Universitaire 2020-2021

REMERCIEMENT

Avant tout, nous remercions le **BON DIEU** d'avoir nous aidés à réaliser ce présent travail.

Nous adresser tout particulièrement à Mr « Khelladi Mounir », nous sincères reconnaissances

Et remerciements les plus vifs, d'avoir nous dirigé et guidé tout le long de ce travail nous tenons à remercions le président de jury, l'ensemble des membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter de lire, juger et rapporter ce travail.

Un grand merci également à tous les enseignants pour leur sympathie et convivialité durant nous cinq années d'études.

Enfin, nous tenons également à exprimer nos remerciements à tous nos collègues et amis qui nous ont aidés et nous a pris en charge (dans tous les sens du terme) au cours des dernières années. Merci beaucoup à vous tous.

DÉDICACE

À MES TRÈS CHERS PARENTS, SOURCE DE VIE,
D'AMOUR ET D'AFFECTION, QUI M'ONT TOUJOURS
POUSSÉ ET MOTIVÉE DANS MES ÉTUDES. CE MÉMOIRE
REPRÉSENTE DONC L'ABOUTISSEMENT DU SOUTIEN
ET DES ENCOURAGEMENTS QU'ILS M'ONT
PRODIGUÉSTOUT AU LONG DE MA SCOLARITÉ .QU'ILS
EN SOIENT REMERCIÉS PAR CETTE MODESTE
DÉDICACE.

À MES PRÉCIEUSES SŒURS

À MES COUSINS

À MES CHÈRES AMIES

EN FIN À MON BINÔME ZIANE ILYAS

HICHEM.....

DÉDICACE

JE DÉDIE CE TRAVAIL À MES CHERS PARENTS QUI M'ONT TOUJOURS POUSSÉ ET MOTIVÉE DANS MES ÉTUDES. MES FRÈRES ET CEUX QUI ONT PARTAGÉ AVEC MOI TOUS LES MOMENTS ÉMOTION LORS DE LA RÉALISATION DE CE TRAVAIL, ILS M'ONT CHALEUREUSEMENT SUPPORTÉ ET ENCOURAGÉ TOUT AU LONG DE MON PARCOURS. À MA FAMILLE, MES PROCHES ET À CEUX QUI ME DONNENT DE L'AMOUR ET DE LA VIVACITÉ.

ENFIN À MON BINÔME BOUDAÛD HICHAM

ILYAS.....

Table de matière

Introduction générale	2
Chapitre I : Les amplificateurs optiques	6
I.1 Introduction	6
I.2 Amplificateurs optiques	6
I.2.1 Définition	6
I.2.2 Les caractéristiques d'un amplificateur optique	6
I.3 Types d'amplificateurs	7
I.3.1 Amplificateur EDFA (Amplificateur optique dopé Erbium)	7
I.3.1.1 Définition	7
I.3.1.2 Principe EDFA	8
I.3.1.3 Les Caractéristique de l'amplificateur optique EDFA	14
I.3.1.3.1 Gain	14
I.3.1.3.2 Spectre de Gain	15
I.3.1.3.3 Puissance de saturation de la pompe	16
I.3.1.3.4 Rapport signal à bruit (SNR)	17
I.3.1.3.5 Facteur de bruit	17
I.3.1.3.6 La durée de vie	18
I.3.1.4 Avantages et inconvénients d'EDFA19.....	19
I.3.2 Amplificateur Raman.....	19
I.3.2.1 Définition	19
I.3.2.2 Principe de l'amplificateur Raman	20
I.3.2.3 Caractéristiques	21
I.3.2.3.1 Théorie du gain Raman	21
I.3.2.3.2 Sources de bruits	23
I.3.2.3.3 Le rapport signal sur bruit	24
I.3.2.4 Avantages et inconvénients de Raman	25
I.4 Comparaison entre les deux types d'amplificateurs	26
I.5 Conclusion	26
Chapitre II : Amplificateur à semi-conducteur	27
II.1 Introduction	
II.2 Définition	28
II.3 Principe de fonctionnement	29
II.3.1 Bandes d'énergie du matériau semi-conducteur	29
II.3.2 Conditions de l'amplification optique	30
II.3.3 Mise en place de l'amplification optique dans le cristal semi-conducteur	31
II.3.4 Propriétés des matériaux semi-conducteurs choisis	33
II.4 Caractéristiques fondamentales du SOA	34
II.4.1 Pic de gain et bande passante	34
II.4.2 Puissance de saturation	35
II.4.3 Émission spontanée amplifiée (ASE)	35
II.4.4 Sensibilité à la polarisation	37
II.4.5 Taux net d'émission	38

II.5	comparaison	38
II.6	Avantages et inconvénients de la SOA	40
II.7	Conclusion	40
Chapitre III :	Technique de conversion de la longueur d'onde	41
III.1	Introduction	42
III.2	Notion sur l'optique non linéaire	42
III.2.1	Effets non linéaires	42
III.2.2	Diffusion stimulée (Brillouin et Raman)	43
III.2.3	Effet Kerr	44
III.2.4	Réponse d'un matériau à l'excitation optique	44
III.2.5	Classification des effets non linéaires	45
III.2.6	Quelques dispositifs d'optique non linéaire	47
III.3	Conversion de la longueur d'onde	47
III.3.1	Mélange à quatre ondes (FWM)	47
III.3.1.1	Définition	47
III.3.1.2	Opérations de base	48
III.3.1.2.1	EDFA comme convertisseur de la longueur d'onde	48
III.3.1.2.2	SOA comme convertisseur de la longueur d'onde	48
III.3.1.3	Application	50
III.3.2	Modulation de gain croisée	52
III.3.2.1	Effet de modulation croisée	52
III.3.2.2	Conversion XGM	53
III.3.2.2.1	Définition	53
III.3.2.2.2	Principe de fonctionnement	53
III.4	Conclusion	54
Chapitre IV :	Simulation et comparaison des résultats	55
IV.1	Introduction	56
IV.2	logiciel Optisystem.....	56
IV.2.1	Présentation du logiciel OptiSystem	56
IV.2.2	Principales caractéristiques du logiciel Optisystem	57
IV.2.3	Applications d'Optisystem	57
IV.2.4	Avantage du logiciel OptiSystem	57
IV.3	Présentation de la simulation	58
IV.3.1	Module d'émission	60
IV.3.2	Support de transmission	63
IV.3.3	Module de réception	66
IV.4	Conclusion	70
Conclusion générale.....		72
Glossaire		73
Bibliographie		74

Tableau des figures

Figure I.1: Configuration schématique d'un simple amplificateur à fibre dopée à l'erbium	8
Figure I.2 : Représentation d'un amplificateur dopé à l'erbium	8
Figure I.3: Diagramme des niveaux d'énergie visualisant les transitions possibles	9
Figure I.4: absorption	10
Figure I.5: principe de l'émission stimulée	11
Figure 1.6 : Désexcitation radiative	11
Figure I.7: Taux de transition entre niveaux d'énergie	12
Figure I.8 : système à 3 niveaux d'énergie	13
Figure I.9: Gain et absorption (gain négatif) des ions erbium (Er^{3+}) dans un verre de phosphate pour des niveaux d'excitation de 0 à 100% par pas de 20%	15
Figure I.10 : Graphique caractéristique du gain et du bruit pour un amplificateur à fibre dopée à l'erbium pompé	18
Figure I.11: Amplificateur Raman	19
Figure I.12 : schéma de principe de la diffusion Raman au sein d'une fibre optique en silice pure	20
Figure I.13 : Spectre Raman dans une fibre en silice pour longueur d'onde de pompe de 1450 nm	21
Figure I.14 : Diffusion Double Rayleigh (DRS)	23
Figure I.15 : Principe d'une liaison utilisant	24
Figure II.1 : Schéma de la structure de l'amplificateur optique à semi-conducteurs	29
Figure II.2 : Structure de bandes d'énergie (BC et BV) d'un cristal semi-conducteur : a) structure générale, b) structure d'un matériau massif sans contrainte	30
Figure II.3 : Schéma de principe de l'inversion de population et de l'amplification optique, montrant les diagrammes de bandes d'énergie, l'indice de réfraction et la fraction de la lumière couplée dans la zone active dans une structure double-hétérojonction. a) jonction non polarisée, b) jonction polarisée en direct.....	32
Figure II.4 : Densité d'états en fonction de l'énergie pour les différents types de matériaux semi-conducteurs.....	34

Figure II.5 : Présentation du pic de gain et de la bande passante	34
Figure II.6 : Puissance de saturation à l'entrée et à la sortie d'un SOA	35
Figure II.7 : Caractéristiques de l'émission spontanée amplifiée (ASE) du SOA (SN 1408- PAAAS4-L422) : a) puissance totale de l'ASE aux sorties du SOA en [mW] et en [dBm] en fonction du courant de polarisation, b) spectre d'ASE à plusieurs courants de polarisation avec détail de l'ondulation et c) puissance de l'ASE couplée avec le signal incident en fonction de la puissance d'entrée optique du SOA à plusieurs courants d'alimentation	37
Figure III.1 Schéma du processus du mélange à quatre ondes	48
Figure III.2 : Schéma FWM dans SOA	49
Figure III.3: Configuration expérimentale de la conversion de longueur d'onde basée sur FWM d'une source à impulsions courtes	50
Figure III.4: Schéma de principe de la conversion ascendante tout optique insensible à la polarisation basée sur l'effet FWM dans un SOA	51
Figure III.5: Schéma de montage de l'expérience de mélange à quatre ondes	51
Figure III.6: Configuration expérimentale de la conversion de longueur d'onde basée sur FWM d'une source à impulsions courtes	52
Figure III.7 Effets XGM et XPM dans le SOA	53
Figure III.8 Montages et principe de conversion de longueur d'onde par la modulation croisée du gain (XGM) dans un SOA	54

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale

À la fin des années 1970, les premiers systèmes de transmission d'informations reposant sur la fibre optique sont installés dans les réseaux interurbains de télécommunications.

L'arrivée de la fibre optique a totalement changé le monde des télécommunications. La conception de systèmes de transmission à très grande capacité était désormais possible. Aujourd'hui plus 80% de communication utilise la fibre optique sur des distance dépasse 30 millions de kilomètres puisqu'il donne plus avantages par rapport aux autres supports de Transmission.

Les télécommunications par fibre optique, dont le développement a sensiblement débuté il y a vingt-cinq ans connaissent un certain essor depuis l'introduction, il y a cinq ans environ, du multiplexage en longueur d'onde (en anglais Wavelength Division Multiplexing, ou WDM). Cette technologie a pour point fort d'exploiter avantageusement l'immense bande passante des fibres optiques. Elle permet actuellement de transmettre 160 canaux en longueurs d'onde, multiplexés chacun dans le temps à un débit binaire de 40 Gbits.s⁻¹, soit un débit global de 6,4 Tbits.s⁻¹, ou encore 100 millions de communications téléphoniques à 64 kbits sur une unique fibre optique. Les systèmes de télécommunication optiques mettent en jeu un ensemble d'éléments, à commencer par les composants d'émission/réception de la lumière, le support de propagation qu'est la fibre optique, les amplificateurs optiques, ainsi que les composants spécifiques pour le WDM. À ces fonctions purement optiques et/ou optoélectroniques s'ajoutent des circuits électroniques rapides permettant de moduler et d'amplifier les signaux émis et recueillis, de récupérer les signaux de référence, ainsi que des organes de haut niveau de gestion du réseau.

Les amplificateurs optiques sont destinés à amplifier les signaux optiques sans recourir à des solutions optoélectroniques basées sur des conversions de type optique/électronique et électronique/optique (photo-détection, amplification électronique, puis émission laser à la même longueur d'onde à partir du signal amplifié électroniquement).

Il existe plusieurs types d'amplificateurs optiques comme les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA), Les amplificateur à semi-conducteur, les amplificateurs Raman (RFA), etc...Les deux

type d'amplificateur optique à fibre dopée l'erbium et semi-conducteur est fonctionnent sous le même principe physique.

L'amplification optique repose sur le phénomène d'émission stimulée. Le signal est amplifié dans un guide (semi-conducteur ou fibre) grâce à un apport extérieur d'énergie appelé pompage (courant injecté ou source de lumière) qui vient créer une inversion de population. La recombinaison électron-trou peut ensuite être provoquée par un photon incident, ce qui donne naissance à un deuxième photon, de même phase et même direction. Cette émission est dite stimulée et conduit à une amplification du signal. En même temps, la recombinaison peut se faire sans la présence d'un photon incident. Ces photons, émis de façon spontanée, de manière non cohérente, constituent le bruit de l'amplification optique. L'ensemble des photons, originels ou pas, subissent une série d'amplifications. Les photons spontanés seront aussi amplifiés, ce qui définit la source de bruit appelée ESA (Emission Spontanée Amplifiée).

L'optique non linéaire est l'ensemble des phénomènes qui résultent de la non-linéarité de la réponse d'un milieu matériel à l'action d'une onde électromagnétique du domaine optique. Elle est une conséquence de l'invention du laser : le premier exemplaire a été construit en 1960 ; la première expérience d'optique non linéaire fut faite en 1961 (génération de second harmonique) ; dès 1962, la plupart des effets de l'optique non linéaire étaient expliqués théoriquement.

Les non-linéaires dans les SOA sont donc produites à cause du changement de densité de porteurs induite par la variation de l'intensité des signaux injectés dans le SOA. Les principaux effets non-linéaires dans les SOA sont les suivants : l'auto rotation de la polarisation (SPR), la modulation croisée de la polarisation (XPoIM), l'auto-modulation de gain et de phase (SGM et SPM), la modulation de gain et de phase croisée (XGM et XPM) et le mélange à quatre d'ondes ().

Dans ce mémoire Nous sommes particulièrement intéressés aux SOA comme convertisseur de la longueur d'onde. Le travail, mène dans le cadre de ce mémoire, est articulé autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre sera parlé sur les amplificateurs optiques, on premier lieu nous avons introduit un concept sur les amplificateurs optique en général et leurs caractéristiques, après en second lieu nous avons discuté de deux types d'amplification (amplificateur à fibre dopée à l'erbium 'EDFA', et RAMAN), nous avons donné une définition, principe de fonctionnement et des caractéristiques les

deux types. Puis nous comparons les caractéristiques par un tableau. On termine par une conclusion.

Le second chapitre, parle sur un autre type d'amplification qui s'appelé amplificateur a semi conducteur 'SOA', nous avons défini ce type puis nous avons parlé de ses fonctionnalités et de son fonctionnement. en fin nous avons le comparais avec les deux autres types de premier chapitre.

Letroisième chapitre parle sur la conversion de la longueur d'onde dans le semi conducteur, en premier lieu nous avons donné une notion sur les ondes non linaire dans laquelle nous avons parlé sur les effets non linéaires, en second lieu nous avons discuté deux différents types de conversion (mélange a quatre ondes 'FWM', modulation a gain croisée 'XGM').

Enfin, le dernier chapitre sera consacré à la simulation. Nous avons commencé avec une définition de programme de simulation que nous avons utilisé, puis nous avons faire la simulation et commenté le résultat. Aprè on termine par une conclusion générale pour contourner l'ensemble de notre travail de ce mémoire de projet de fin d'étude.

CHAPITRE I :

LES AMPLIFICATEURS

OPTIQUES

I.1 Introduction

Ce chapitre, dédié à la présentation des généralités sur les amplificateurs optiques. En premier lieu nous donnons une petite définition sur les amplificateurs optiques en plus de leurs caractéristiques.

En second lieu, on donnera un aperçu sur les différents types d'amplificateurs (Amplificateur optique dopé Erbium/Raman) lesquels nous expliquerons leurs principes de fonctionnement et nous finirons par une comparaison entre ces deux types.

I.2 Amplificateurs optiques

I.2.1 Définition

Les amplificateurs optiques sont destinés à amplifier les signaux optiques sans recourir à des solutions optoélectroniques basées sur des conversions de type optique/électronique et électronique/optique (photo-détection, amplification électronique, puis émission laser à la même longueur d'onde à partir du signal amplifié électroniquement). Parmi les amplificateurs optiques, figurent principalement les amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA, de l'acronyme anglais Erbium Doped Fiber Amplifier), les amplificateurs à semi-conducteurs et les amplificateurs Raman. Leur principe repose toujours sur la possibilité d'amplification optique par émission stimulée de lumière, de la même manière que pour les lasers [1] L'amplificateur est inséré dans un système de télécoms optiques et fait partie des moyens pour régénérer un signal optique. Ce signal composé d'une porteuse modulée va être maltraité de diverses manières au cours de sa propagation. Pour corriger ces défauts générés au cours de la propagation, différents systèmes existent comme le système <3R> qui consiste à ré-amplifier le signal pour corriger les pertes, le remettre en forme et le synchroniser. [2]

I.2.2 Les caractéristiques d'un amplificateur optique

Les paramètres les plus importants caractérisant un amplificateur sont présentés comme suit :

- Bande spectrale dans laquelle il y a du gain
- Gain (en dB)
- Efficacité du gain (rapport gain/puissance de pompe (en dB/mW))
- Puissance de saturation (puissance maximum de sortie de l'amplificateur)
- Facteur de bruit
- Sensibilité du gain à la polarisation du signal
- Longueur d'onde de pompe
- Efficacité du couplage de la pompe et du signal

- Sensibilité aux fluctuations du signal (modulation) et de la pompe
Diaphonie dans les cas de communications WDM

I.3 Types d'amplificateurs

I.3.1 Amplificateur EDFA (Amplificateur optique dopé Erbium)

I.3.1.1 Définition

Les amplificateurs à fibre dopée ont été introduits en 1964 et commercialisés au début des années 1990. L'erbium (EDFA) sont les plus communs. Les longueurs d'onde de travail sont réparties en deux fenêtres. La bande *conventionnelle* (d'où C-Band) entre 1525 nm et 1565 nm et la bande *Longue* (Appelée L-Band) entre 1570 nm et 1610 nm. La principale différence entre les amplificateurs pour la bande C ou L est que pour la bande L, la longueur de fibre dopée est nettement plus longue, ce qui nécessite un pompage optique moins fort.

Il existe deux longueurs d'onde pour le pompage optique de ce type d'amplificateur : 980 nm et 1480 nm.

La longueur d'onde de 980 nm est habituellement utilisée pour des équipements faible bruit. Par contre, comme la fenêtre d'absorption est relativement étroite, on doit utiliser des sources lasers stabilisées. La fenêtre d'absorption de la longueur d'onde de 1480 nm est plus large et est habituellement utilisé pour des amplifications de plus forte puissance.

Le pompage optique à ces deux longueurs d'onde est habituellement utilisé en conjonction dans les systèmes.

Les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium L'EDFA [3] est un amplificateur composé d'une petite longueur de fibre dopée aux ions Er^{3+} . Le signal optique à amplifier ainsi que le laser pompe (apportant l'énergie) sont couplés dans la fibre dopée et émettent dans la même direction [3].

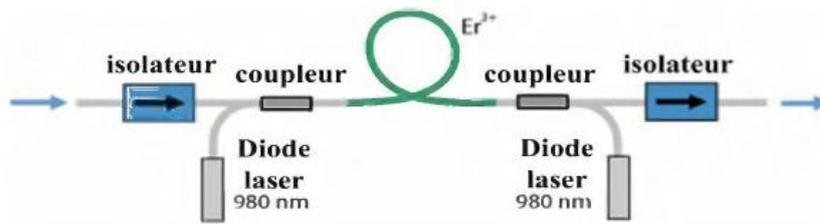


Figure I.1: Configuration schématique d'un simple amplificateur à fibre dopée à l'erbium [4].

Deux diodes laser (LD) fournissent la puissance de pompage de la fibre dopée à l'erbium. La lumière de la pompe est injectée via des coupleurs à fibres dichroïques. Les isolateurs optiques réduisent la sensibilité de l'appareil aux réflexions [4].

La configuration illustrée contient également deux isolateurs optiques. L'isolateur à l'entrée empêche la lumière provenant de l'émission spontanée amplifiée de perturber les étages précédents, tandis que celui à la sortie supprime le laser (voire la destruction) si la lumière de sortie est réfléchiée vers l'amplificateur. Sans isolateurs, les amplificateurs à fibre peuvent être sensibles aux reflets

I.3.1.2. Principe EDFA

Le phénomène de base dans un amplificateur à fibre est que par l'intermédiaire de la pompe (qui est la source) une inversion de la population est réalisée. Cette inversion permet d'exciter les ions Er^{3+} et les rendent actifs, ce qui est responsable de l'amplification des signaux d'entrées.

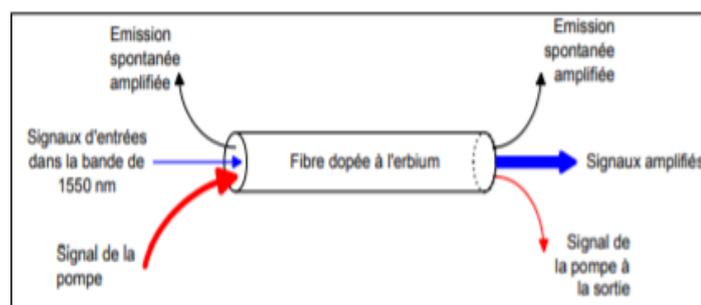


Figure I.2 : Représentation d'un amplificateur dopé à l'erbium [5].

a. Choix de l'erbium

Parmi les critères de choix, qui ont été utilisés pour déterminer le meilleur dopant capable d'amplifier les signaux optiques, on cite [5] :

1. La longueur de transition du laser doit être proche de $1,31\mu\text{m}$ ou $1,55\mu\text{m}$, ce qui correspond à la bande ayant le moins d'atténuation possible et qui pourra être utilisée dans les communications optiques.
2. La longueur d'onde de la pompe correspondant à la transition débutant du niveau fondamental doit être proche de la région infrarouge (980 à 1500 nm).

3. Les transitions des signaux et de la pompe doivent être libres de l'effet de l'état d'absorption excité.

Ces trois critères ont permis de limiter le choix à la famille lanthanides ou terres rares, ce qui correspond à : praséodyme (Pr^{3+}), néodymium (Nd^{3+}) et erbium (Er^{3+}). D'ailleurs l'erbium est le plus utilisé parce qu'il fournit une transition amplificatrice à la longueur d'onde 1550 nm, qui n'est autre que la région possédant le profil du gain le plus homogène

b. Les niveaux d'énergie de l'erbium :

Les niveaux d'énergie correspondant à chaque état atomique possible sont représentés dans la figure suivante :

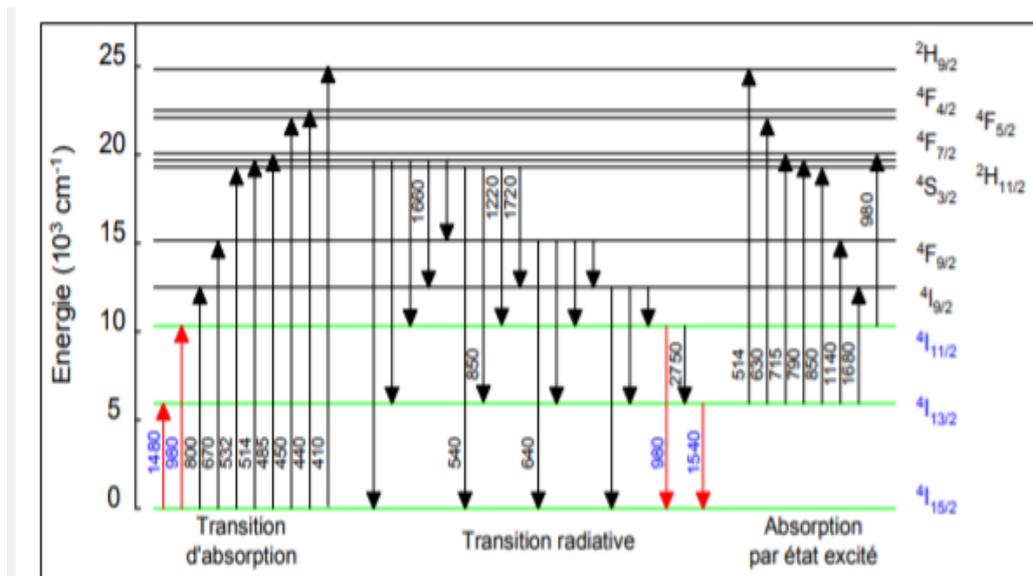


Figure I.3: Diagramme des niveaux d'énergie visualisant les transitions possibles [5].

La Figure I.3 permet de visualiser d'une part les transitions possibles dans la région visible et infrarouge, ce qui correspond à la région de la pompe et d'autre part les transitions radiatives. En outre, cette figure nous permet de visualiser la transition de la bande de longueur d'onde 1550 nm commençant du niveau $4I(13/2)$ (niveau excité) et allant au niveau $4I(15/2)$ (niveau fondamental).

Ceci nous permet de se limiter dans la modélisation des amplificateurs dopés à l'erbium aux niveaux d'énergie : $4I(11/2)$, $4I(13/2)$ et $4I(15/2)$ qui sont respectivement le niveau excité, métastable et fondamental. Mais il arrive que des transitions (absorption par état excité) vers des niveaux supérieurs soient induites par la pompe ou par les signaux, ce qui donne la possibilité d'avoir des électrons qui tombent de ces niveaux supérieurs vers les niveaux les plus bas selon un processus de transition non radiative. Ce qui a un effet néfaste d'une part sur l'intensité de la pompe et des signaux et d'autre part sur la diminution de la population du niveau fondamental

c. Système à deux niveaux [6]

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

c.1 Absorption :

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

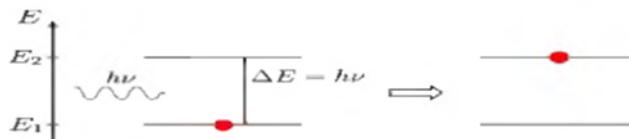


Figure I.4: absorption

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

$$w_{21} = \sigma_{12} * I/h * \nu \quad (I.1)$$

h : constant de Planck

ν : La fréquence du faisceau arrivant.

σ_{12} : La section efficace d'absorption

I : L'intensité du faisceau

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

c.2 Emission stimulée :

Ce phénomène est le processus inverse de l'absorption.

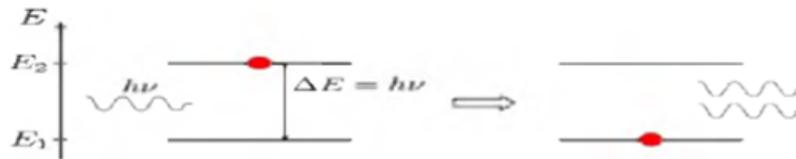


Figure 1.5: principe de l'émission stimulée

Elle a pour taux de transition :

$$w_{21} = \sigma_{21} * I/h\nu \quad (1.2)$$

σ_{21} La section efficace d'émission en m^2

c.3 Désexcitation (émission) spontanée:**c.3.1 Radiative**

L'électron passe de façon spontanée (aucune influence extérieure) d'un niveau d'énergie Supérieur E_2 à un niveau inférieur E_1 en retombant dans son état fondamental l'électron émet un photon d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$, Cette émission lumineuse est appelé fluorescence.

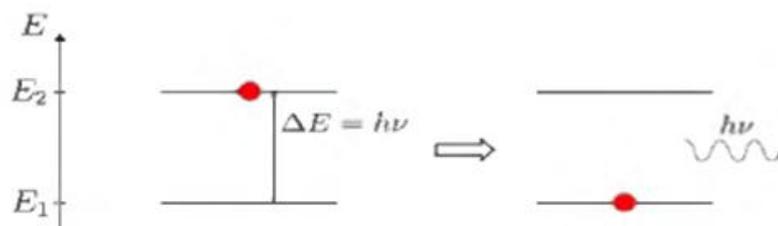


Figure 1.6 : Désexcitation radiative

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

$$A_{21} = \frac{1}{\tau} \quad (1.3)$$

τ : La durée de vie en seconde.

c.3.2 Non radiative

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

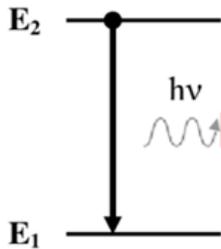


Figure I.7: Taux de transition entre niveaux d'énergie.

d. Principe d'un système à trois niveaux d'énergie

Comme il a été décrit précédemment, le modèle le plus simple capable de modéliser les EDFA est celui qui tient compte des trois niveaux d'énergie $4I(11/2)$, $4I(13/2)$ et $4I(15/2)$. Les ions d'erbium sont propulsés à des niveaux supérieurs par l'absorption de la lumière à partir de la pompe à 980 nm $4I(11/2)$ ou 1480 nm $4I(13/2)$. Pour retourner à une distribution équilibrée, les ions excités regagnent un niveau d'énergie inférieur à la suite d'une :

- Émission stimulée et cela à la suite du contact des ions excités avec des photons incidents, qui ont pour origine les signaux d'entrée
- Émission spontanée où les ions retournent à un niveau d'énergie inférieur spontanément après un certain temps qui n'est autre que le temps de vie de l'état visité

Les rapports en ions d'erbium de chaque niveau sont notés N_1 , N_2 et N_3 dont la somme vaut N . Pour avoir une bonne amplification des signaux d'entrées, on a besoin d'une bonne inversion entre les deux premiers niveaux et d'une pompe ayant un niveau de puissance satisfaisant

d.1 Équations aux populations

On suppose que la valeur de l'intensité de la pompe et des signaux est constante comme celle de la distribution en ions d'erbium à travers un plan transversal coupant la fibre. On définit R_{13} et

R_{31} respectivement comme étant le taux de pompage à partir du niveau 1 au niveau 3 et le taux de l'émission stimulé entre 3 et 1. A partir du niveau d'énergie le plus haut, il y a deux

Possibilités de décélération spontanée : la première radiative (avec un taux $A_3^R = A_{32}^R + A_{31}^R$) et la seconde non radiative (avec un taux A_{32}^{NR}). Mais cette décélération spontanée à partir du niveau 3 est supposée dans sa majorité non radiative ($A_{32}^{NR} \gg A_3^R$). En plus on définit W_{12} et W_{21} respectivement les taux d'absorption d'émission stimulée et entre les niveaux 1 et 2

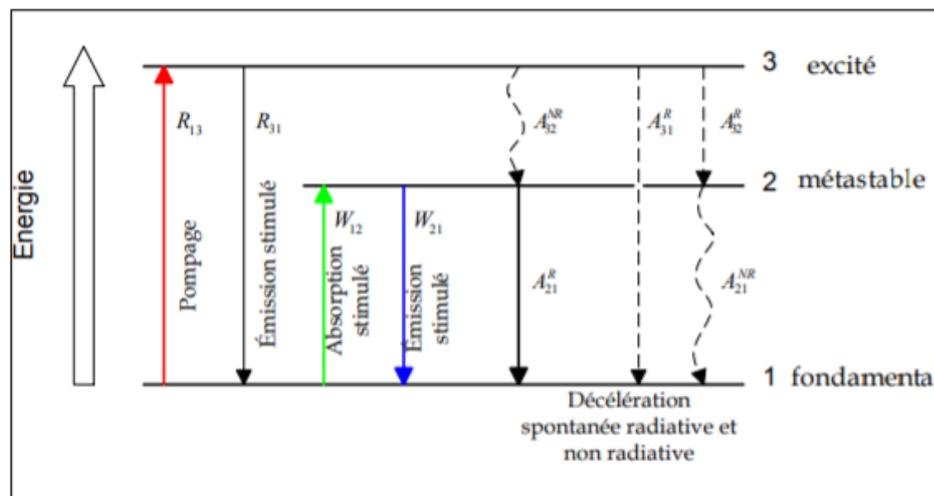


Figure I.8 : système à 3 niveaux d'énergie [5]

Concernant la décélération spontanée à partir du deuxième niveau vers le premier est déterminé par

$$A_2 = A_{21}^R + A_{21}^{NR} \quad (1.4)$$

Avec $A_{21}^R = \frac{1}{\tau}$ (1.5)

Où τ le temps de fluorescent. En plus la décélération spontanée à partir du deuxième niveau vers le premier niveau est supposée dans sa majorité radiative ($A_{21}^R \gg A_{21}^{NR}$)

Il serait alors possible d'écrire les équations aux vitesses correspondant aux taux des ions présents dans chaque niveau [5]:

$$N_1 + N_2 + N_3 = N \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -R_{13}N_1 + R_{31}N_3 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + A_{21}N_2 \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - A_{21}N_2 + A_{32}N_3 \quad (1.8)$$

$$\partial N_3 / \partial t = R_{13} N_1 - R_{31} N_3 - A_{32} N_3 \quad (1.9)$$

- A_{ij} : taux de décelération spontanée d'un niveau i à un niveau j .
- w_{ij} : taux d'émission stimulée.
- R_{ij} : taux de pompage

3.1.3. Les Caractéristique de l'amplificateur optique EDFA

Pour quantifier les performances d'un amplificateur on utilise des paramètres tels que le :

Gain

Spectre de gain

Puissance de saturation

Rapport signal à bruit

Facteur de bruit

Durée de vie

I.3.1.3.1 Gain [7]

Par définition, le gain G d'un amplificateur est un coefficient de proportionnalité entre la puissance d'entrée d'un signal (P_e) et sa puissance en sortie (P_s). Il s'exprime en décibel (dB) et a pour expression:

$$G = 10 \log_{10} \left(\frac{P_e}{P_s} \right) \quad (1.10)$$

Il traduit donc l'augmentation du signal si $G > 0$.

G est déterminé en intégrant le gain linéique g sur toute la longueur de la fibre. Si z représente l'axe de propagation du signal et L la longueur de la fibre dopée, G s'écrit alors:

$$G = \int_0^L g \cdot dz \quad (1.11)$$

Avec

$$g = N_t \cdot (n_2 \sigma_e - n_1 \sigma_a) \cdot T \quad (1.12)$$

N_t : Population total

n_2 : La population N_2 normalisée.

n_1 : La population N_1 normalisée.

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

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

I.3.1.3.2 Spectre de Gain

La forme du spectre de gain d'erbium dépend des sections efficaces d'absorption et d'émission, qui dépendent du verre hôte. De plus, la forme spectrale du gain et pas seulement son amplitude est sensiblement influencée par le degré moyen d'excitation des ions erbium, car ceux-ci ont une transition quasi à trois niveaux. La figure I.9 montre des données pour un type de verre commun, qui est une variante de silice avec des dopants supplémentaires, par ex. pour éviter le regroupement des ions erbium. D'autres compositions de verre peuvent conduire à des spectres de gain sensiblement différents.

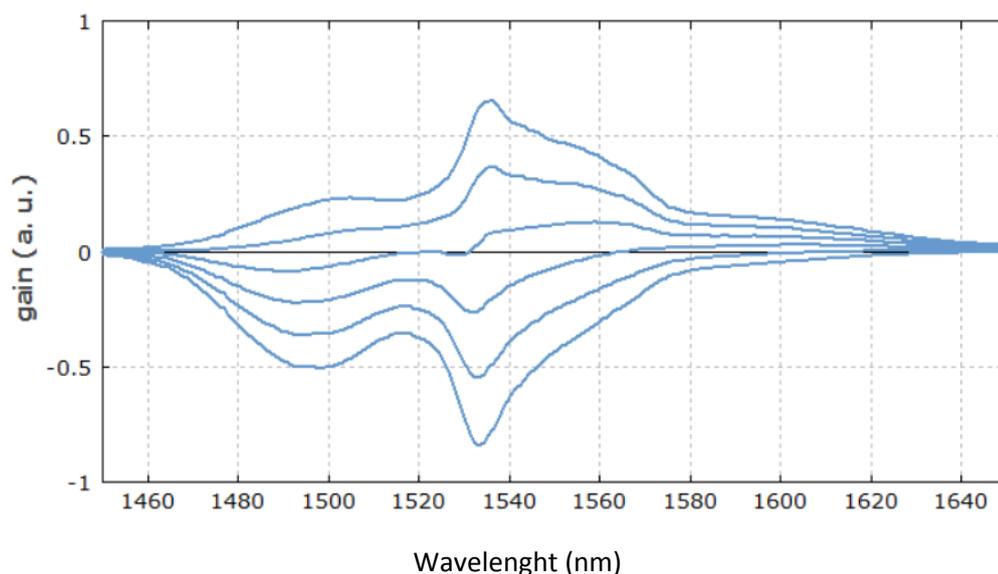


Figure I.9: Gain et absorption (gain négatif) des ions erbium (Er^{3+}) dans un verre de phosphate pour des niveaux d'excitation de 0 à 100% par pas de 20% [8]

Un fort comportement à trois niveaux (avec une transparence atteinte uniquement pour une excitation > 50%) se produit à 1535 nm. Dans cette région spectrale, la fibre non pompée présente des pertes substantielles, mais la section efficace d'émission élevée permet un gain élevé pour une forte excitation. À des longueurs d'onde plus longues (par exemple 1580 nm), un niveau d'excitation inférieur est nécessaire pour obtenir un gain, mais le gain maximal est plus petit.

Le gain maximal se produit généralement dans la région des longueurs d'onde autour de 1530-1560 nm, le pic de 1530 nm étant le plus prononcé pour les niveaux d'excitation élevés, tandis que les faibles niveaux d'excitation conduisent à des maxima de gain à des longueurs d'onde plus longues. Le niveau d'excitation local dépend des sections efficaces d'émission et d'absorption et de l'intensité de la pompe et du signal (en dehors de celle de la lumière ASE). Le niveau d'excitation moyen sur toute la longueur de la fibre, comme cela est pertinent pour le spectre de gain net, dépend de la puissance de la pompe et du signal, mais aussi de la longueur de la fibre et de la concentration d'erbium.

De tels paramètres (ainsi que le choix de la composition du verre) sont utilisés pour optimiser un EDFA pour une région de longueur d'onde particulière, telle que la bande de télécommunications C ou L. Une bonne planéité du gain dans une large région de longueur d'onde (→ égalisation du gain), comme requis par ex. pour le multiplexage par division de longueur d'onde (voir ci-dessous), peut être obtenu en utilisant des hôtes de verre optimisés (par exemple des fibres de tellure ou de fluorure, ou une combinaison de sections d'amplification avec différents verres) ou en combinaison avec des filtres optiques appropriés, tels que des réseaux de Bragg à fibre longue période[8].

I.3.1.3.3 Puissance de saturation de la pompe [7] :

La puissance de saturation de la pompe est définie comme la puissance pour laquelle la population N_2 du niveau 2 soit égale à la population N_1 du niveau fondamental pour une longueur d'onde et une distance z donnée. À cette puissance le milieu est dit transparent, il y a autant de probabilité d'avoir un photon émis que absorbé ($g = 0$) pour une longueur d'onde telle que $\sigma_e = \sigma_a$ (vers 1530 nm)

La puissance de saturation est une grandeur qui nous permettra de déterminer la section efficace d'absorption de la pompe. En effet elle s'exprime de la façon suivante:

$$p_{sat} = \frac{\bar{h} \cdot \nu_p \cdot S}{\sigma_a \cdot \tau \cdot T} \quad (I.13)$$

\hbar : la constant de Planck.

σa : La section efficace d'absorption de la pompe.

τ : La durée de vie du niveau 2

Γ : Le recouvrement

ν_p : La fréquence de pompe

S : la surface de la zone dopée.

I.3.1.3.4 Rapport signal à bruit (SNR)

SNR (Signal to Noise Ratio), exprime la quantité de bruit Optique généré par l'amplification d'émission spontanée dans l'amplificateur. En régime Linéaire [9]

$$SNR = \frac{P_s}{P_{ASE}} \quad (I.14)$$

P_s : la puissance de signal et celle du bruit en sortie de l'amplificateur.

P_{ASE} : Amplification Spontanées Emission

I.3.1.3.5 Facteur de bruit

L'émission spontanée dans l'amplificateur dégradera le SNR en s'ajoutant au bruit pendant le processus d'amplification.

La dégradation du SNR est quantifiée par le facteur de bruit de l'amplificateur F_n

$$F_n = \frac{(SNR)_{input}}{(SNR)_{output}} \quad (I.15)$$

$(SNR)_{input}$: SNR du signal d'entrée

$(SNR)_{output}$: SNR du signal de sortie

$$Fn(dB) = 10 \log Fn \quad (I.16)$$

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

$$F_n = \frac{1}{G} \left[1 + \frac{2P_{ASE}}{h\nu\Delta} \right] \quad (I.17)$$

P_{ASE} : est la puissance de bruit de l'ASE

ν : est la fréquence de pompe

Δ : c'est la bande Passante de l'EDFA

Le facteur de bruit dépend donc à la fois à l'extrémité d'alimentation de la Pompe longueur EDFA.
[10]

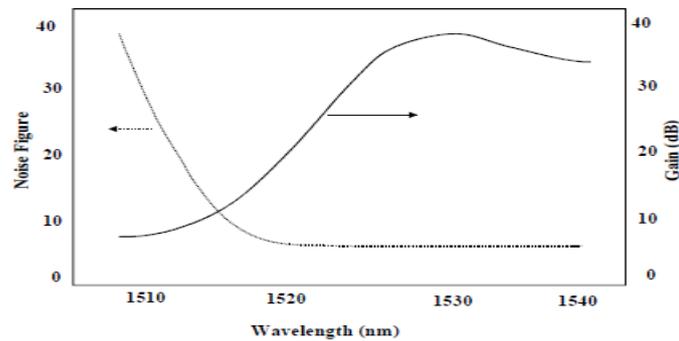


Figure I.10 : Graphique caractéristique du gain et du bruit pour un amplificateur à fibre dopée à l'erbium pompé

I.3.1.3.6 La durée de vie:

Le temps de vie τ d'un électron dans un niveau d'énergie correspond à la durée durant laquelle l'électron est présent dans ce niveau avant qu'il se désexcite vers son niveau fondamental. La durée de vie est une grandeur importante car elle permet de réaliser l'inversion de population, elle est de l'ordre de 10ms.

I.3.1.4 Avantages et inconvénients d'EDFA

Avantages

- 1- Amplification de plusieurs longueurs d'ondes en même temps.
- 2- Largeur de bande typique de 4THz (40 nm), et qui peut être encore amélioré en associant plusieurs niveaux de différents dopants dans la fibre de manière à décaler la bande spectrale (actuellement couvre les bandes C et L).
- 3- Amplification ponctuelle (moins de 50 m de fibre Erbium).

4- Puissances de pompage relativement faibles (quelques dizaines de mW) permettant d'obtenir des gains élevés (25 dB à 45 dB) pour compenser des pertes liées à plusieurs dizaines de kilomètres de fibre

Inconvénients :

- 1-Nécessite un laser de pompage.
- 2-Difficile à intégrer.
- 3-Limite actuellement autour de 1540 nm.

I.3.2 Amplificateur Raman

I.3.2.1 Définition

Un amplificateur Raman est un amplificateur optique basé sur le gain Raman qui résulte de l'effet de la diffusion Raman stimulée [11]. L'amplification Raman est une technologie d'amplification alternative et a été de plus en plus mise en œuvre dans les systèmes longue distance. L'amplificateur Raman est différent de l'EDFA en ce qu'il s'agit d'un système d'amplification distribué. La figure I.11 montre un schéma de l'amplificateur Raman et du profil de puissance le long de la ligne de transmission. [12]

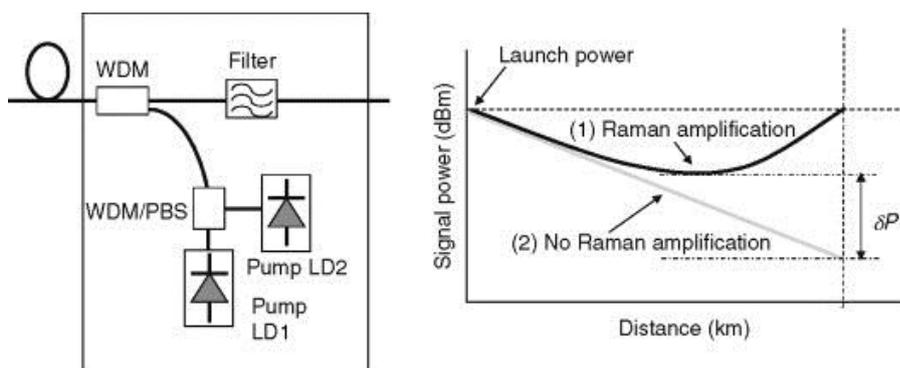


Figure I.11: Amplificateur Raman

I.3.2.2 Principe de l'amplificateur Raman

L'amplification Raman repose légèrement sur le même principe de fonctionnement que son homologue à l'Erbium. L'amplification se fait par une réaction physique et par un échange d'énergie entre le rayon lumineux et le milieu de propagation du signal (la silice).

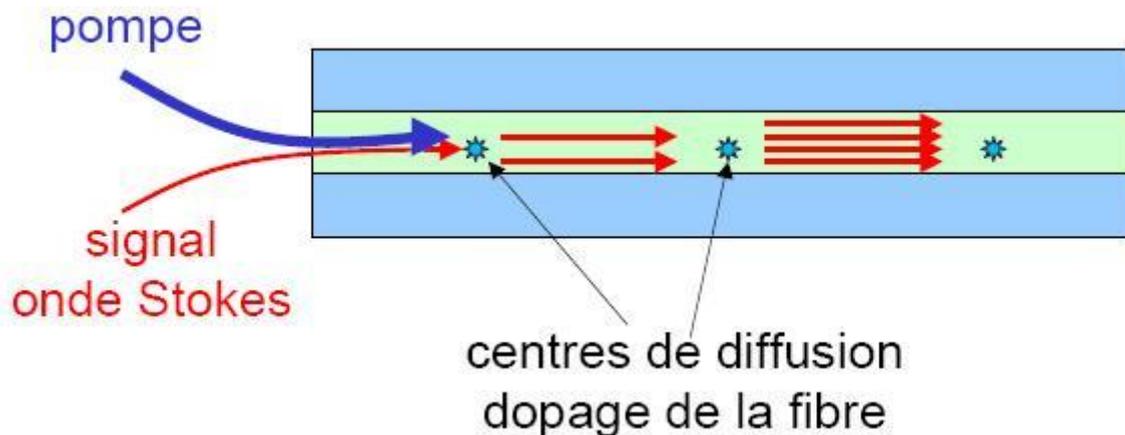


Figure I.12 : schéma de principe de la diffusion Raman au sein d'une fibre optique en silice pure

Au fur et à mesure que les photons laser de pompe se propagent dans la fibre, ils entrent en collision et sont absorbés par des molécules de fibre ou des atomes. Cela excite les molécules ou les atomes à des niveaux d'énergie plus élevés. Les niveaux d'énergie les plus élevés ne sont pas des états stables, ils se désintègrent donc rapidement vers des niveaux d'énergie intermédiaires inférieurs qui libèrent de l'énergie sous forme de photons dans n'importe quelle direction à des fréquences plus basses. Ceci est connu sous le nom de diffusion Raman spontanée ou diffusion de Stokes et contribue au bruit dans la fibre.

Puisque les molécules se désintègrent à un niveau de vibration d'énergie intermédiaire, le changement d'énergie est inférieur à l'énergie reçue initiale au moment de l'excitation de la molécule. Ce changement d'énergie du niveau excité au niveau intermédiaire détermine la fréquence des photons puisque

$$\Delta f = \Delta E / h \quad (1.18)$$

Ceci est appelé le décalage de fréquence de Stokes et détermine le gain Raman en fonction de la forme et de l'emplacement de la courbe de fréquence. L'énergie qui reste du niveau intermédiaire au niveau du sol est dissipée sous forme de vibrations moléculaires (phonons) dans la fibre. Puisqu'il existe une large gamme de niveaux d'énergie plus élevés, la courbe de gain a une large largeur spectrale d'environ 30 THz.

Au moment de la diffusion Raman stimulée, les photons du signal co-propagent le spectre de la courbe des gains de fréquence et acquièrent l'énergie de l'onde de Stokes, ce qui entraîne une amplification du signal.

I.3.2.3 Caractéristiques

I.3.2.3.1 Théorie du gain Raman :

La largeur FWHM de la courbe de gain Raman est d'environ 6 THz (48 nm) avec un pic à environ 13,2 THz sous la fréquence de pompe. C'est le spectre d'amplification du signal utile. Par conséquent, afin d'amplifier un signal dans la plage de 1550 nm, la fréquence du laser de pompage doit être de 13,2 THz inférieure à la fréquence du signal à environ 1452 nm.

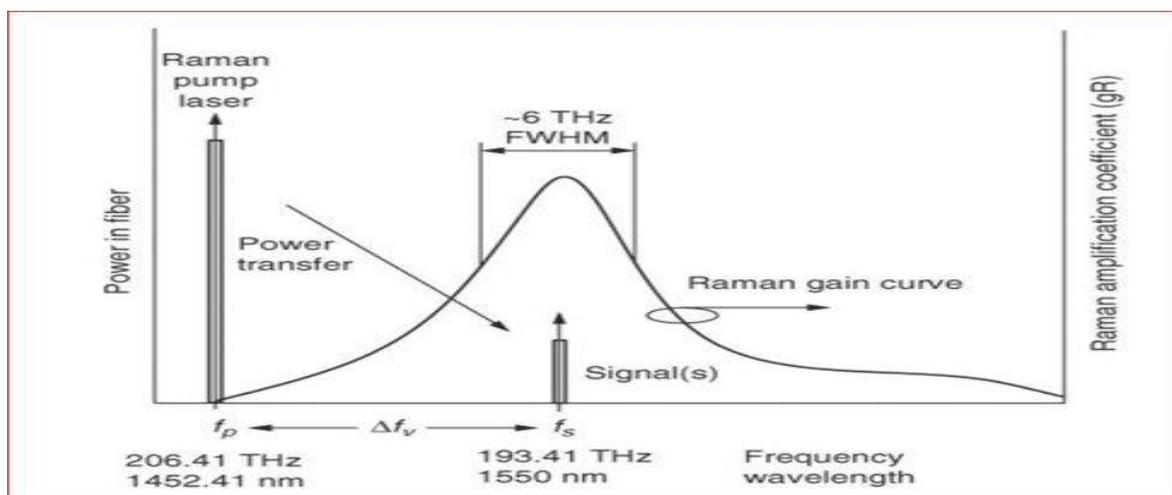


Figure I.13 : Spectre Raman dans une fibre en silice pour longueur d'onde de pompe de 1450 nm

Plusieurs lasers à pompe avec courbes de gain côte à côte sont utilisés pour élargir la courbe de gain Raman total.

$$f_p = f_s + \Delta f_v \quad (1.19)$$

Où : f_p = fréquence de la pompe, THz

f_s = fréquence du signal, THz

Δf_v = décalage de fréquence Raman Stokes, THz.

Le gain Raman est le gain de signal net distribué sur la longueur effective de la fibre. C'est une fonction de la puissance du laser de la pompe, de la longueur effective de la fibre et de la surface de la fibre.

Pour les fibres avec une petite surface efficace, comme dans les fibres de compensation de dispersion, le gain Raman est plus élevé. Le gain dépend également de la séparation du signal de la longueur d'onde de la pompe laser, le gain du signal Raman est également spécifié et le champ mesuré en tant que gain (marche / arrêt). Ceci est défini comme le rapport de la puissance du signal de sortie avec le laser de pompe allumé et éteint. Dans la plupart des cas, le bruit Raman ASE a peu d'effet sur la valeur du signal mesuré lorsque le laser de pompage est activé. Cependant, s'il y a un bruit considérable, qui peut être ressenti lorsque la largeur spectrale de mesure est grande, alors la puissance de bruit mesurée avec le signal désactivé est soustraite de la puissance du signal d'activation de la pompe afin d'obtenir une valeur de gain (marche / arrêt) précise. Le gain (marche / arrêt) Raman est souvent appelé gain Raman.

De plus, pour obtenir un gain significatif, la puissance de la pompe utilisée dans l'amplification Raman distribuée est bien supérieure à la puissance du signal. Par conséquent, l'énergie de pompe transférée dans le processus d'émission stimulée reste faible par rapport au niveau de puissance de pompe impliqué dans le cas d'une amplification Raman distribuée pratique. Cela rend le gain Raman faiblement dépendant de la puissance totale du signal ou du nombre de canaux. C'est un avantage en termes de mise en œuvre pratique, mais nécessite également une parfaite maîtrise de la puissance de la pompe. Le pompage vers l'arrière est donc généralement utilisé pour faire la moyenne des effets des instabilités de la pompe et de son bruit d'intensité relative (RIN).

Il est à noter que le gain Raman (exprimé en dB) produit est une fonction linéaire de la puissance de la pompe. Ceci est dû au fait qu'il n'y a presque pas de saturation de gain induite par la puissance du signal dans la pré amplification distribuée, ce qui fait que le processus d'amplification fonctionne comme dans le régime de puissance d'entrée de petit signal. Ceci est tout à fait différent par

rapport aux EDFA, qui fonctionnent en saturation pour avoir une puissance de sortie élevée. Leur puissance de sortie est alors une fonction linéaire de la puissance de la pompe, faisant de leur gain, exprimé en dB, une fonction logarithmique de la puissance de la pompe.

I.3.2.3.2 Sources de bruits

Le bruit créé dans une étendue DRA se compose:

- Émissions spontanées amplifiées (ASE)
- Diffusion Double Rayleigh (DRS)
- Bruit laser de la pompe

Le bruit ASE est dû à la génération de photons par diffusion Raman spontanée.

Le bruit DRS se produit lorsque la puissance du signal réfléchi deux fois due à la diffusion de Rayleigh est amplifiée et interfère avec le signal d'origine en tant que bruit de diaphonie.

La configuration du DRA de la pompe de comptage se traduit par de meilleures performances OSNR pour des gains de signal de 15 dB et plus. Le bruit du laser de la pompe est moins préoccupant car il est généralement assez faible avec un RIN supérieur à 160 dB / Hz.

Les effets Kerr non linéaires peuvent également contribuer au bruit en raison de la puissance élevée de la pompe laser. Pour les fibres à faible bruit DRS, le facteur de bruit Raman dû à ASE est bien meilleur que le facteur de bruit EDFA. En règle générale, le facteur de bruit Raman est de -2 à 0 dB, ce qui est d'environ 6 dB meilleur que le facteur de bruit EDFA.

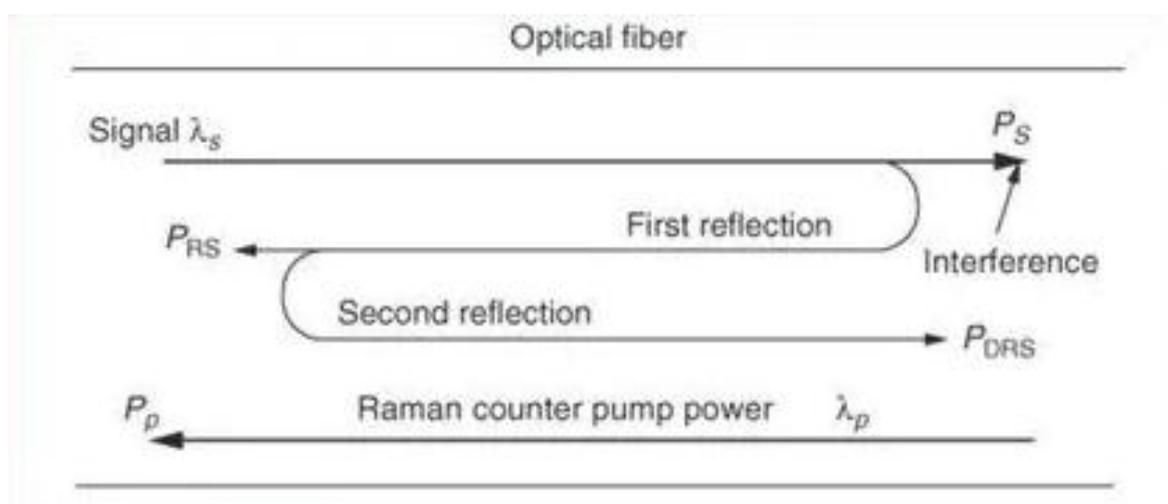


Figure I.14 : Diffusion Double Rayleigh (DRS)

Le facteur de bruit de l'amplificateur Raman est défini comme l'OSNR à l'entrée de l'amplificateur vers l'OSNR à la sortie de l'amplificateur.

$$F_R = \frac{OSNR_{IN}}{OSNR_{OUT}} \quad (1.20)$$

$$NF_R = 10 \log(F_R) \quad (1.21)$$

Le facteur de bruit est la version dB du facteur de bruit.

Le bruit DRA et le gain du signal sont répartis sur la longueur effective de la fibre de travée.

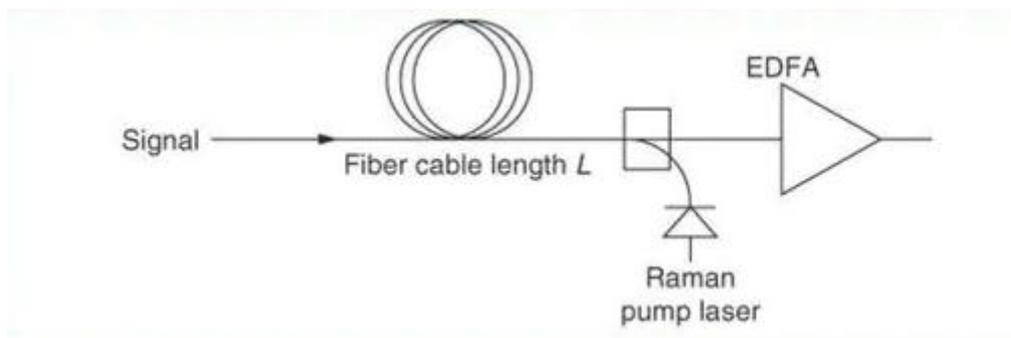


Figure 1.15 : Principe d'une liaison utilisant

Les amplificateurs Raman distribués à contre-pompe sont souvent combinés avec des préamplis EDFA pour étendre les distances de portée. Cette configuration hybride peut fournir une amélioration de 6 dB dans l'OSNR, ce qui peut considérablement allonger les longueurs de portée ou augmenter le budget de perte de portée. La contre-pompe DRA peut également aider à réduire les effets non linéaires et permet de réduire la puissance de lancement du canal.

1.3.2.3.3 Le rapport signal sur bruit

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

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

$$SNR_{out} = \frac{N_{sin}}{N_{ASE}} G \quad (1.22)$$

Le niveau de signal en sortie est égal à celui d'entrée multiplié par la valeur du gain n et Raman, G , quant au niveau de bruit, il est essentiellement dû au bruit d'émission spontanée amplifiée N_{ASE} de l'amplificateur. [13]

I.3.2.4 Avantages et inconvénients de Raman [14]

Avantages

L'amplificateur Raman offre plusieurs avantages :

- Moins de bruit.
- Plus simple dans leur design puisque l'amplification est réalisée directement dans la fibre de transmission et non pas dans un milieu spécial.
- Affectation plus simple des longueurs d'onde des signaux, vu que le gain de celles-ci dépend de la longueur d'onde de la pompe; on échappera donc aux limitations dues au milieu du gain.
- Large bande passante (de l'ordre de 100 nm) réalisable en combinant plusieurs pompes convenablement placées.

Inconvénients

- Les besoins en puissance de pompage sont élevés et les lasers à puissance de pompage élevée ne sont arrivés que récemment
- Contrôle de gain sophistiqué nécessaire
- Le bruit est aussi un problème

I.4 Comparaison entre les deux types d'amplificateurs

Caractéristiques	Amplificateur à fibre dopée	Amplificateur Raman
Bande passante d'amplification	De 20 à 40 nm suivant les dopants, et plus si plusieurs ondes de pompes	48 nm et plus si plusieurs ondes de pompes.
Gain	20 dB ou plus selon la concentration d'ions, la longueur de la fibre dopée et la configuration de pompe	5-40 dB proportionnel à l'intensité de la pompe et la longueur de la fibre de transmission
Bruit	3 à 9 dB	Très faible.
Puissance de saturation	Dépend des constantes de gain et du matériau	A peu près équivalente à la puissance des ondes de pompes.
Longueur d'onde de pompe	980 ou 1480 nm (EDFA)	100 nm en dessous de la longueur du signal au maximum de gain.
Puissance de pompe nécessaire	Quelques dixièmes de mW par dB de gain.	Quelques dizaines de mW par dB de gain.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné une explication bien détaillé sur le fonctionnement d'un deux amplificateur EDFA et Raman. Aussi nous avons bien d'écrire les principales caractéristiques et les avantage du deux d'amplificateur.

Amplificateur EDFA : Largeur de bande typique de 4THz (40 nm), et qui peut être encore amélioré en Associant plusieurs niveaux de différents dopants dans la fibre de manière à décaler la bande Spectrale (actuellement couvre les bandes C et L).

Amplificateur Raman : Large bande (de l'ordre de 100 nm) réalisable en combinant plusieurs pompes convenablement placées. Le chapitre suivant fera l'objet sur l'amplificateur à semi-conducteur.

CHAPITRE II :
**AMPLIFICATEUR À
SEMI CONDUCTEUR**

II.1 Introduction

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

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

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

II.2 Définition

Un Amplificateur optique à semi-conducteur (Semi-conducteur Optical amplifier SOA) est un composant qui est amplifié la lumière incidente grâce au phénomène d'émission stimulée dans un matériau semi-conducteur. Son élément principal est la région active qui fournit le gain optique lorsque l'amplificateur est pompé électriquement. Il est réalisé grâce à une jonction PN (hétéro structure) polarisée en direct, la jonction permettant alors l'inversion de population au sein de ce composant. Le pompage est nécessaire pour atteindre l'inversion de population et par conséquent l'émission stimulée. Un guide d'onde intégré est utilisé pour confiner l'onde de signal à la région active

La structure de base du SOA ressemble, à première vue, à celle d'une diode laser de type Fabry-Pérot comprenant un milieu amplificateur, de longueur L , de largeur w et d'épaisseur d , dans une structure guidant. Néanmoins, les facettes d'entrée et de sortie du SOA sont très peu réfléchissantes, grâce au traitement antireflet.

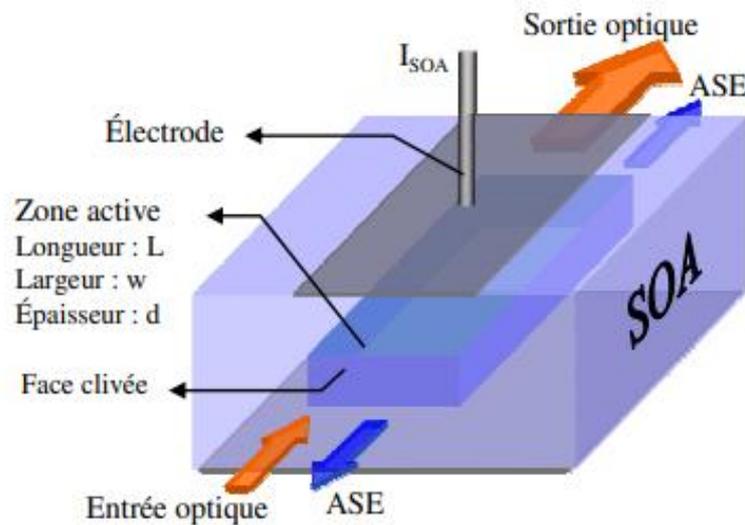


Figure II.1 : Schéma de la structure de l'amplificateur optique à semi-conducteurs. [15]

Ce phénomène (émission stimulée) est provoqué dans un milieu actif à base de matériaux semi-conducteurs, due à une inversion de population assurée par un pompage électrique à travers l'électrode du composant. Ainsi les photons d'émission stimulée s'ajoutent au signal optique confiné dans le guide monomode et l'amplifient. Le signal de sortie est accompagné par un bruit inévitable dû aux autres photons émis en parallèle de façon incohérente avec le signal et qui constituent l'émission spontanée source de l'émission spontanée amplifiée (ASE)

II.3 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du SOA repose sur les mécanismes optoélectroniques liés intimement à la configuration électronique des matériaux semi-conducteurs qui le composent. Pour comprendre l'amplification optique dans le SOA, nous rappelons rapidement quelques notions de base concernant l'amplification optique dans les matériaux semi-conducteurs.

II.3.1 Bandes d'énergie du matériau semi-conducteur

Les propriétés électriques et optiques d'un cristal semi-conducteur se caractérisent par deux bandes d'énergie, celle de valence (BV) remplie d'électrons et la bande de conduction (BC) inoccupée. L'écart d'énergie entre le bas de la bande de conduction E_c et le haut de la bande de valence E_v ,

caractérisant également le cristal, est appelé la largeur de bande interdite E_g (gap³⁰) (Figure II.2a). Un autre niveau d'énergie caractéristique est le niveau de Fermi qui rend compte du remplissage des bandes en porteurs à l'équilibre thermodynamique. Lors de l'injection de porteurs dans le matériau semi-conducteur, l'équilibre thermodynamique n'est plus assuré mais les électrons de la bande de conduction et les trous de la bande de valence sont respectivement en équilibre entre eux. Donc on peut définir un quasi-niveau de Fermi E_{fc} des électrons dans la bande de conduction et E_{fv} des trous dans la bande de valence.

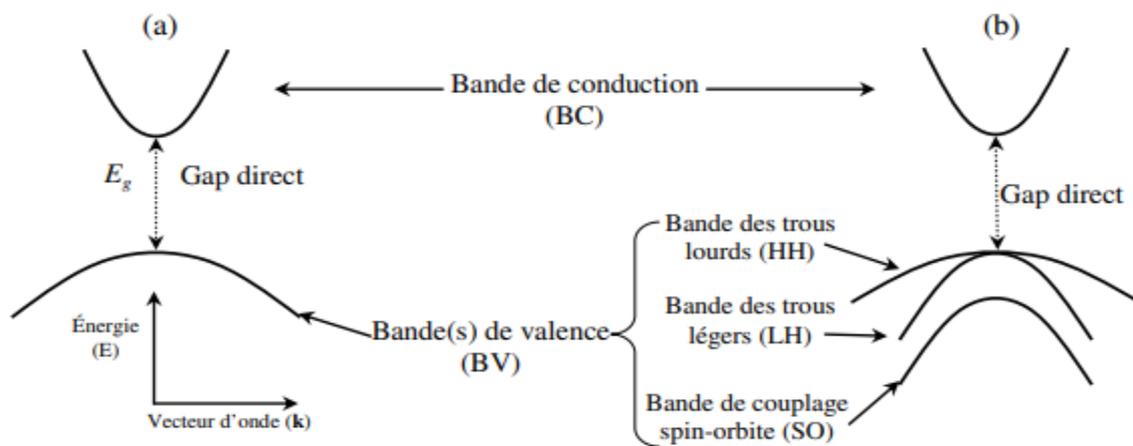


Figure II.2 : Structure de bandes d'énergie (BC et BV) d'un cristal semi-conducteur : a) structure générale, b) structure d'un matériau massif sans contrainte.

La structure de bandes d'énergie des matériaux semi-conducteurs utilisés dans les SOA est constituée de quatre bandes : une bande de conduction et trois bandes de valence (bande des trous lourds (HH³¹), bande des trous légers (LH³²) et bande de couplage spin-orbite (SO)) [16]. Cette structure est à gap direct (bas de BC et haut de BV situés à la même valeur du vecteur d'onde k) (Figure II.2b) pour assurer un meilleur rendement lumineux car les transitions électroniques inter-bandes sont directes et plus probables. Dans la suite, la structure présentée sur la Figure II.2a sera néanmoins utilisée par souci de simplification.

II.3.2 Conditions de l'amplification optique

L'amplification optique dans le matériau semi-conducteur peut avoir lieu en assurant trois conditions. Nous avons vu que les transitions électroniques inter-bandes se terminent soit par l'absorption, soit par l'émission de photons d'énergie égale à celle perdue ou gagnée par les paires électrons-trous mises en jeu. Ceci est possible uniquement si l'énergie des photons est supérieure

au gap du matériau, ce qui constitue la première des conditions. La deuxième est que ces transitions doivent se faire de manière directe ou quasi-directe. La troisième condition est que le taux d'émission stimulée doit être supérieur au taux d'absorption, ce qui peut être assuré par la condition d'inversion de Bernard-Duraffourg :

$$h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = h\omega_0 < E_{FC} - E_{FV} \quad (2.1)$$

Où h est la constante de Planck, $\hbar = h/2\pi$ la constante de Planck réduite, c la vitesse de la lumière dans le vide, ν_0 , ω_0 et λ_0 respectivement la fréquence, la pulsation et la longueur d'onde dans le vide et E_{FC} et E_{FV} les quasi-niveaux de Fermi dans la bande de conduction et de valence. D'où l'on trouve la loi de Bernard-Duraffourg qui détermine les conditions d'amplification optique [17] :

$$E_g < h\nu_0 < E_{FC} - E_{FV} \quad (2.2)$$

II.3.3 Mise en place de l'amplification optique dans le cristal semi-conducteur

Les SOA sont réalisés par une double hétérojonction (p-i-n) utilisée initialement pour réaliser des lasers émettant à température ambiante et à faible courant de seuil [18]. Dans cette jonction, la couche intrinsèque i formant la zone active, est prise en sandwich entre deux couches de confinement fortement dopées (type p et n où la densité d'accepteurs et de donneurs dépasse 10^{24} atomes/m³) à bande interdite plus large que celle de la zone active. Ce sur-dopage fait rapprocher les niveaux de Fermi des régions p et n respectivement vers la bande de valence et la bande de conduction (les jonctions sont alors dégénérées). De plus ce fort dopage fait apparaître un grand nombre de niveaux permis dans la bande interdite au voisinage des bandes de valence et de conduction, formant des queues de bandes qui diminuent le gap apparent des semi-conducteurs [17].

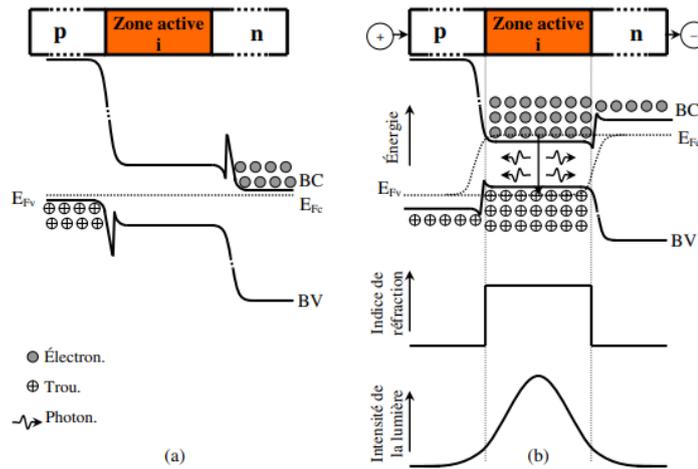


Figure II.3 : Schéma de principe de l'inversion de population et de l'amplification optique, montrant les diagrammes de bandes d'énergie, l'indice de réfraction et la fraction de la lumière couplée dans la zone active dans une structure double-hétérojonction. a) jonction non polarisée, b) jonction polarisée en direct.

À température ambiante et sans polarisation de la double hétérojonction, les porteurs ne diffusent pas vers les régions où ils sont minoritaires à cause des barrières de potentiel (Figure II.3a). Lorsque la jonction est polarisée en direct, les électrons et les trous diffusent facilement vers la zone active où ils se retrouvent piégés grâce aux barrières de potentiel des autres côtés (Figure II.3b). Ainsi une inversion de population commence à avoir lieu dans la zone active, où les porteurs sont contraints de se recombiner. Compte tenu du fait que les matériaux ayant la bande interdite la plus petite ont l'indice de réfraction le plus élevé, l'indice de la couche active est plus élevé que celui des couches adjacentes. Donc en plus de confiner les porteurs, la zone active constitue un guide optique confinant les photons incidents et émis ce qui favorise l'émission stimulée. Le confinement est ici transversal (perpendiculaire au sens de la propagation de lumière).

Plus le courant de polarisation est fort, plus le nombre d'électrons injectés dans la zone active est élevé ce qui crée l'inversion de population importante désirée. Cette inversion apparaît dès que le courant de polarisation franchit une valeur appelée courant de transparence matériau $I_{tr,m}$. Au dessus de cette transparence, la situation est favorable à l'amplification des photons traversant la jonction. Notons cependant que l'amplification n'est effective que si elle est supérieure aux pertes internes, ce qui peut être atteint dès que le courant de polarisation franchit une valeur appelée courant de transparence I_{tr} .

II.3.4 Propriétés des matériaux semi-conducteurs choisis

Les matériaux constituant les SOA utilisés dans notre travail sont des semi-conducteurs quaternaires III-V à bande interdite directe (InGaAsP), dont la largeur d'énergie E_g correspond à la gamme des longueurs d'onde à amplifier et dont les paramètres de maille sont compatibles entre eux [19]. L'alliage quaternaire à base d'Indium, de Gallium, d'Arsenic et Phosphore ($\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$) est le matériau le plus souvent utilisé pour constituer la couche active. L'ajustement des facteurs x et y assure le paramètre de maille, l'indice de réfraction et la largeur de la bande interdite désirés. Cet ajustement permet de réaliser des SOA dont la longueur d'onde centrale du spectre de gain peut être comprise entre 1,1 μm et 1,65 μm . À température ambiante (300 K), l'énergie de la bande interdite d'un cristal d' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ sur substrat d'InP est donnée par [17] :

$$E_g (\text{eV}) = 1.35 - 0.72y + 0.12y^2 \quad (2.3)$$

Notons que pour une fenêtre de télécommunications optiques centrée autour d'une longueur d'onde donnée (par exemple 1,55 μm), l'énergie de la bande interdite du matériau requis peut être déterminée par :

$$E_g (\text{eV}) = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{1.24}{\lambda_0(\mu\text{m})} = 0.8\text{eV} \quad (2.4)$$

Dans la plupart des structures des SOA, la couche active en $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ est prise en sandwich entre deux couches de Phosphure d'Indium (InP), afin de réaliser la double hétérojonction. Ces deux couches ont un gap plus grand et un indice de réfraction moins élevé que ceux de la zone active.

Quand les dimensions de la zone active sont significativement supérieures à la longueur d'onde λ_B de De Broglie des porteurs ($\lambda_B = h/p$ où p est l'impulsion de la particule - ici l'électron), le composant est appelé massif (bulk³⁴). Si une dimension de la cavité est très mince de l'ordre de λ_B (quelques dizaines de nanomètres), la densité d'états de porteurs devient discrète et le composant est appelé à puits quantique (QW³⁵) [17]. Ici, la zone active peut aussi être constituée d'une succession de couches actives séparées par des barrières minces passives et de largeurs de bande interdite différentes, ainsi le composant est appelé à multi-puits quantiques (MQW). En outre, si deux dimensions du guide actif sont de l'ordre de λ_B , le composant est appelé à fil quantique (en anglais quantum wire). Enfin, lorsque les trois dimensions de la zone active sont de l'ordre de λ_B , le

composant est appelé à îlot ou à boîte quantique (QD). La Figure II.4 montre l'allure de la densité d'états dans les quatre types de matériaux.

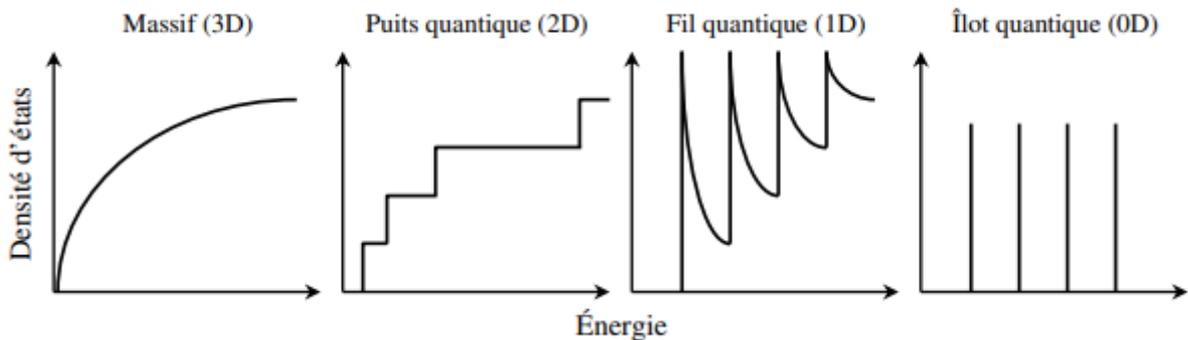


Figure II.4 : Densité d'états en fonction de l'énergie pour les différents types de matériaux semi-conducteurs.

II.4 Caractéristiques fondamentales du SOA

Dans cette partie, nous allons étudier les caractéristiques statiques et dynamiques des SOA :

II.4.1 Pic de gain et bande passante

Lorsque le gain des SOA est observé suivant la longueur d'onde, deux paramètres essentiels peuvent être extraits, le pic de gain et la bande passante à -3 dB. Comme le montre la figure 2.1, le pic de gain est le gain maximum du SOA. Ce pic de gain évolue à la fois en abscisse et en ordonnée avec le courant d'alimentation et la puissance optique du signal injecté. La bande passante (BP) est définie comme l'intervalle spectral entre les deux longueurs d'onde pour lesquelles le gain vaut la moitié du pic de gain en échelle linéaire (soit -3 dB en échelle logarithmique).

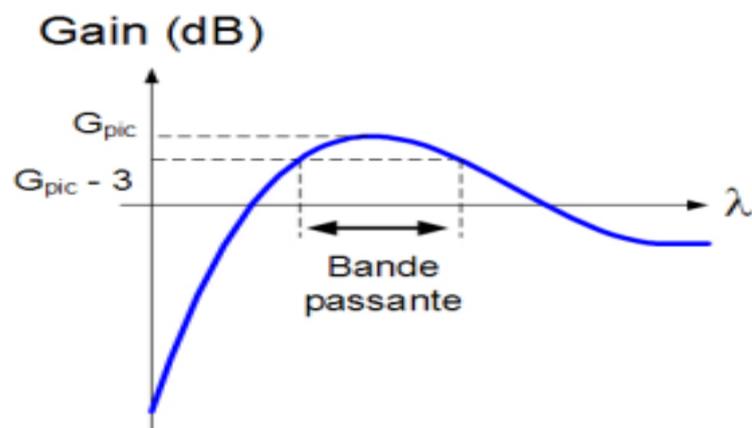


Figure II.5 : Présentation du pic de gain et de la bande passante.

II.4.2 Puissance de saturation

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

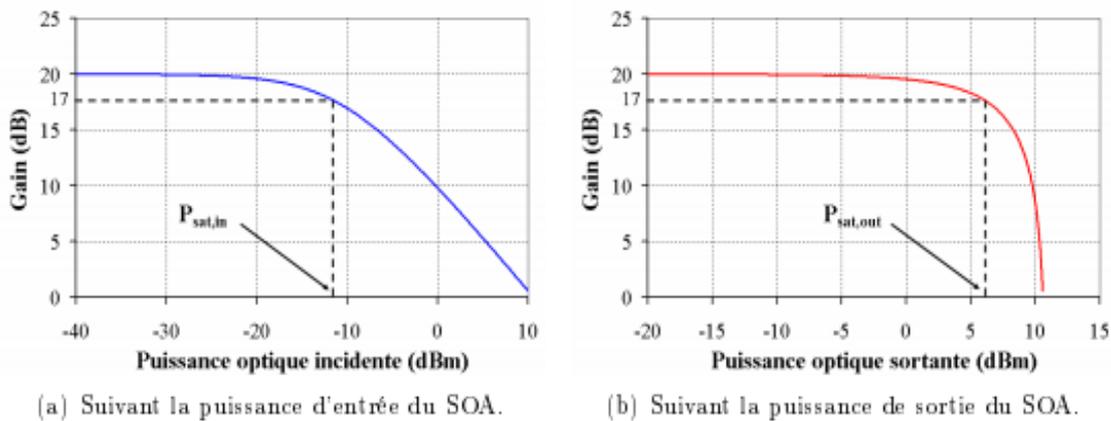


Figure II.6 : Puissance de saturation à l'entrée et à la sortie d'un SOA.

II.3.3 Émission spontanée amplifiée (ASE) [20]

Les photons sont émis de manière stimulée ou spontanée, les premiers garantissent l'amplification du signal alors que les deuxièmes constituent le bruit. En fait, une partie des photons spontanés se couple dans le mode guidé et stimule au cours de sa propagation l'émission d'autres photons cohérents avec elle. Cette partie d'émission spontanée sera donc amplifiée le long de la zone active du SOA ; ainsi on l'appelle : émission spontanée amplifiée (ASE). En absence du signal à l'entrée, la même proportion de photons est amplifiée dans les deux sens de propagation. La distribution de l'ASE sera symétrique le long de la cavité si les faces de cette dernière ont des réflectivités résiduelles identiques. L'ASE consomme des porteurs et ainsi elle concurrence le signal optique, ce qui réduit le gain du composant et ajoute un bruit indésirable au signal à la sortie du composant. La puissance de l'ASE P_{ASE} dans une bande optique B_0 s'écrit :

$$p_{ASE} = n_{sp}(G_{sig} - 1)h\nu B_0 \quad (2.5)$$

Où n_{sp} est le paramètre d'inversion de population. Pour un amplificateur optique idéal $n_{sp} = 1$ ce qui correspond à une inversion totale du milieu. Dans le cas réel, l'inversion est partielle ainsi $n_{sp} > 1$. La Figure II.7 (a) montre que la puissance de l'ASE, au-delà d'un certain seuil, croît quasi-linéairement avec le courant de polarisation. Le spectre de l'ASE est représentatif de la distribution énergétique des porteurs dans les bandes [21]. Dans la Figure II.7 (b), on constate un décalage du sommet du spectre d'ASE vers les courtes longueurs d'onde avec l'augmentation du courant d'alimentation. L'ondulation remarquée sur les petites courbes dans la Figure II.7 (b) est, comme nous l'avons dit, due aux réflectivités résiduelles des faces de la cavité. La Figure II.7 (c) présente la saturation de la puissance de l'ASE par l'augmentation de la puissance du signal optique incident à l'entrée du SOA due à son amplification. La puissance de l'ASE a été montrée pour trois valeurs du courant d'alimentation du composant.

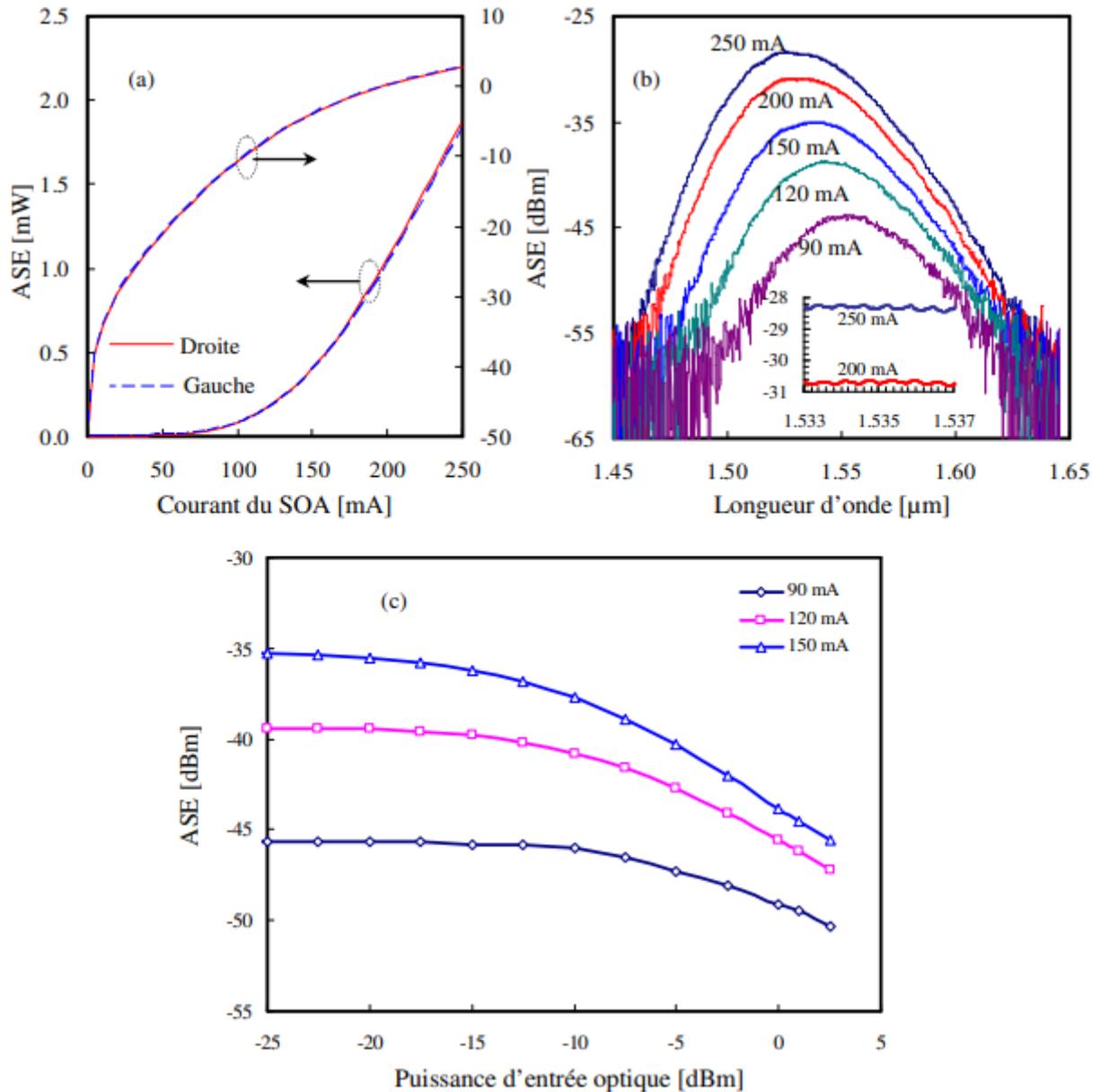


Figure II.7 : Caractéristiques de l'émission spontanée amplifiée (ASE) du SOA (SN 1408- PAAAS4-L422) : a) puissance totale de l'ASE aux sorties du SOA en [mW] et en [dBm] en fonction du courant de polarisation, b) spectre d'ASE à plusieurs courants de polarisation avec détail de l'ondulation et c) puissance de l'ASE couplée avec le signal incident en fonction de la puissance d'entrée optique du SOA à plusieurs courants d'alimentation [21].

II.4.4 Sensibilité à la polarisation

Le gain d'un SOA dépend de l'état de polarisation du signal d'entrée pour la plupart des SOA. Cette dépendance est due à un certain nombre de facteurs tels que la structure du guide d'ondes, la nature dépendante de la polarisation au revêtement de l'anti-réflexion et le matériau de la zone active. Le guide d'ondes de l'amplificateur est caractérisé par deux modes de polarisation

orthogonale appelés Transverse Electric (TE) et Transverse magnétique (TM). L'état de polarisation du signal d'entrée se trouve quelque part entre ces deux modes. La sensibilité à la polarisation d'un SOA est la différence entre le gain en mode TE et le gain en mode TM :

$$G_{TE/TM} = \sqrt{G_{TE} - G_{TM}} \text{ (dB)} \quad (2.6)$$

Il existe plusieurs techniques pour réduire cette sensibilité à la polarisation telle que l'utilisation des matériaux à contrainte dans la zone active.

II.3.5 Taux net d'émission

Le taux net d'émission de photon d'énergie E par le semi-conducteur est le nombre de photons d'énergie E émis par seconde et par unité de volume du cristal. C'est la différence entre le nombre de photons émis et le nombre de photon absorbés. Si le taux net d'émission est positif le matériau émet un rayonnement d'énergie E, si le taux net d'émission est négatif le matériau absorbe un rayonnement d'énergie E.

$$r(\mathbf{E}) = r_{sp}(\mathbf{E}) + N(\mathbf{E})r_{stm}(\mathbf{E}) - r_{abs}(\mathbf{E}) \quad (2.7)$$

$N(\mathbf{E})$: représente la densité de photons d'énergie E, donné à l'équilibre thermodynamique par la formule de Planck :

$$N_0(\mathbf{E}) = \frac{1}{e^{E/KT} - 1} \quad (2.8)$$

Les deux premiers termes de l'expression (2.3) correspondent aux émissions spontanée et stimulée de rayonnement, le troisième correspond à l'absorption des photons.

II.5 Comparaison

Dans ce partie on va comparais le SOA avec les deux autres types d'amplificateurs (EDFA, RAMAN)
La principale différence entre les amplificateurs SOA et EDFA est la zone active où se produit la génération de gain. Dans le cas de l'EDFA, il est généré directement dans la fibre optique, mais dans le cas de la SOA, il se produit directement dans la structure du semi-conducteur. Une autre différence importante est le principe d'alimentation en énergie qui est utilisé pour obtenir

l'amplification (dans le cas de l'EDFA, c'est via une pompe laser). Dans SOA, l'énergie est fournie par le courant d'excitation électrique. [22]

La différence concernant RAMAN est indiquée dans le tableau ci-dessous

Propriété	SOA	EDFA	RAMAN
GAIN	>30	> 25	> 40
longueur d'onde	1280_1650	1280_1650	1530_1560
Max. Saturation (dBm)	60	Dépend de la pompe	30_ 60
sensibilité de polarisation	oui	non	Non
Bruit (dB)	8	5	5
puissance de la pompe	< 400 dBm	> 30 dBm	25 mA
facteur de coût	faible	haut	Moyen
l'intégration	oui	/	Non
effet non linéaire	oui	/	Négligeable

Figure II.8 : tableaux de comparaison

II.6 Avantages et inconvénients de la SOA [23]

Avantages

- L'amplificateur optique à semi-conducteur est de petite taille et pompé électriquement.
- Il peut être potentiellement moins coûteux que l'EDFA et peut être intégré à des lasers à semi-conducteurs, des modulateurs, etc.
- Les quatre types d'opérations non linéaires (modulation à gain croisé, modulation de phase croisée, conversion de longueur d'onde et mélange à quatre ondes) peuvent être conduits.
- La SOA peut être exécutée avec un laser de faible puissance. Cela provient de la durée de vie supérieure de l'état court supérieur à la nanoseconde ou moins, de sorte que le gain réagisse rapidement aux changements de puissance de pompe ou de signal et que les changements de gain provoquent également des changements de phase qui peuvent fausser les signaux.

Inconvénients

- La performance de la SOA n'est toujours pas comparable à celle de l'EDFA. La SOA a un bruit plus élevé, un gain plus faible, une dépendance modérée à la polarisation et une non-linéarité élevée avec un temps transitoire rapide

II.7 Conclusion

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

CHAPITRE III :
TECHNIQUE DE
CONVERSION DE LA
LONGUEUR D'ONDE

III.1 Introduction

Lorsqu'un milieu matériel est mis en présence d'un champ électrique \vec{E} il est susceptible de modifier ce champ en créant une polarisation \vec{P} . Cette *réponse* du matériau à l'*excitation* peut dépendre du champ de différentes façons. L'optique non linéaire regroupe l'ensemble des phénomènes optiques présentant une réponse non linéaire par rapport à ce champ électrique, c'est-à-dire une réponse non proportionnelle à E .

En présence d'une onde électromagnétique du domaine de l'optique (longueur d'onde de l'ordre de 1000 nm), autrement dit, de lumière, beaucoup de matériaux sont transparents, et certains d'entre eux sont non linéaires, c'est pourquoi l'optique non linéaire est possible. Les principales différences avec l'optique linéaire sont les possibilités de modifier la fréquence de l'onde ou de faire interagir entre elles deux ondes par l'intermédiaire du matériau.

Ces propriétés très particulières ne peuvent apparaître qu'avec des ondes lumineuses de forte intensité. C'est pourquoi des expériences d'optique non linéaire n'ont pu être réalisées qu'à partir des années 1960 grâce à l'apparition de la technologie des lasers.

Dans ce chapitre on parlera en premier lieu de la non linéarité dans la télécommunication optique puis en second lieu on parlera de la conversion de la longueur d'onde nous discuterons de deux types de conversion (Mélange à quatre d'onde 'FWM', modulation à gain croisée).

III.2 Notion sur l'optique non linéaire

III.2.1 Effets non linéaires

La réponse d'un milieu diélectrique à la lumière qui le traverse devient non linéaire pour des champs électromagnétiques intenses comme c'est le cas dans les communications océaniques, par exemple. Cette réponse non linéaire est due notamment aux mouvements non harmoniques des électrons du matériau de transmission sous l'influence de l'onde qui le traverse. Les effets non linéaires (NL) sont parfois observables pour des puissances de l'onde dans la fibre relativement faibles, ceci à cause des très petites dimensions des fibres (cœur) et des pertes très faibles (<1dB/Km) [24].

Les effets NL se voient surtout dans les fibres monomodes et se traduisent par une atténuation du signal en fonction de l'augmentation de $P_{\text{transmise}}$ et une création de nouvelles longueurs d'onde à

partir du signal. Les effets NL de plus bas ordre proviennent de la susceptibilité d'ordre 3. En effet, la susceptibilité d'ordre 1 est déjà prise en compte dans l'atténuation et les dispersions discutées précédemment. La susceptibilité d'ordre 2, responsable des effets NL comme les générations de seconde harmonique, de somme de fréquences et d'oscillation paramétrique est nulle pour des molécules possédant une inversion symétrique comme la silice pure qui constitue le cœur de la fibre en absence de dopants.

La susceptibilité d'ordre 3 est responsable des phénomènes comme la génération de troisième harmonique, du mélange à quatre ondes (Four Waves Mixing, FWM) et de la réfraction NL dans les fibres optiques, seule la réfraction NL joue un rôle significatif [25].

En classe les non linéarités en deux catégories :

- Celles induites par l'indice de réfraction non linéaire (effet Kerr)
- Celles dues à la diffusion stimulée (Brillouin et Raman).

La variation de l'indice de réfraction de l'intensité du champ est connue sous le nom d'effet Kerr optique et conduit à un certain nombre de phénomènes aussi intéressants que complexes ; les plus connus sont :

- L'auto modulation de phase (SPM), où les fluctuations de la puissance optique modulent la phase du signal, produisant un élargissement du spectre.
- La modulation de phase croisée (XPM), où les fluctuations de l'intensité d'un canal modulent les phases des autres canaux.
- Le mélange à quatre ondes (FWM). Est le battement entre deux canaux à fréquences différentes génère de nouvelles fréquences.
- La modulation de gain croisée (XGM cross gain modulation)

III.2.2 Diffusion stimulée (Brillouin et Raman)

Couplage photon entre le champ électromagnétique et les vibrations mécaniques du milieu. Ces vibrations peuvent être acoustiques (Brillouin) ou optiques (Raman). Elles ont pour effet un transfert de puissance vers des fréquences plus basses, créant ainsi une perte de puissance du signal d'entrée [26,27].

III.2.3 Effet Kerr [28]

Découvert en 1875 par le physicien écossais John Kerr, l'effet Kerr est une biréfringence créée dans un matériau par un champ électrique extérieur. Cela va entraîner l'existence de deux indices de réfractifs dans ce matériau. La différence de ces indices principaux, extraordinaire n_e et ordinaire n_o , est proportionnelle au carré du champ :

$$n_e - n_o = k \lambda E^2 \quad (\text{III.1})$$

λ : est la longueur d'onde de la lumière utilisée.

K : constante de Kerr du matériau.

E : est le champ électrique.

C'est l'effet Kerr optique. La dépendance de l'indice de réfraction de

L'intensité optique s'exprime sous la forme suivante :

$$n(\omega, E) = n_0(\omega) + n_2 |E|^2 \quad (\text{III.2})$$

n_0 : est la contribution linéaire.

n_2 : est l'indice non linéaire qui dépend du matériau.

III.2.4. Réponse d'un matériau à l'excitation optique

La polarisation créée par une onde lumineuse de fréquence ω_1 traversant un matériau s'écrit sous la forme :

$$\vec{P} = \vec{P}^{(1)} + \vec{P}^{(2)} + \vec{P}^{(3)} + \dots \quad (\text{III.3})$$

Où \vec{P}_p^n est la polarisation d'ordre n en puissances du champ électrique :

$$\vec{P}(\omega_1) = \epsilon_0 \chi^{(1)}(\omega_1) \vec{E}(\omega_1) + \epsilon_0 \chi^{(2)}(\omega_1) \vec{E}(\omega_1) \vec{E}(\omega_1) + \epsilon_0 \chi^{(3)}(\omega_1) \vec{E}(\omega_1) \vec{E}(\omega_1) \vec{E}(\omega_1) + \dots \quad (\text{III.4})$$

Où ϵ_0 est la permittivité du vide, et est le tenseur de susceptibilité électrique [29] d'ordre n (qui est en fait un tenseur d'ordre $n+1$)

Plus généralement, on peut montrer que pour n ondes de fréquences $\omega_1, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n$ dont on note les amplitudes $\vec{E}(\omega_i)$. La polarisation d'ordre n suivante est créée :

$$\vec{P}^n(\omega_1 + \dots + \omega_n) = \epsilon_0 \chi^{(n)}(\omega_1, \dots, \omega_n) \vec{E}(\omega_1) \dots \vec{E}(\omega_n) \quad (\text{III.5})$$

Où $\chi^{(n)}(\omega_1, \dots, \omega_n)$ est le tenseur de susceptibilité électrique [29] d'ordre $n+1$ dépendant du matériau utilisé.

Cette dernière expression montre que l'onde créée résulte d'un mélange de fréquence des ondes initialement présentes.

Une interprétation des non-linéarités apparaissant dans la polarisation provient de l'aspect microscopique de la matière. Chaque atome d'un matériau diélectrique est entouré d'un nuage électronique susceptible de se déformer sous l'action de \vec{E} ce qui crée un dipôle électrique. Ce dipôle, pour une petite déformation, est proportionnel à E , mais si la déformation est trop importante, ce n'est plus le cas. La somme de tous les dipôles est alors la polarisation introduite plus haut, d'où sa non-linéarité. On peut utiliser un raisonnement analogue dans le cas des métaux et des plasmas : les électrons libres subissent, de la part du champ excitateur, une force de Lorentz dépendant de la vitesse des électrons, et donc de la polarisation. Ainsi, ces milieux peuvent également présenter des effets non linéaires. [30]

III.2.5. Classification des effets non linéaires

Chaque type de matériau présente des susceptibilités électriques différentes. Ils donnent donc des effets non linéaires de différents ordres. On classe alors ces effets suivant cet ordre.

a) Au premier ordre

Seul le premier terme de la polarisation intervient :

$$\vec{P}(\omega_1) = \epsilon_0 \chi^{(1)}(\omega_1) \vec{E}(\omega_1) \quad (\text{III.6})$$

Il s'agit de l'optique linéaire classique où la fréquence de l'onde créée est forcément égale à celle de l'onde initiale. Les effets alors observés sont la réfraction des ondes et la biréfringence.

b) Au second ordre

La polarisation s'écrit :

$$\vec{P}^{(2)}(\omega_1+\omega_2) = \epsilon_0 \chi^{(2)}(\omega_1, \omega_2) \vec{E}(\omega_1) \dots \vec{E}(\omega_2) \quad (\text{III.7})$$

On peut notamment citer les effets suivants :

- La génération de la fréquence somme $\omega_1 + \omega_2$, dont un cas particulier est la génération de seconde harmonique lorsque $\omega_1 = \omega_2$. Les pointeurs lasers verts sont un exemple d'application : une émission source à 1 064 nm (infrarouge) est doublée à 532 nm (vert), le doublage en fréquence impliquant une division par 2 en longueur d'onde.
- L'Effet Pockels lorsque $\omega_1 = 0$
- La Rectification optique est le phénomène réciproque de l'effet Pockels, ou électro-optique. Lorsqu'un cristal non linéaire $\chi^{(2)}$ est éclairé par un faisceau lumineux.

Un champ de polarisation électrique statique est engendré par rectification optique selon le processus :

$$\vec{P}(\Omega) = \epsilon_0 \chi^{(2)}[\omega + \Omega; \omega - \Omega] \vec{E}(\omega + \Omega) \vec{E}(\omega) \quad (\text{III.8})$$

c) Au troisième ordre

La polarisation s'écrit :

$$\vec{P}^3(\omega_1+\omega_2+\omega_3) = \epsilon_0 \chi^{(3)}(\omega_1; \omega_2; \omega_3) \vec{E}(\omega_1) \vec{E}(\omega_2) \vec{E}(\omega_3) \quad (\text{III.9})$$

On peut citer les effets suivants :

- Le mélange paramétrique à quatre ondes, dont un cas particulier est la génération de la troisième harmonique (laser UV),
- Les diffusions inélastiques Raman, Brillouin,
- L'effet Kerr
- La diffusion inélastique Stokes, l'absorption à deux photons et l'émission à deux photons.

III.2.6 Quelques dispositifs d'optique non linéaire

- Oscillateur paramétrique optique
- Amplificateur paramétrique optique
- Cristal doubleur de fréquence
- Laser accordable
- Fibres à cristaux photoniques
- Convertisseur de longueur d'onde

III.3 Conversion de la longueur d'onde

III.3.1 Mélange à quatre ondes (FWM)

III.3.1.1. Définition

Le mélange à quatre ondes (FWM) est un effet non linéaire de troisième ordre généré, comme l'auto modulation de phase et la modulation de phase croisée, par la dépendance de l'indice de réfraction des fibres avec l'intensité. Dans le FWM, le battement entre deux longueurs d'onde module la phase de l'un des canaux générant ainsi des nouvelles fréquences.

Quand trois ondes aux fréquences ω_i , ω_j et ω_k (k, i, j) interagissent à travers la susceptibilité de troisième ordre $\chi^{(3)}$, un signal est généré à la fréquence [29] :

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \quad (\text{III.10})$$

Ainsi trois ondes Co-propagatives génèrent, par FWM, neuf nouvelles ondes optiques. Les effets pénalisants sont immédiats dans un système à multiplexage en longueur d'onde (WDM) : même s'il n'a que 10 canaux, il y aura des centaines de nouvelles fréquences puisque toutes les combinaisons de 3 ondes donneront lieu à des produits de FWM.

Si les canaux sont régulièrement espacés, les fréquences générées se superposent aux fréquences déjà existantes.

Dans le cas où $\omega_i = \omega_j$, deux nouvelles fréquences seront créées à

$$\omega_i - \Omega \text{ et } \omega_k + \Omega \text{ avec } \Omega = \omega_k - \omega_i$$

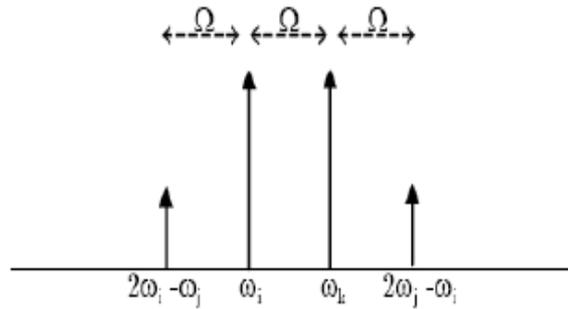


Figure III.1 Schéma du processus du mélange à quatre ondes

III.3.1.2 Opérations de base

III.3.1.2.1 EDFA comme convertisseur de la longueur d'onde

Le mélange à quatre ondes généré dans les amplificateurs à fibre dopée erbium (EDFA) conventionnels a été considéré comme négligeable par rapport à celui généré dans les fibres de transmission du fait que la conception des amplificateurs ne nécessite en général qu'une courte longueur de fibre pour que les effets soient significatifs. Par contre, ces dernières années les longueurs des fibres dans les EDFA ont été augmentées pouvant dépasser la centaine de mètres et donc les effets du FWM ont dû être pris en compte lors de la conception des systèmes. Dans quelques applications le mélange à quatre ondes a pu être utilisé pour mesurer le coefficient de Kerr optique. [31]

III.3.1.2.2 SOA comme convertisseur de la longueur d'onde

En cela, deux ondes optiques avec des états identiques de polarisations sont couplées dans un SOA saturé. La pompe (pompe E) à une fréquence de ω_{pompe} est généralement plus forte que le signal de la sonde (sonde E) à une fréquence de ω_{probe} , qui contient les données à longueur d'onde convertie. Le signal de données est maintenu petit,

Par rapport à la pompe, afin d'éviter toute modulation de gain qui peut affecter les performances du signal converti pendant le processus de conversion. [32]

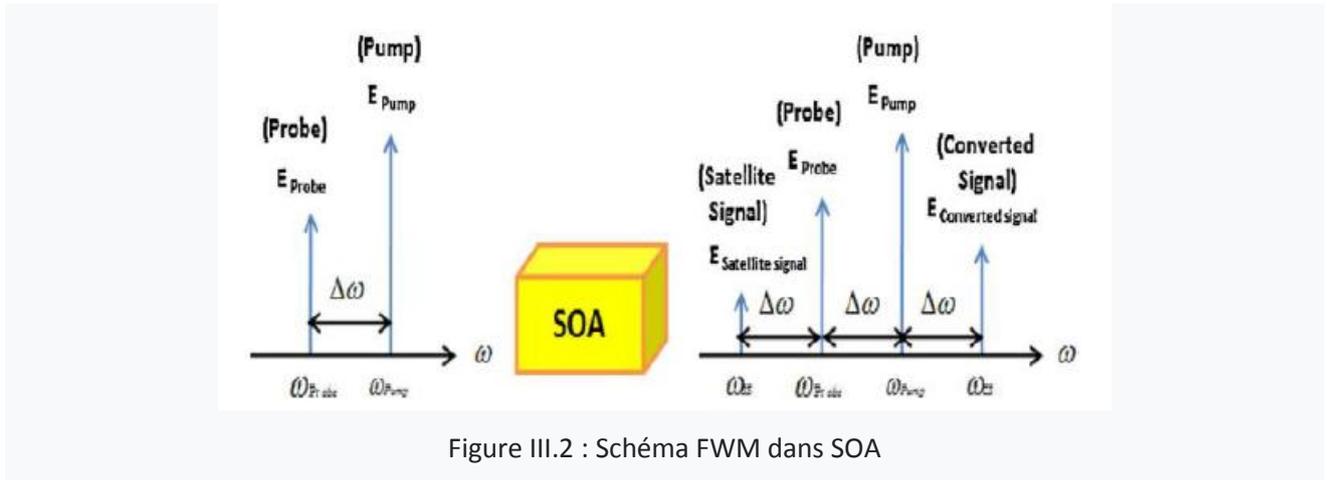


Figure III.2 : Schéma FWM dans SOA

À l'intérieur de la région active de la SOA, les coups des deux ondes Co-propagées modulent la densité de porteuse, et génère donc des réseaux dynamiques de gain et d'index.

Cette interférence non linéaire produit de nouvelles ondes ne chevauchement avec d'autres longueurs d'onde [33]. L'intensité de ces vagues nouvellement générées, connues sous le nom du signal converti E et le signal satellite E sont proportionnels au produit des intensités d'ondes en interaction. De plus, la phase et la fréquence du nouveau les vagues générées sont une combinaison linéaire de la vague présent dans le milieu actif SOA [34]. La sonde E est convertie à une longueur d'onde plus longue, signal converti en E à une fréquence optique de $\omega_{CS} = \omega_{pompe} + \Delta\omega$, par lequel $\Delta\omega$ fait référence à la fréquence de désaccord. Signal converti E est la réplique conjuguée de phase du signal d'entrée d'origine, sonde E . Augmentation du gain, de la puissance de saturation et de la porteuse le taux de récupération d'un SOA est quelques méthodes pratiques amélioration de l'efficacité de conversion d'un convertisseur de longueur d'onde FWM. [35]

$$\eta = 10 \log \frac{P_{out}(\lambda_{converted_signal})}{P_{in}(\lambda_{pump_signal})} \quad (III.11)$$

η : l'efficacité

Études sur les convertisseurs de longueur d'onde basés sur FWM utilisant des SOA ont été proposés dans de nombreux travaux antérieurs, en raison de aux nombreux avantages offerts par les non-linéarités de SOA. Par exemple D'Ottavi et al. [35] a prouvé que l'utilisation d'un SOA longue pourrait améliorer les performances de la conversion à un débit de données de 10 Gb/s. Le faisceau

assisté, qui a été utilisé pour saturer la SOA, peut améliorer l'efficacité de conversion et le rapport signal/bruit. De plus, contrairement à la plupart des techniques proposées utilisant une lumière cohérente comme source, Forsyth et al. [36] démontré dans de nouveaux travaux que le FWM dans les SOA peut être obtenu à partir d'une émission spontanée amplifiée (ASE).

III.3.1.3 Application

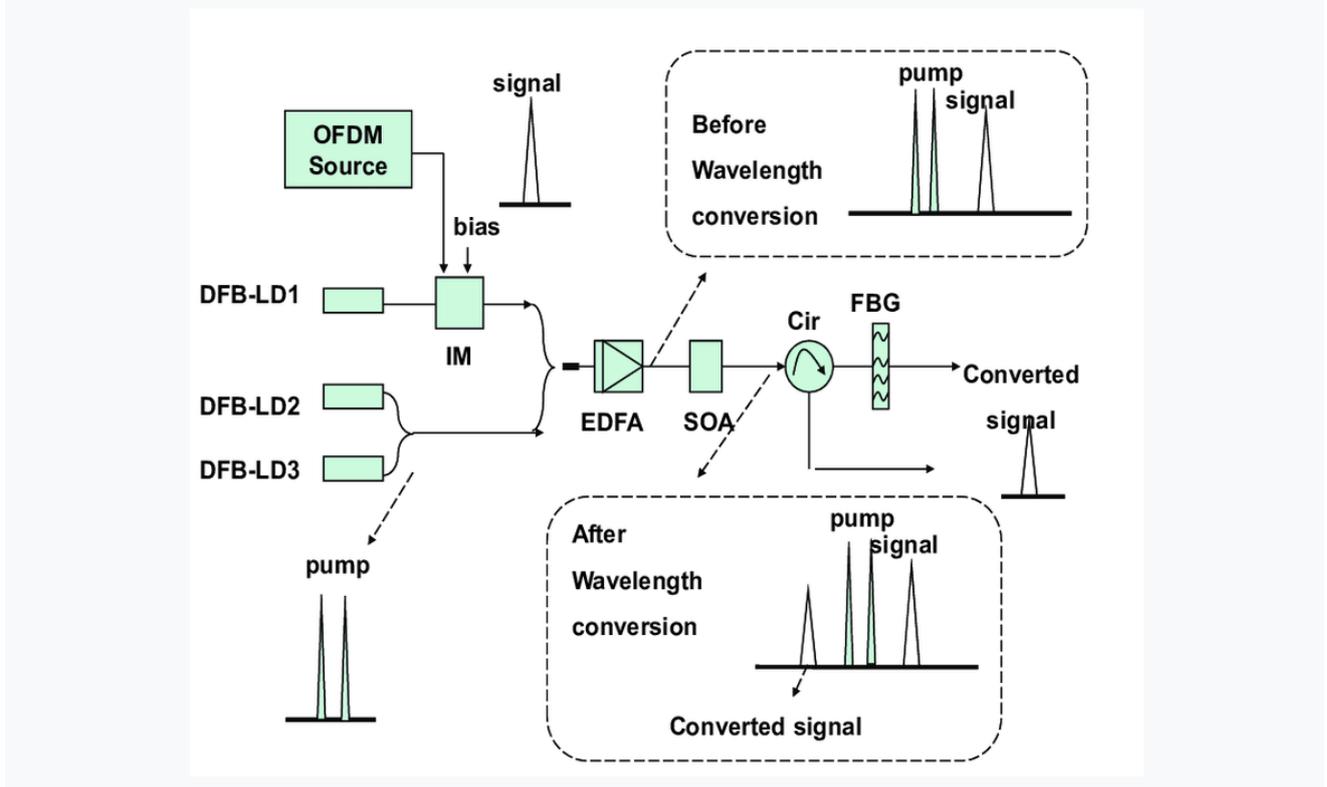


Figure III.3: Configuration expérimentale de la conversion de longueur d'onde basée sur FWM d'une source à impulsions courtes.

DFB-LD: Diode laser à rétroaction distribuée.

FBG: Réseau de Bragg en fibre.

IM: Modulateur d'intensité.

SOA: Amplificateur à semi-conducteur.

Cir: Circulateur

La Figure III.3 montre la configuration des systèmes de conversion de longueur d'onde tout optique basés sur FWM pour le signal OFDM dans un SOA. Dans le système, le signal OFDM peut être modulé sur une onde lumineuse générée à partir d'une diode laser à rétroaction distribuée (DFB-LD1) par un modulateur d'intensité externe (IM), deux pompes sont générées à partir de DFB-LD2 et DFB-LD3, le signal modulé Les ondes lumineuses de signal et les ondes lumineuses de pompage sont

couplées puis amplifiées par EDFA avant d'être injectées dans le SOA pour le processus FWM. Après conversion de longueur d'onde et filtrage optique par un circulateur et un FBG, le nouveau signal converti transporté le signal d'origine peut être obtenu.

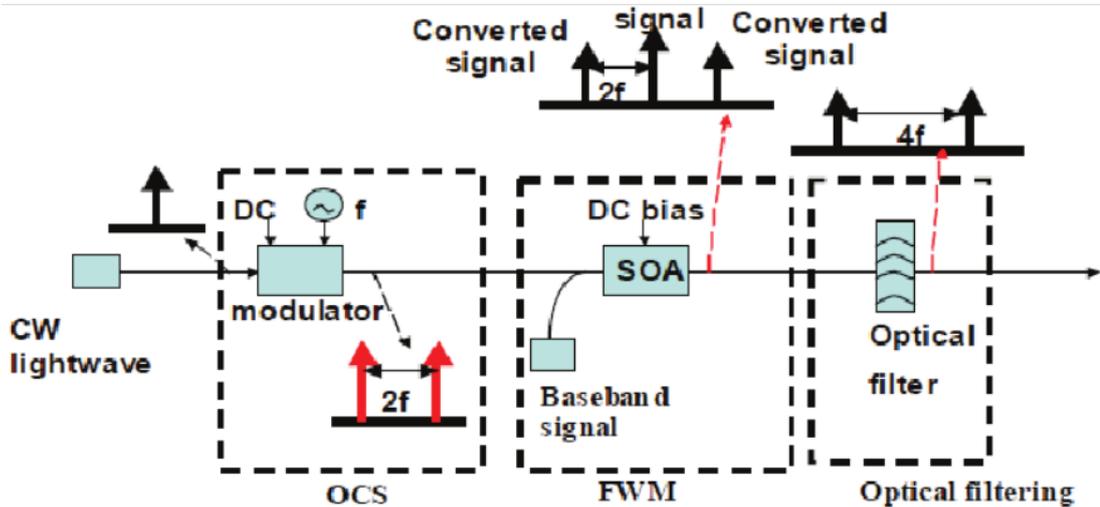


Figure III.4: Schéma de principe de la conversion ascendante tout optique Insensible à la polarisation basée sur l'effet FWM dans un SOA.

La fréquence répétitive du signal RF est f , et le courant continu de l'IM est polarisé au point nul.

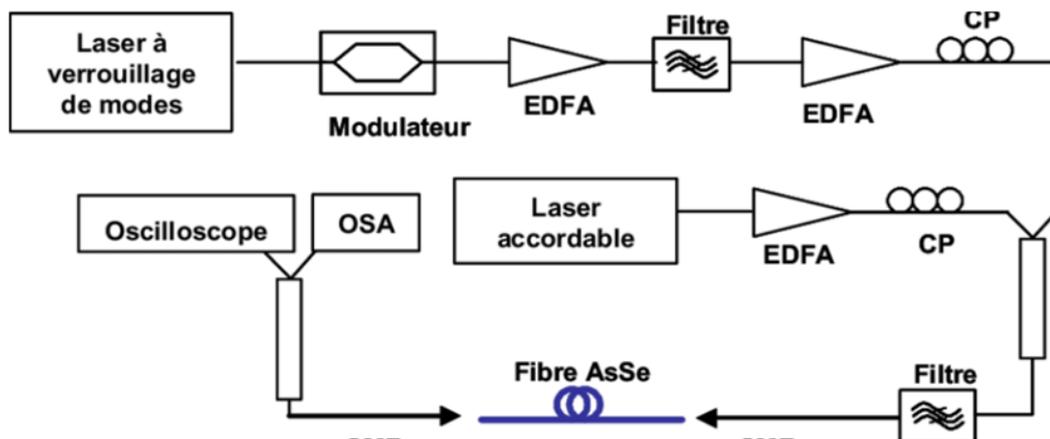


Figure III.5: Schéma de montage de l'expérience de mélange à quatre ondes.

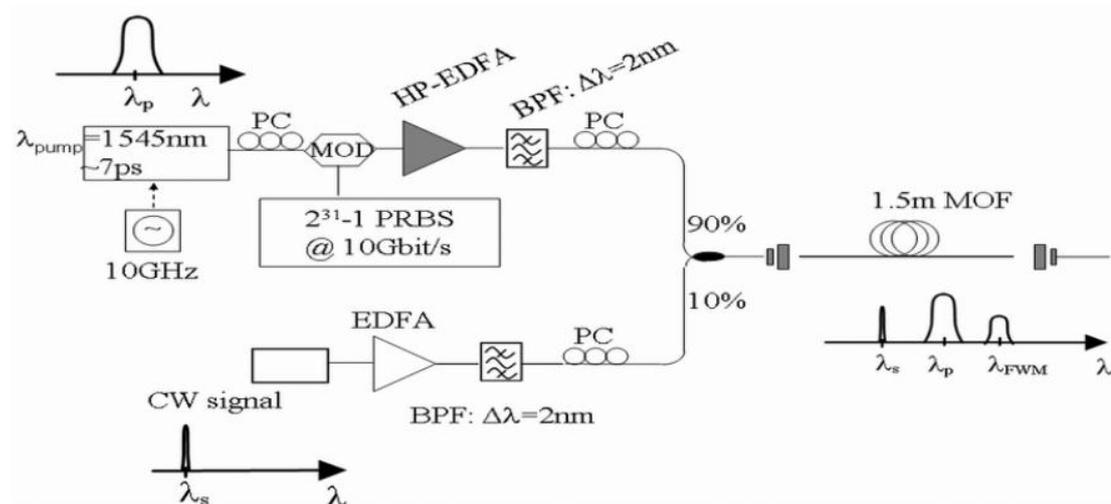


Figure III.6: Configuration expérimentale de la conversion de longueur d'onde basée sur FWM d'une source à impulsions courtes.

III.3.2 Modulation de gain croisée

III.3.2.1 Effet de modulation croisée

On peut distinguer deux types fondamentaux de modulation croisée :

- La modulation de gain croisée (XGM cross gain modulation) où l'amplitude d'entrée d'une impulsion influe principalement sur l'amplitude de sortie de l'autre [37].
- La modulation de phase croisée (XPM cross phase modulation) où la phase de l'impulsion d'entrée influe principalement sur la phase de sortie de l'autre [38].

Il est bien sûr possible d'observer des comportements plus complexes où les deux phénomènes se produisent conjointement ou encore des cas où l'un des paramètres de la première impulsion (l'amplitude par exemple) influera sur un paramètre distinct de la seconde (sa phase par exemple). La complexité des effets de modulation croisée augmentera avec le nombre d'impulsions distinctes injectées dans le composant. Dans le cadre d'application simple de type amplification, ces phénomènes peuvent se révéler néfaste [39], mais ils offrent aussi la possibilité de manipuler les signaux télécoms et donc de réaliser des fonctions réservées initialement aux composants électroniques. Dans cette partie nous allons parler de la conversion de la première type de modulation (modulation à gain croisée XGM)

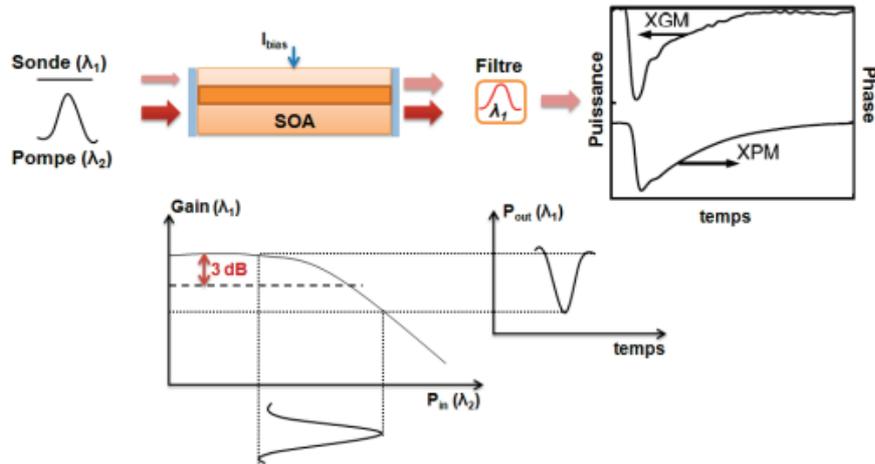


Figure III.1 Effets XGM et XPM dans le SOA.

III.3.2.2 Conversion XGM

III.3.2.2.1 Définition

Un convertisseur de longueur d'onde tout optique est un appareil qui transfère des informations d'une longueur d'onde à une autre sans entrer dans le domaine électrique. Une technique simple pour la réalisation de cette fonction est l'utilisation de la modulation de gain croisé (XGM) dans les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA). L'effet XGM consiste en la variation du gain SOA en fonction de la puissance d'entrée. L'augmentation de la puissance du signal d'entrée provoque dans le SOA un appauvrissement de la densité de porteuse, et donc le gain d'amplification est réduit. Les processus dynamiques qui ont lieu dans la densité de porteuses de la SOA sont très rapides, de l'ordre de la picoseconde, il est donc possible d'utiliser cette variation sur le gain avec des fluctuations bit à bit de la puissance d'entrée. [40]

III.3.2.2.2 Principe de fonctionnement

Le phénomène XGM se résume par la modulation du gain d'un signal optique (sonde) se propageant dans le milieu actif, due à la propagation d'un autre signal optique (pompe) en même temps dans le même milieu. La Figure III.3 montre le principe de base de conversion de longueur d'onde par cet effet XGM. Cette technique simple à mettre en œuvre a permis la conversion à des débits de 10 Gbit/s, de 20 Gbit/s, de 40 Gbit/s et de 100 Gbit/s avec deux composants optimisés d'une longueur totale de 2 mm. Le taux d'extinction, défini par le rapport du niveau haut sur le niveau bas du signal transposé à la sortie du SOA, est faible dans cette méthode. Il s'améliore quand la pompe passe d'une puissance faible à la limite de la saturation à une puissance forte ou lors de la conversion vers

les courtes longueurs d'onde. Différentes configurations ont été proposées pour améliorer le taux d'extinction avec un SOA long et par la mise en cascade de deux montages de conversion par XGM. Cette dernière topologie permet de réaliser la conversion par XGM sans inversion du signal. Cependant, le taux d'extinction est réduit et cette méthode nécessite l'emploi d'un préamplificateur entre les deux étages de conversion.

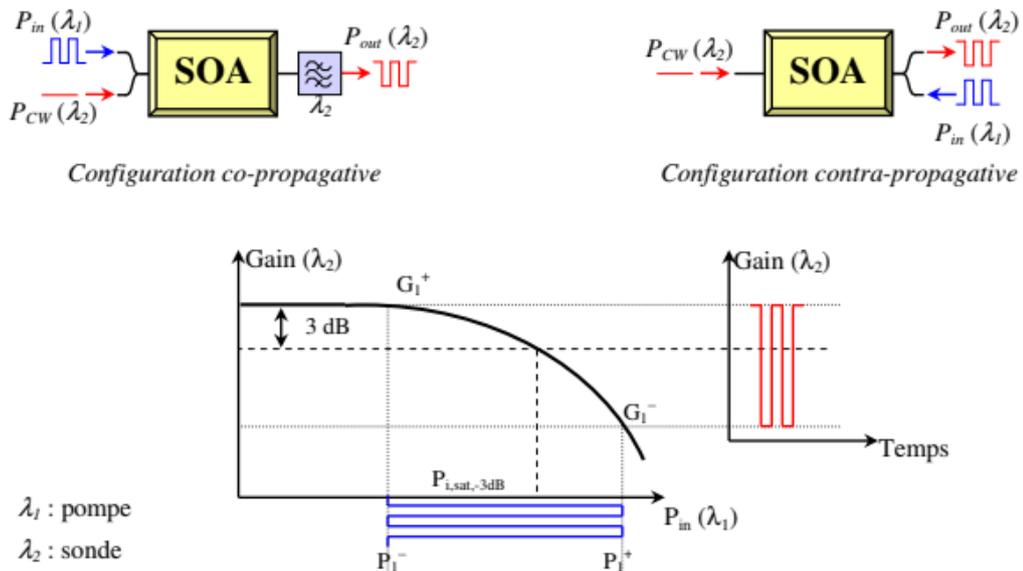


Figure III.2 Montages et principe de conversion de longueur d'onde par la modulation croisée du gain (XGM) dans un SOA.

En plus de la conversion de longueur d'onde, l'effet XGM dans le SOA peut être exploité pour réaliser d'autres applications comme, par exemple, la commutation tout-optique de signaux à haut débit de 100 Gbit/s. Dans cette méthode, le temps de commutation intrinsèque du SOA est directement lié à la durée de vie des porteurs dans sa zone active. Le XGM a aussi été utilisé pour réaliser des portes logiques, des mémoires optiques, la récupération d'horloge, le routage de signaux, et une triode tout-optique.

Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié deux effets optiques non linéaires qui sont la base de la conversion de la longueur d'onde. La modulation de gain croisée et l'amplificateur optique à base de semi conducteur. Le chapitre suivant fera l'objet sur la partie simulations et interprétations des résultats

CHAPITRE IV :
SIMULATION ET
COMPARAISON DES
RÉSULTATS

IV.1 Introduction

Ce chapitre consiste à étudier la conversion de la longueur d'onde d'un amplificateur SOA. Pour cela on va diviser le travail en deux parties, une pour les trois types d'amplification (EDFA, RAMAN, SOA), la seconde pour la conversion de la longueur d'ondes (FWM, XGM).

IV.2 Logiciel Optisystem

IV.2.1 Présentation du logiciel OptiSystem

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

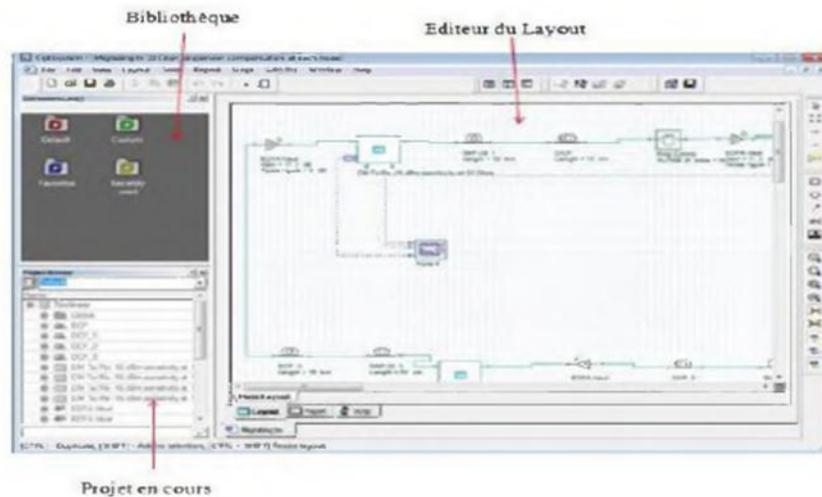


Figure IV.1 : Schéma de l'interface OptiSystem

IV.2.2 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la Bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.

- La bibliothèque des composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, il s'intègre aux équipements de test et de mesurer des différents fournisseurs.
- Les outils de visualisation avancée produisent le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, la constellation, les schémas et beaucoup plus.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire sur le moniteur au même port

IV.2.3 Applications d'Optisystem

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

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

IV.2.4 Avantage du logiciel OptiSystem

Les avantages du logiciel OptiSystem sont:

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

IV.3 Simulations

IV.3.1 Amplification optique

IV.3.1.1 Amplificateur EDFA

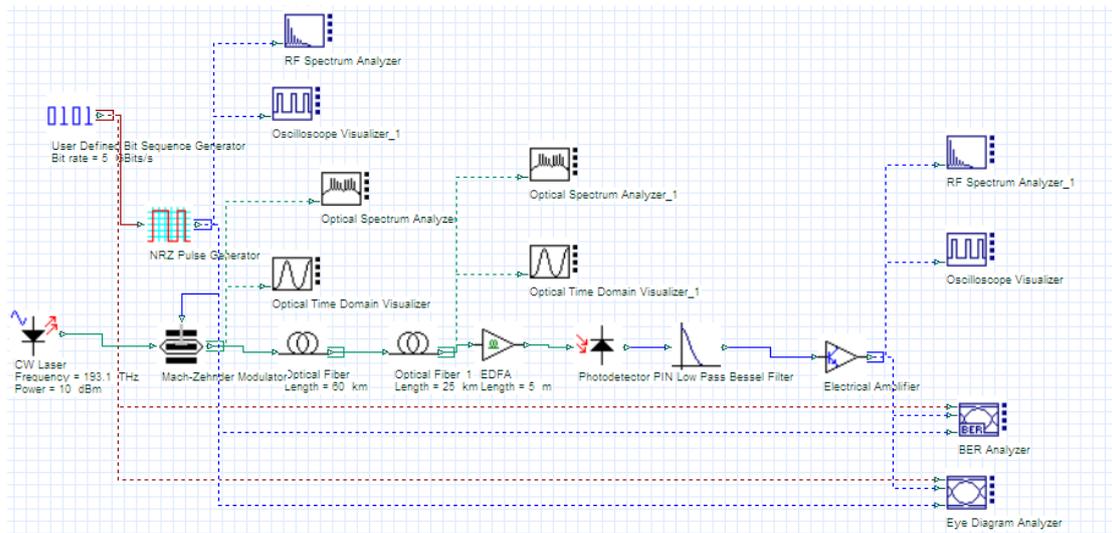


Figure IV.2 : Schéma d'un émetteur/récepteur utilisant un amplificateur EDFA

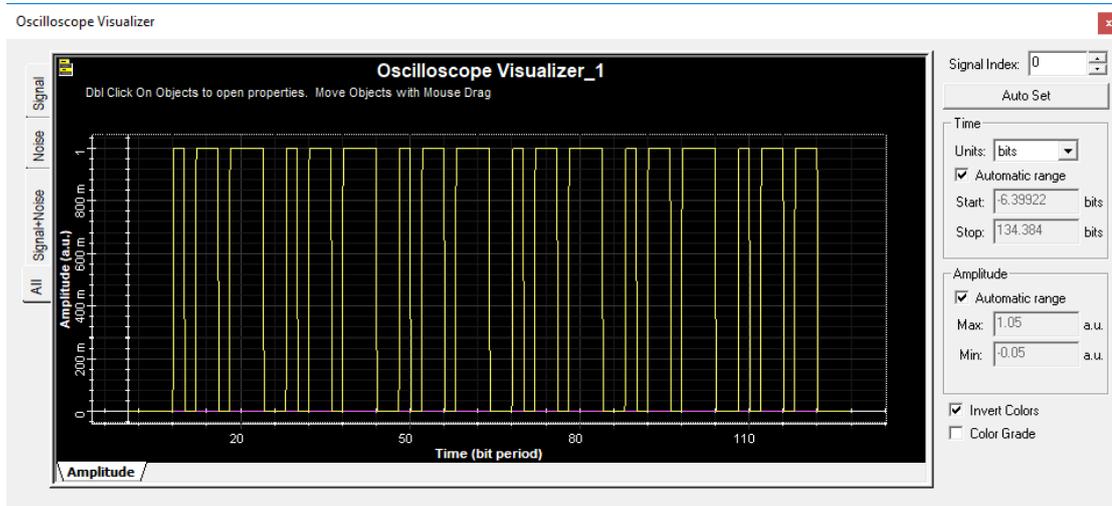


Figure IV.3 : Débit binaire au niveau de l'émetteur

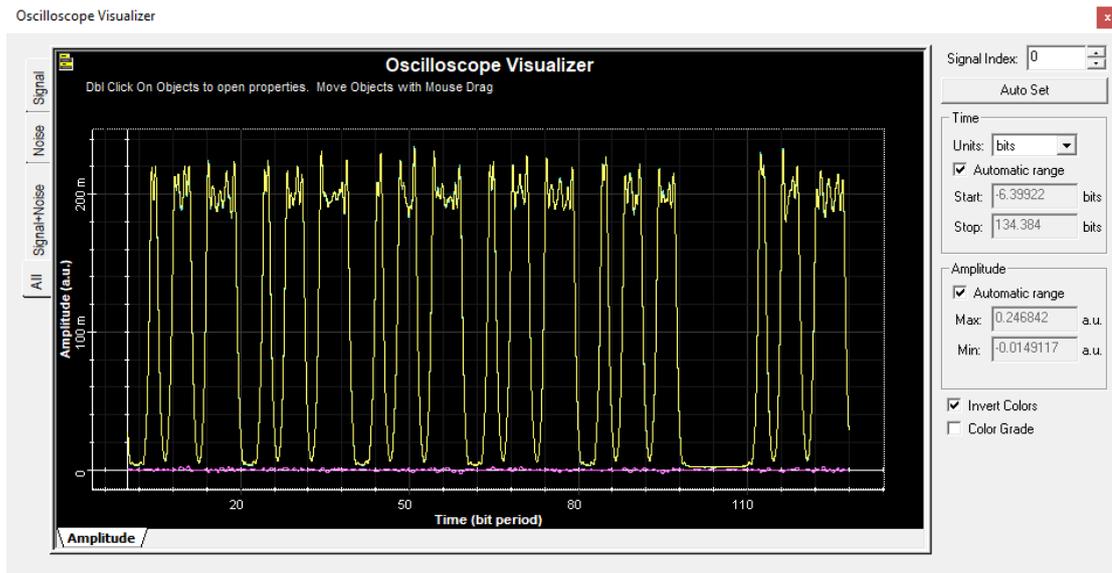


Figure IV.4: Débit binaire au niveau du récepteur

Les deux figures montrent le débit binaire au niveau de l'émetteur et le récepteur on peut voir que le récepteur arrive à distinguer les bits « 1 » et les bits « 0 ». Il y a une diminution de l'amplitude du signal au niveau du récepteur (dégradation du signal). À cause de l'atténuation et la dispersion et le bruit introduit par les composantes.

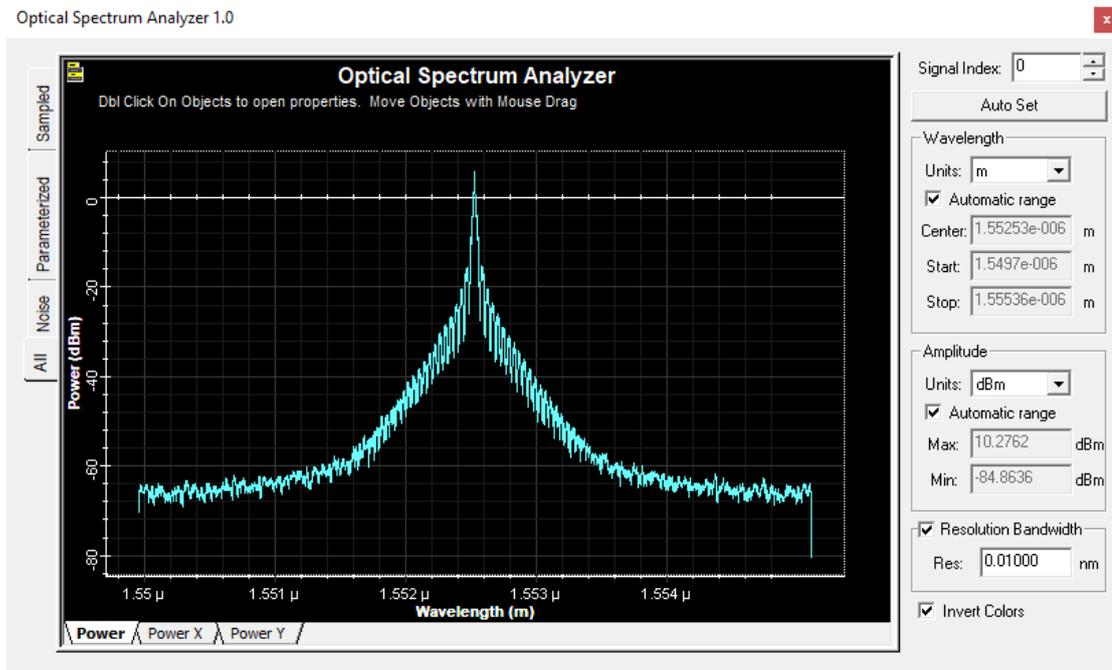


Figure IV.5 : Spectre optique après modulateur Mach-Zehnder

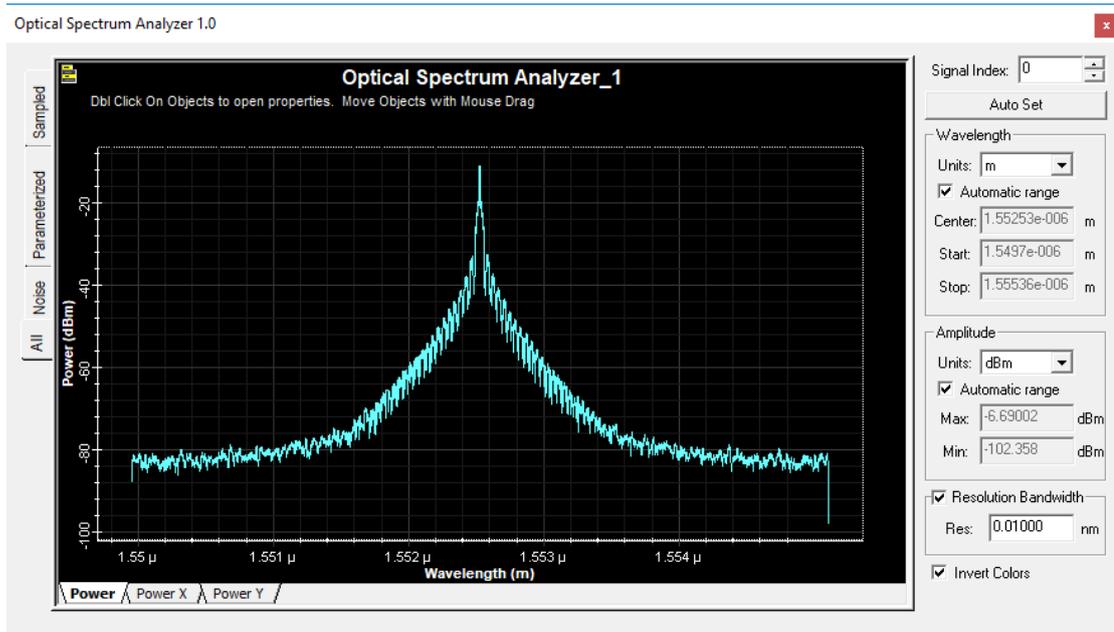


Figure IV.6 : Spectre optique après propagation dans la fibre optique

Il y a une dégradation du signal à cause de l'atténuation.

IV.3.1.2 Amplificateur RAMAN

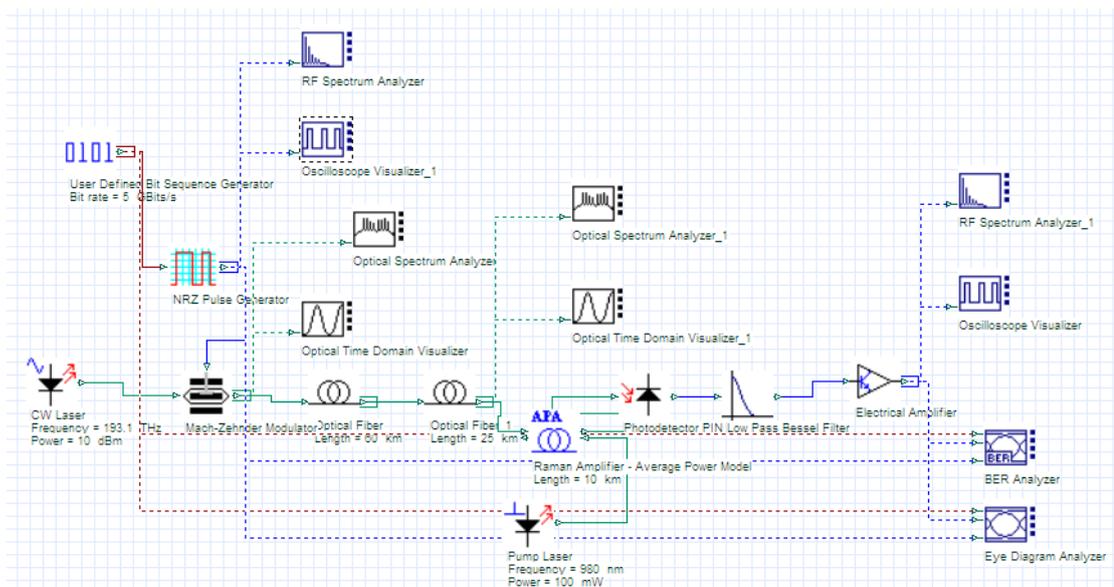


Figure IV.7 : Schéma d'un émetteur/récepteur utilisant un amplificateur Raman

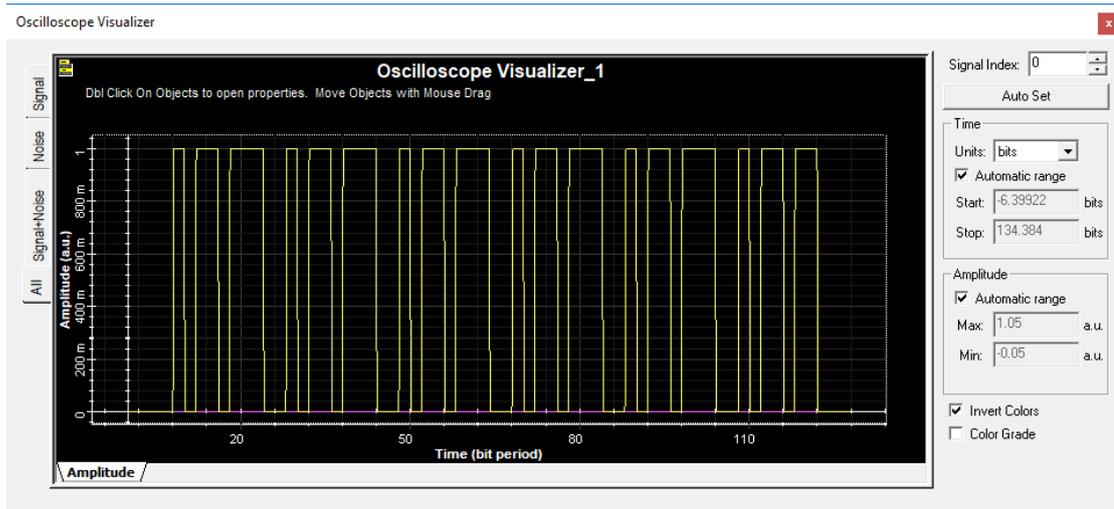


Figure IV.8 : Débit binaire au niveau de l'émetteur

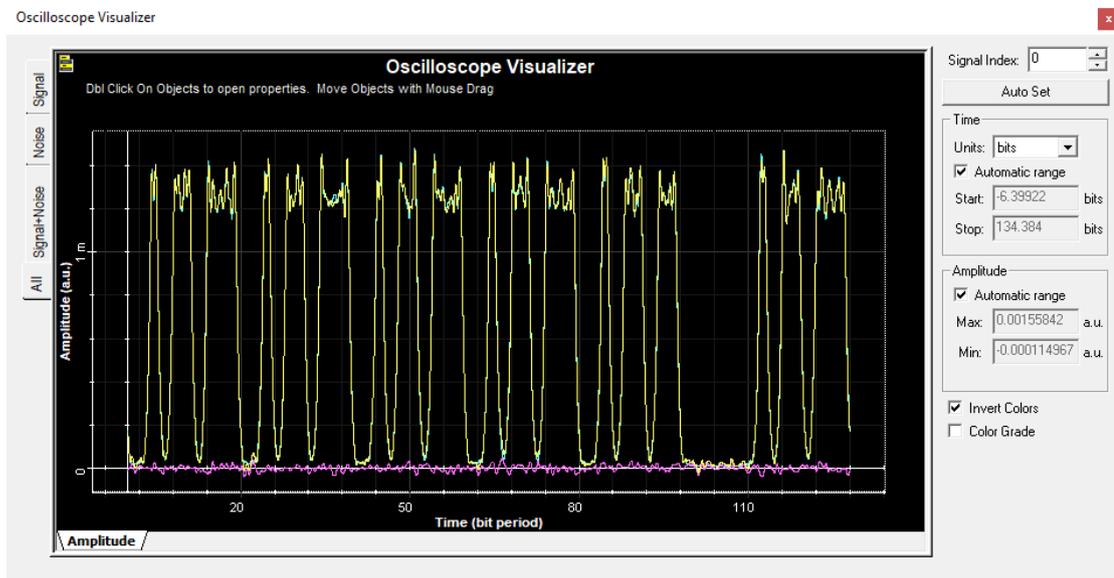


Figure IV.9 : Débit binaire au niveau du récepteur

Après, simulation avec l'amplificateur Raman on voit clairement que le signal de sortie à beaucoup dégrader par rapport à l'amplificateur EDFA.

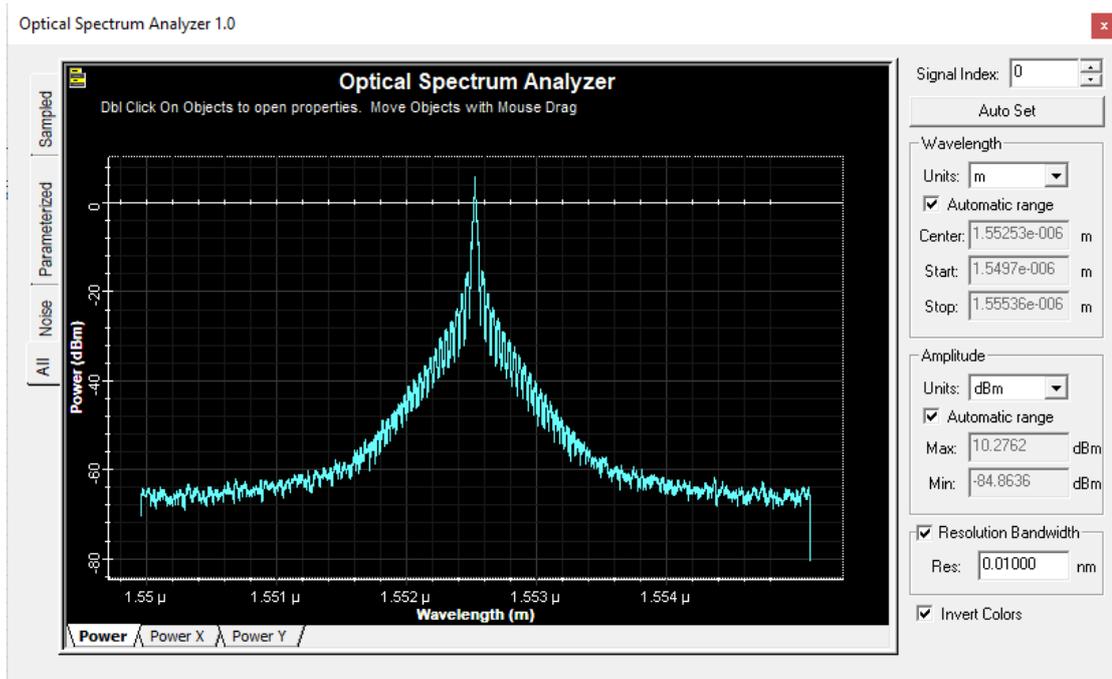


Figure IV.10 : Spectre optique après modulateur Mach-Zehnder

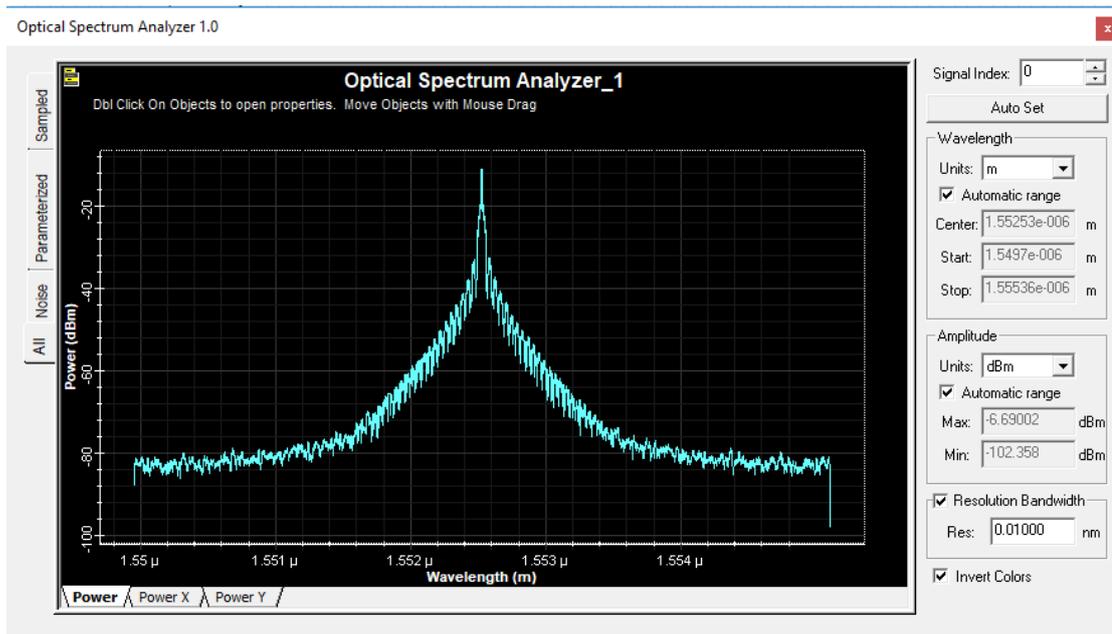


Figure IV.11 : Spectre optique après modulateur propagation dans la fibre optique

Le spectre optique au niveau du modulateur Mach-Zehnder reste inchangé pour les deux types d'amplificateurs.

IV.3.1.3 Amplificateur SOA

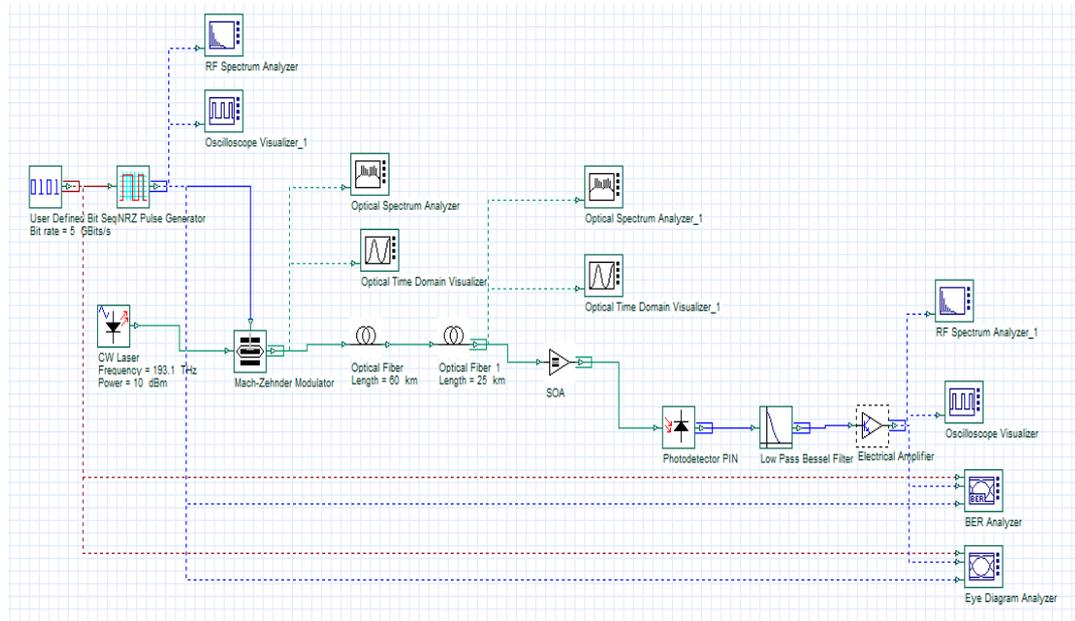


Figure IV.12 : Schéma d'un émetteur/récepteur utilisant un amplificateur SOA

Dans la troisième simulation on garde le même schéma précédent on remplace juste l'amplificateur Raman par l'amplificateur à semi-conducteur.

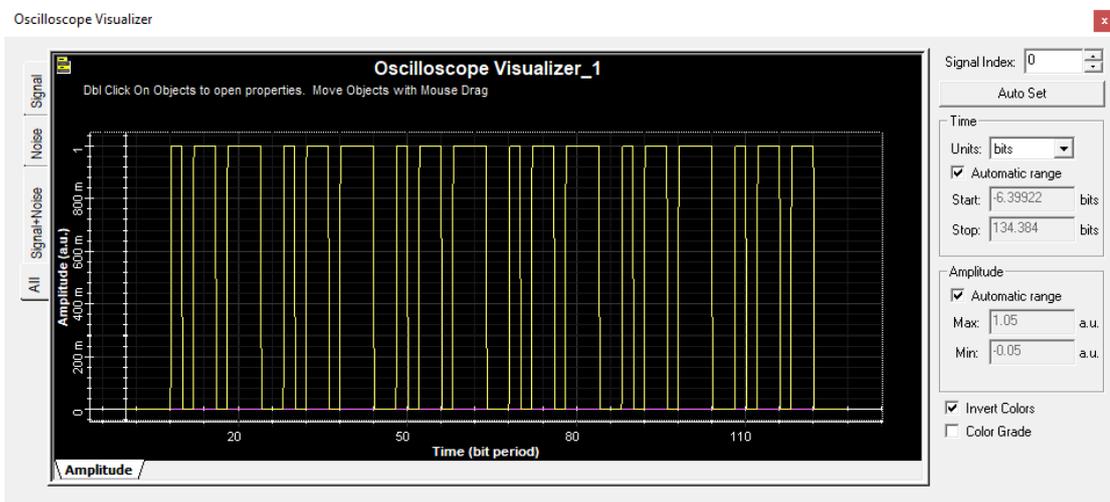


Figure IV.13 : Débit binaire au niveau de l'émetteur

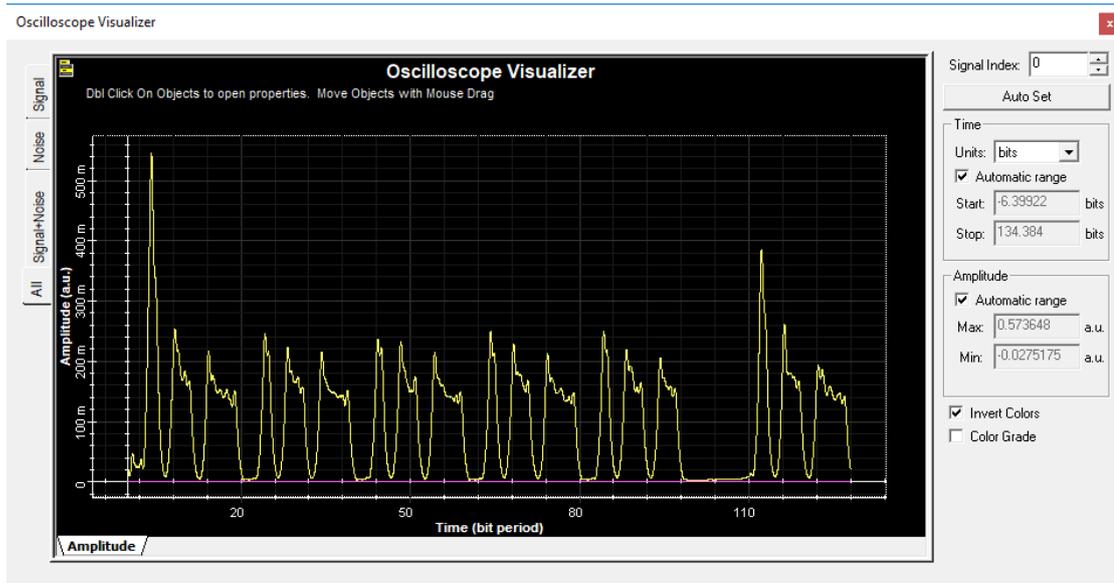


Figure IV.14 : Débit binaire au niveau du récepteur

Après simulation, on voit bien que le signal de récepteur semble très clair au signal de l'émetteur. L'atténuation du signal est améliorée par rapport au précédent. On peut faire la différence facilement entre les bits « 1 » et « 0 » clairement par rapport aux amplificateurs EDFA.

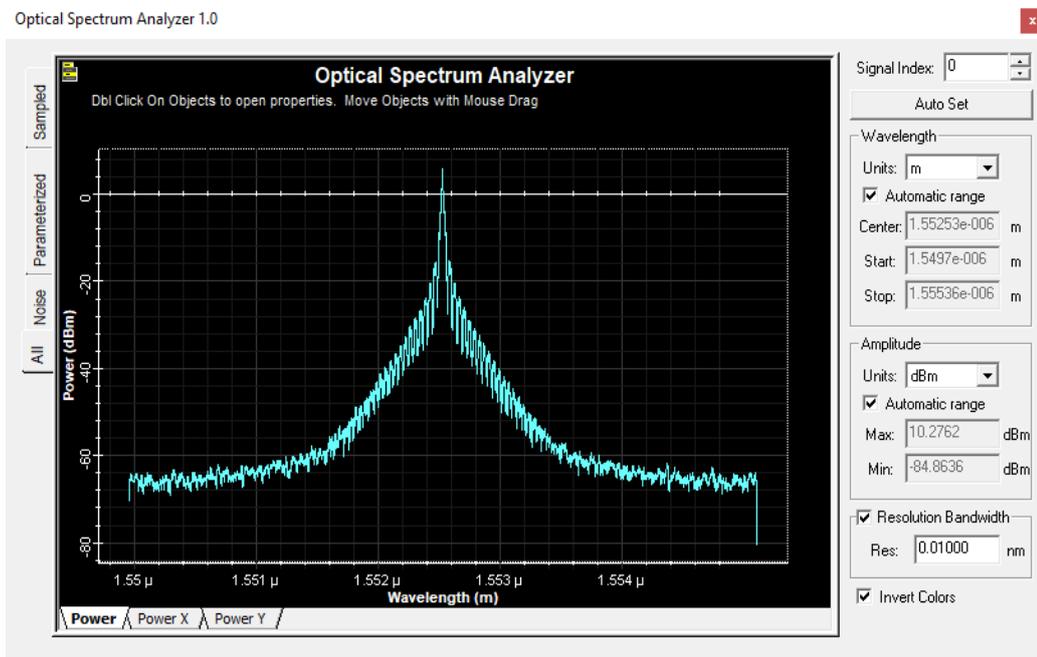


Figure IV.15 : Spectre optique après modulateur Mach-Zehnder

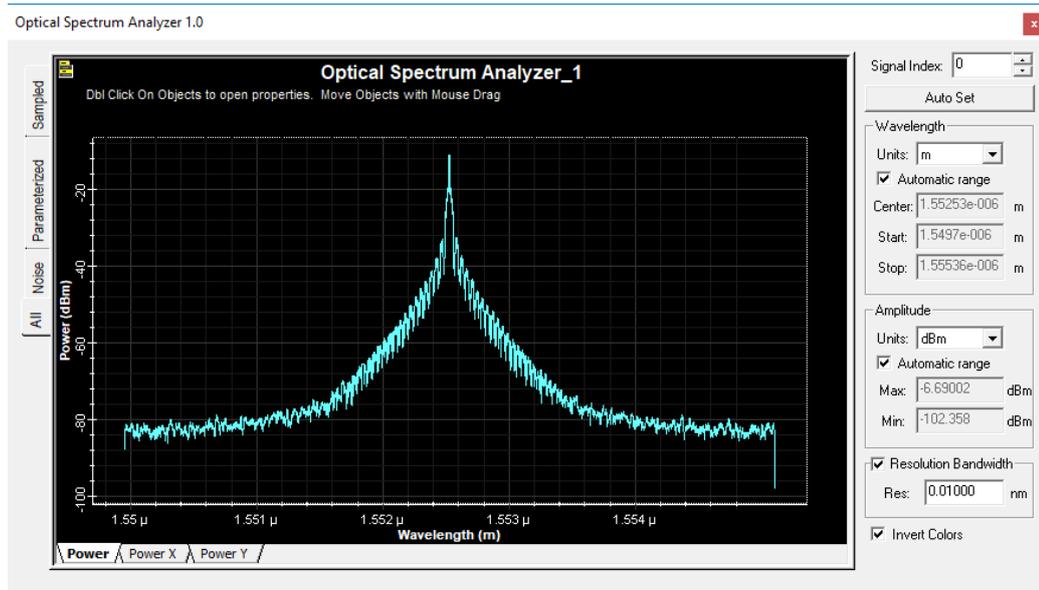


Figure IV.16 : Spectre optique après modulateur propagation dans la fibre optique

Le spectre optique après modulateur optique et après propagation dans la fibre reste le même pour les trois types d'amplificateur EDFA, Raman et SOA.

IV.3.2 Conversion de la longueur d'onde

IV.3.2.1 Conversion utilisant le mélange à quatre ondes FWM

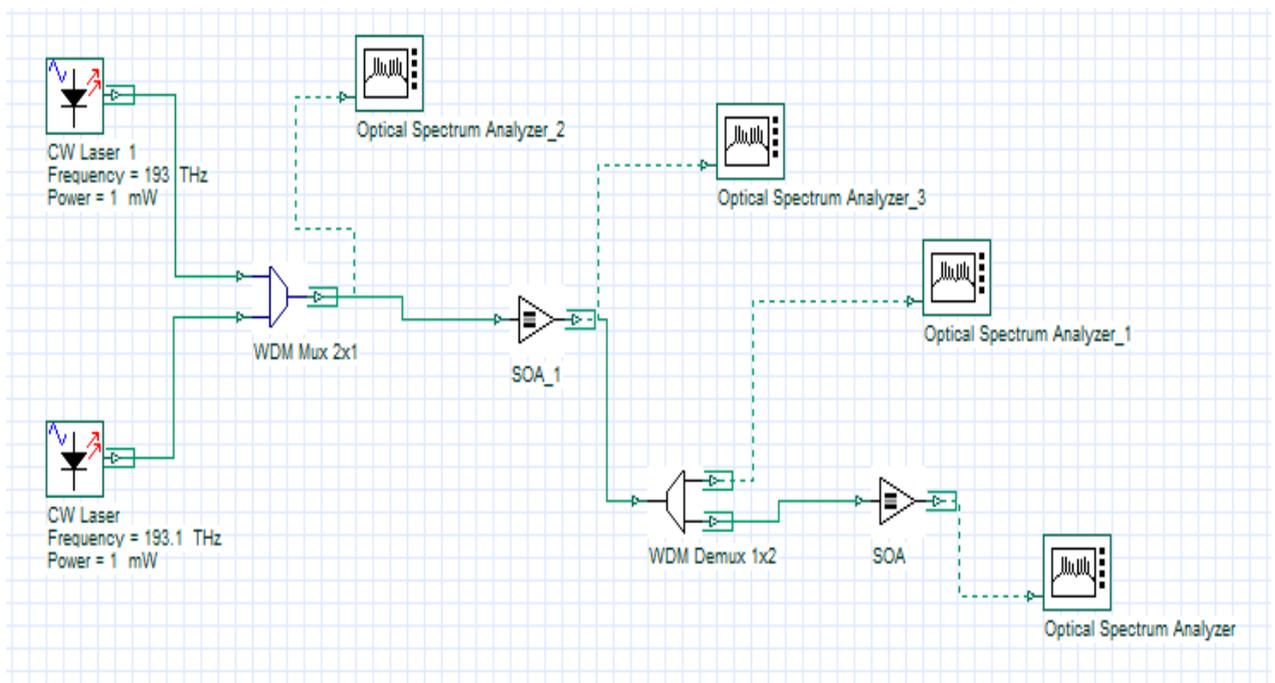


Figure IV.17 : Schéma d'un convertisseur de longueurs d'onde FWM

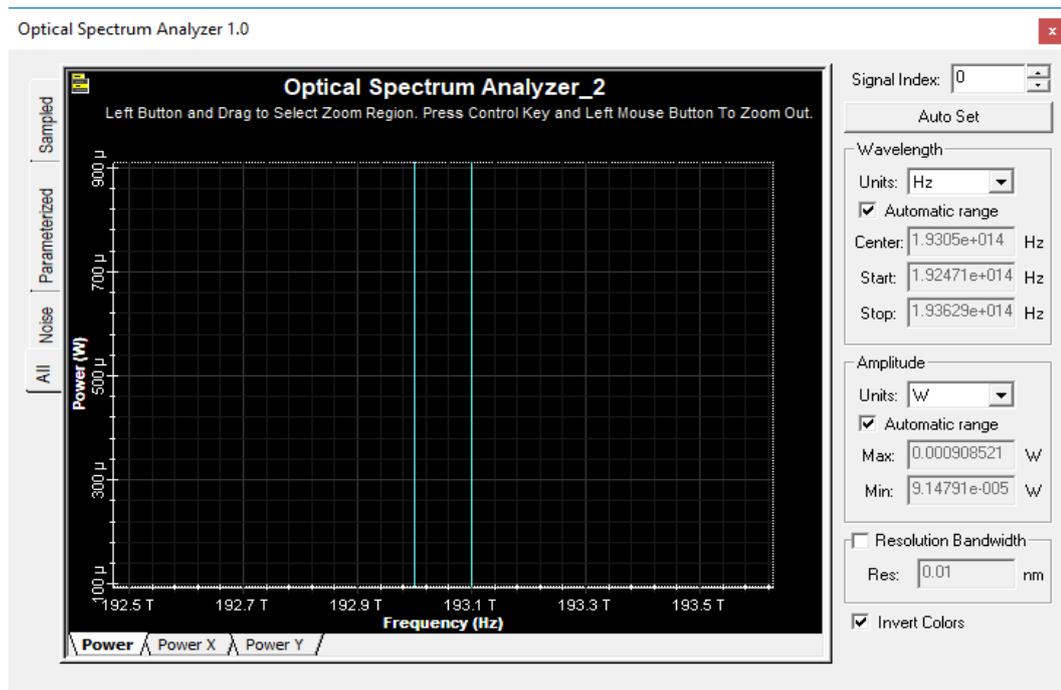


Figure IV.18 : Spectre optique à la sortie du multiplexeur

La figure IV.18 représente le spectre optique en fonction de la fréquence à la sortie du multiplexeur.

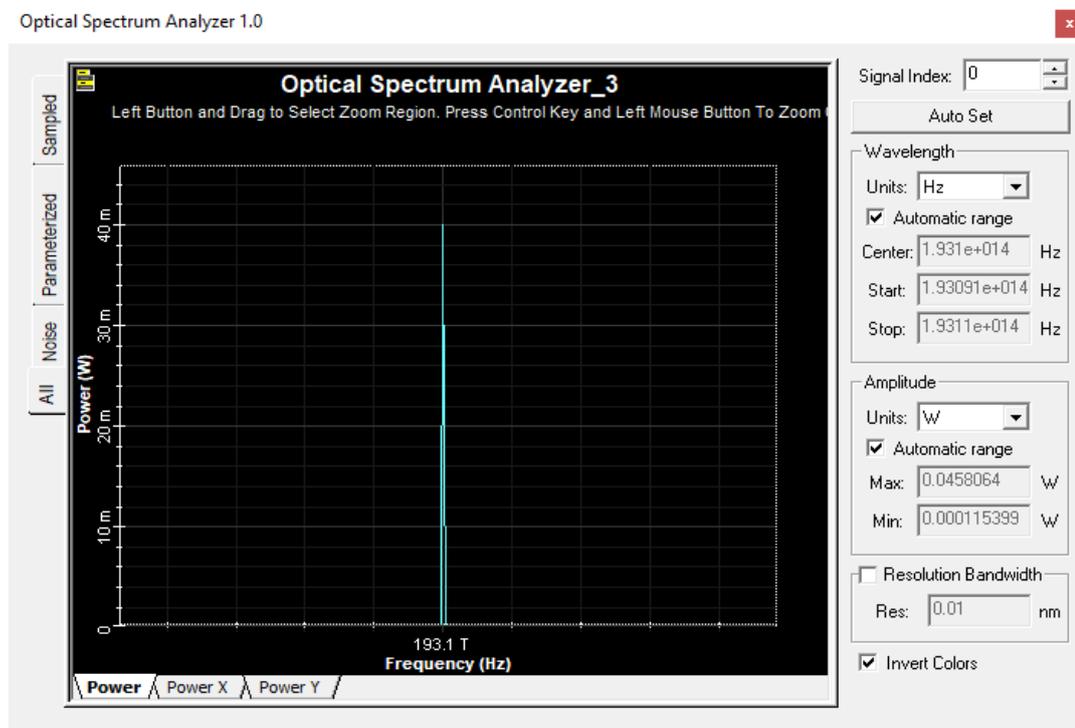


Figure IV.19 : Spectre optique à la sortie du SOA

La figure IV.19 montre le signal amélioré à 193,1THz. La puissance du signal est comparable au signal CW initial à 192,925THz ou 193,1THz après amplification.

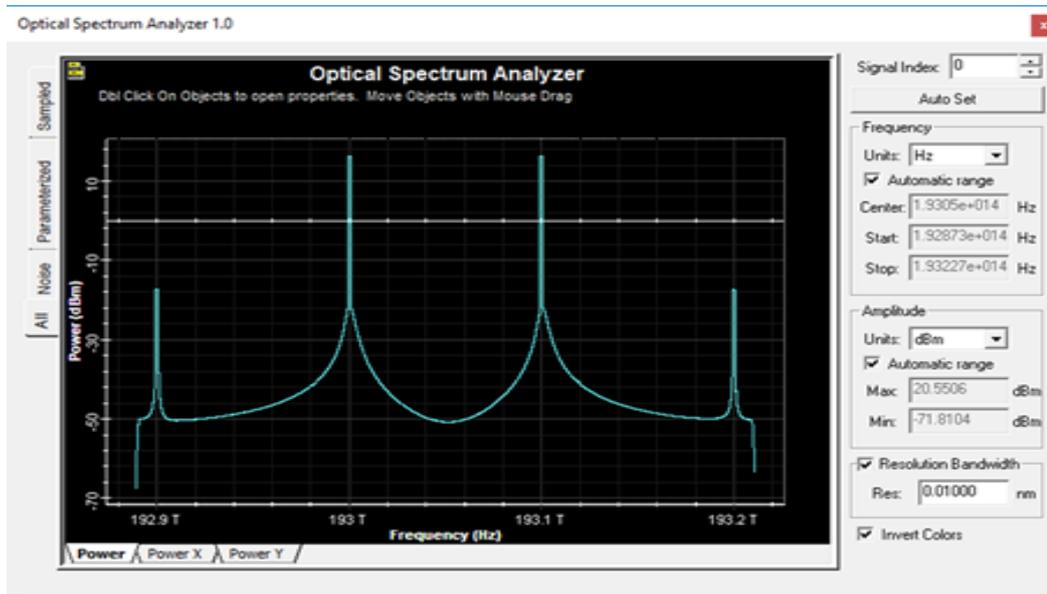


Figure IV.20 :La création de quatre longueurs d’ondes

Sur laFigure IV.20 nous pouvons voir la puissance générée à partir des nouvelles fréquences FWM à 192,9 THz et 193,2 THz respectivement

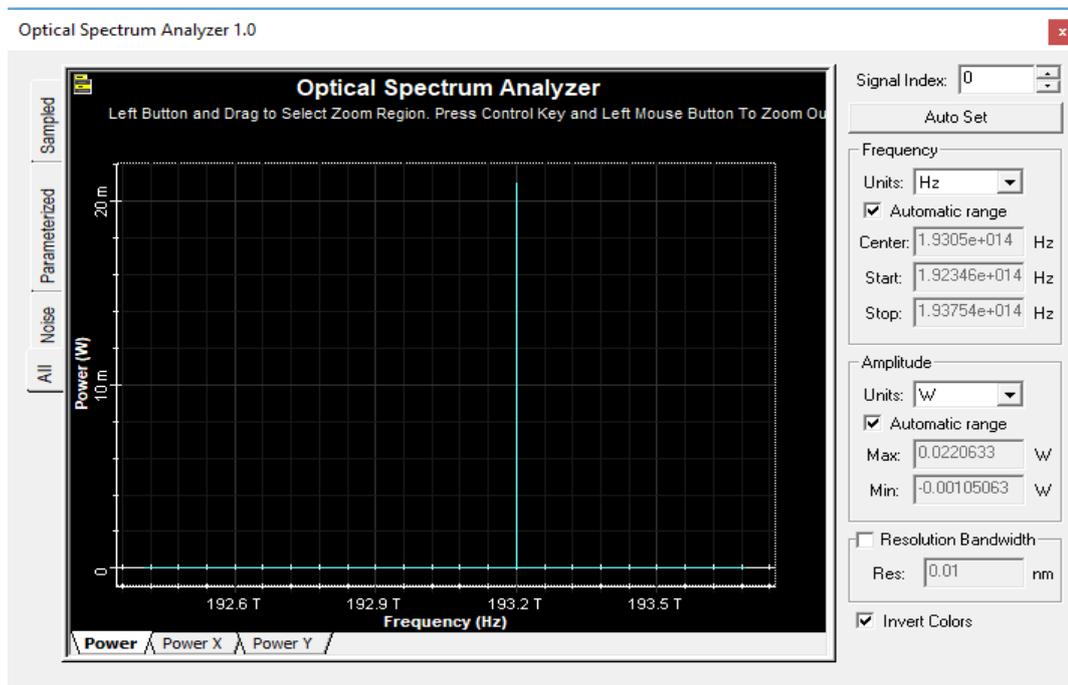


Figure IV.21 : Spectre optique à la sortie du démultiplexeur

La figure IV.21 le spectre optique en fonction de la fréquence à la sortie du démultiplexeur. La puissance du signal est comparable. Deux nouvelles fréquences à 192,6THz et 193,5THz sont générés et placés respectivement sur le côté gauche de 193THz et sur le côté droit de 193,2THz. Le placement de ces fréquences dans le plan de fréquence. DEMUX 1x2 sépare les fréquences en 193,2THz et 193,5 THz.

IV.3.2.2 Conversion utilisant la modulation de gain croisée XGM

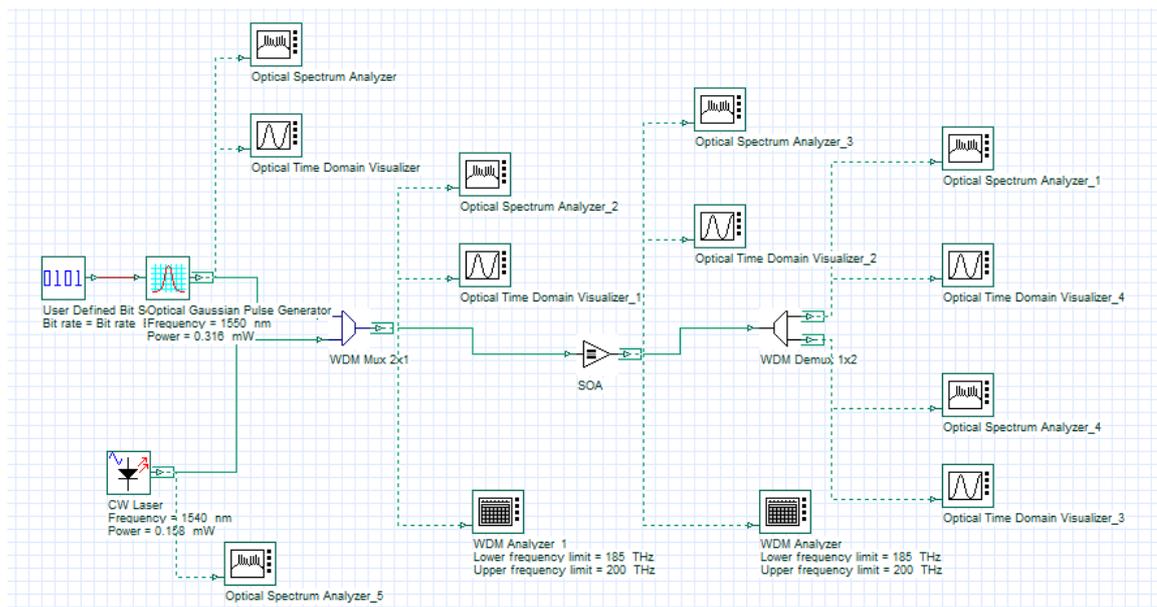


Figure IV.22 : Schéma d'un convertisseur de longueurs d'onde XGM

Le signal d'entrée modulé en intensité et un signal CW ont des longueurs d'onde porteuses de 1550 et 1540 nm (ou une séparation de fréquence) et des puissances de 0,316 mW et 0,158 mW (sans largeurs de ligne, phases initiales et polarisations). Les signaux sont multiplexés à l'aide de WDM Mux 2x1 et lancés en SOA.

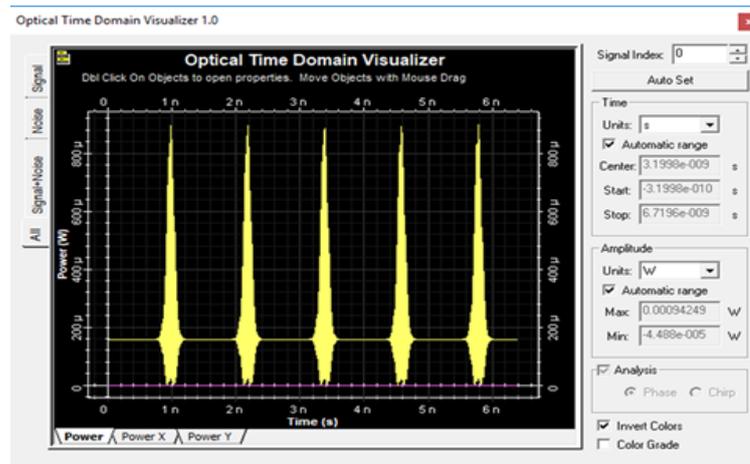


Figure IV.23 : Représentation temporelle optique à la sortie du multiplexeur

La figure IV.23 représente l'amplitude du signal en fonction de la fréquence à la sortie du multiplexeur. Le signal d'entrée modulé en intensité est un signal CW ont des longueurs d'onde porteuses de 1550 et 1540 nm (ou une séparation de fréquence).

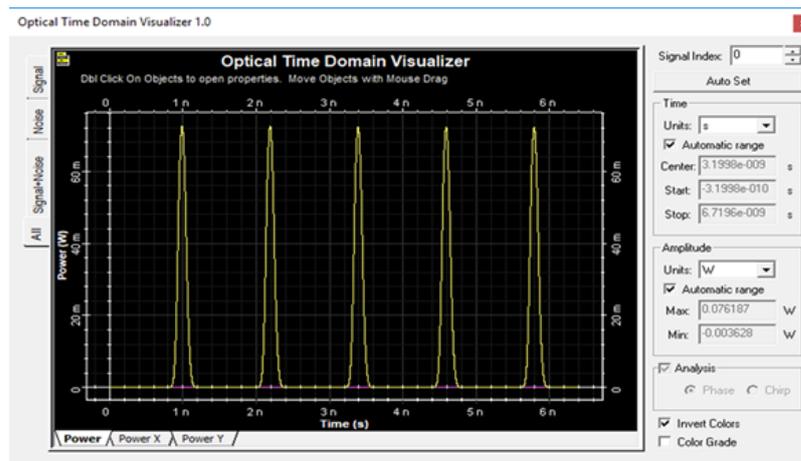


Figure IV.24 : Représentation temporelle optique à la sortie du démultiplexeur

Le signal amplifié passé à travers le démultiplexeur, qui a des propriétés similaires au multiplexeur. La Figure IV.24 montre la forme et le spectre du signal à $\lambda = 1550$ nm après le démultiplexeur.

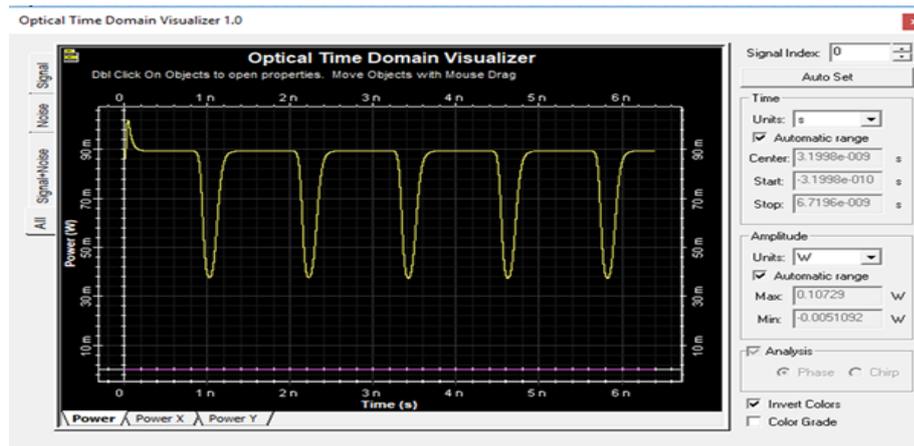


Figure IV.25 : Représentation temporelle optique à la sortie du démultiplexeur

La figure IV.25 montre la forme et le spectre du signal à $\lambda = 1550$ nm après le démultiplexeur.

L'inversion du signal est clairement visible

IV.4 Conclusion

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

La conversion de longueur d'onde basée sur le mélange à quatre ondes (FWM) et la modulation à gain croisé (XGM) dans une structure SOA on a une faible puissance d'entrée il y a une séparation de fréquence. Dans le FWM, le battement entre deux longueurs d'onde module la phase de l'un des canaux générant ainsi des nouvelles fréquences.

L'effet XGM consiste en la variation du gain SOA en fonction de la puissance d'entrée

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Notre travail a été porté sur la conversion de la longueur d'onde. Au premier temps, on a commencé par les amplificateurs optiques dopés en erbium. Puis, les amplificateurs Raman. Enfin, les amplificateurs à base de semi-conducteur. Les simulations montrent que l'amplificateur Raman apporte beaucoup d'avantages par rapport aux autres amplificateurs. Mais, les amplificateurs à base de semi-conducteurs sont faciles et compacts pour les utilisations que les amplificateurs dopés erbium.

On a étudié quelques effets non linéaires élastiques (effet Kerr) dans les fibres optiques et la conversion de la longueur d'onde dans les amplificateurs SOA.

Les résultats de la simulation sont présentés pour déterminer les performances de conversion de la longueur d'onde sur la base de SOA-FWM et SOA-XGM. Le mélange à quatre ondes (FWM) est un effet non linéaire de troisième ordre généré, comme l'auto modulation de phase et la modulation de phase croisée, par la dépendance de l'indice de réfraction des fibres avec l'intensité. Dans le FWM, le battement entre deux longueurs d'onde module la phase de l'un des canaux générant ainsi des nouvelles fréquences. Quand trois ondes aux fréquences. SOA FWM peut être obtenu à partir d'une émission spontanée amplifiée (ASE).

Le convertisseur de longueur d'onde XGM qui est simplement composé d'un SOA a l'inconvénient que le signal de sortie converti en longueur d'onde est inversé avec un grand chip. L'effet XGM consiste en la variation du gain SOA en fonction de la puissance d'entrée. L'augmentation de la puissance du signal d'entrée provoque dans le SOA un épuisement de la densité de porteuses, et donc le gain d'amplification est réduit. La saturation du gain peut être simplement utilisée pour XGM en transmettant ensemble deux signaux optiques différents via l'amplificateur optique à semi-conducteur. Deux signaux de données d'entrée sont couplés au SOA : un signal d'onde continue de faible puissance et un signal pulsé, tous deux à des longueurs d'onde différentes.

Lorsque la puissance de la lumière de pompage est autant que celle de la lumière des signaux d'entrée dans cette condition, l'effet FWM et l'effet XGM apparaissent évidemment en même temps et les formats de modulation de la lumière de pompage et du signal lumineux converti sont inversés par rapport à celui du signal lumineux.

La conversion de longueur d'onde à l'aide d'amplificateurs optiques à semi-conducteurs est l'un des sujets de recherche en télécommunications optiques qui se développe le plus intensément.

Glossaire

SOA : Semi-conducteur Optical amplifier SOA

EDFA : Amplificateur à Fibre Dopée à l'Erbium (Erbium Doped Fiber amplifier)

MQW : Multi-puits quantiques

NRZ : Non Retour à Zéro

ASE : Émission spontanée amplifiée

DRS : Diffusion Double Rayleigh

FWHM: Largeur à mi-hauteur (full width at half maximum)

OSNR: Optical-to-Signal-to-Noise-Ratio

WDM: Wavelength-Division Multiplexing

FWM: Four-Wave Mixing

XGM: Cross-Gain Modulation

DCF: Dispersion Compensating Fiber

MZI: Mach-Zehnder Interferometer

OTDR: Optical Time Domain Reflectometer

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. J. Koestner, E. A. Snitzer "Amplification in a fiber laser", Applied Optics, Vol. 3, 1964
- [2] M. Pierre locoy, Livre Télécoms sur fibre optiques, lavoisier 2008
- [3] R. J. Mears, L. Reekie, M. Jauncey, and D. N. Payne, "Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm ", Electron. Lett 26, 1026 (1987)
- [4] K.Merzouk, « Etude d'un system bas cout de transmission optique par multiplexage temporel », HAL archives ouvertes 2009.
- [5] E. Desurvire "Erbium-Dopé Fibre Amplifier: principales and applications", A Wiley Inter-science Publication, 1994.
- [6] M .Baghriche et S. Sabeur, Caractérisation de Fibres dopées Terres Rares », Rapport de stage tuteuré en laboratoire, Université Nice Sophia-Antipolis 2014.
- [7] F.Mdjoub, « optimisation par la simulation system d'une chaine de transmission numérique par fibre optique haut débit », mémoire de magister université Abou-bekrBelkaid.
- [8] E. Desurvire, J. R. Simpson, and P. C. Becker, "High-gain erbium doped traveling wave fiber amplifier", Opt. Lett. 12 (11), 888 (1987).
- [9] j. Maury, « Etude des caractéristiques d'une fibre optique amplificatrice etCompensatrice des systèmes chromatique », thèse de doctorat université de Limoge 2003.
- [10] J. Wiley, E. Desurvire, « Erbium Doped Fiber Amplifiers », (1994).
- [11] Xin Jiang, in optical performance monitoring, 2010
- [12] R. H. Stolen ET E. P. Ippen, « Raman gain in glass optical waveguides », 1973
- [13] B. Bristiel et p. Gallion. « Bruits d'un amplificateur Raman Transparent a distribution de gain quasi-uniforme », Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications
- [14] International Journal of Electronics and Computer Science Engineering. Available Online at www.ijecse.org.ISSN 2277-1956].

- [15] S.C. Cao, J.C. Cartledge, I. Monfils & A. Yiek, "Detailed experimental Characterization of the chirp properties of an SOA/MZI wavelength converter", Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, Vol. 3, pp. wdd68-1 -wdd68-3, 2001.
- [16] P. Morel « Modélisation des amplificateurs optiques à semi-conducteurs : du composant au système», thèse de doctorat, l'Université de Bretagne Occidentale, 2006
- [17] A. Bechir, « Effet du des orde et du substrat sur la structurelle électrique dans les alliages semiconducteur», Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2006
- [18] O. Sediki, Optique Fondamentale, Licence L3, Photonique-information-communication-Système, université abou-bakr Belkaid Tlemcen 2010
- [19] K.E. Stubkjaer, "Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing", IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, N°6, Nov-Dec 2000, pp. 1428-1435.
- [20] mémoire de doctoral de mr. mohammed amaya sur Amélioration des performances d'un amplificateur optique à semi-conducteurs par injection optique à la transparence du gain pour les réseaux de télécommunications optiques. décembre 2006.
- [21] P. Morel « Modélisation des amplificateurs optiques à semi-conducteurs : du composant Au système», thèse de doctorat, l'Université de Bretagne Occidentale, 2006
- [22] Tomáš Ivaniga et Petr Ivaniga. Article en libre accès distribué sous la licence creative commons attribution.
- [23] N. Boudrioua, « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD », pour obtenir le grade de docteur de l'Université Paul Verlaine - Metz, Ecole Doctorale IAEM - Lorraine, 2007
- [24] BENDRIHEM Abdelaziz "Etude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques " Mémoire Magister en électronique, (2008).
- [25] Raman Kashyap "Fiber Bragg Gratings" BT Laboratories, Martlesham Heath Ipswich, United Kingdom ACADEMIC PRESS, (1999)

- [26] Ammon Yariv «Quantum electronics" Third Edition, John Wiley and Sons, (1989).
- [27] D. L. Mills "Nonlinear Optics: Basic concept" Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (1999).
- [28] Lokenath Debnath "Nonlinear Partial differential Equation for Scientists and Engineers"(Birkhäuser Boston, (1997).
- [29] Elena Olmedo Herrero « Étude des effets non linéaires dans les lasers et amplificateurs de puissance à fibre double gaine dopée Er³⁺/Yb³⁺ » Thèse doctorale soutenue en 2003.
- [30] N. Bloembergen, Benjamin Inc.(En) Nonlinear optics 1965.
- [31] L. Prigent and J.-P. Hamaide « Measurement of Fiber Nonlinear Kerr Coefficient by Four-Wave Mixing » IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 5, No. 9, September 1993.
- [32] Farah Diana Mahad, Abu Sahmah M. Supa'at, Sevia Mahdalizaldrus, David Forsyth, Comparative performance testing of SOA wavelength conversion techniques for future alloptical systems, Optik 124 (2013) 1254–1259.
- [33] Farah Diana Mahad, Abu Sahmah M. Supa'at, Sevia Mahdalizaldrus, David Forsyth, Analyses of semiconductor optical amplifier (SOA) fourwave mixing (FWM) for future all-optical wavelength conversion, Optik 124 (2013) 1–3.
- [34] M.Y. Jamroa, J.M. Seniora, M.S. Leesonb, G. Murtaza, Chirp in a wavelength converter based on a symmetrical-MZI employing SOAs, Opt. Commun. 209 (4–6) (2002) 321–328.
- [35] A. D'Ottavi, P. Spano, G. Hunziker, R. Paiella, R. Dall'Ara, G. Guekos, K.J. Vahala, Wavelength conversion at 10 GB/s by four-wave mixing over a 30-nm interval, IEEE Photon. Technol. Lett. 10 (7) (1998) 952–954.
- [36] D. Hsu, S. Lee, P. Gong, Y. Lin, S.S.W. Lee, M.C. Yuang, High efficiency wide-band SOA based wavelength converters by using dual pumped four-wave mixing and an assist beam, IEEE Photon. Technol. Lett. 16 (8) (2004) 1903–1905.
- [37] D.I. Forsyth, M.J. Connelly, Spectrum-sliced wavelength conversion using four wave mixing from a semiconductor optical amplifier, in: Optical Amplifiers and Their Applications, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2005), Paper TuC3,(2005).

[38]S. Singh, R.S. Kaler, Wide band opticalwavelength converter based on four-wavemixing using optimized semiconductor opticalamplifier, J. Fiber Integr. Optics 25 (3) (2007)213–230.

[39] S. Wu, X. Sun, M. Zhang, Characteristics of thewavelength converted signal in wavelengthconversion based on cross-gain modulation, Int.J. Infrared Millimeter Waves 23 (2) (2002) 309–316

[40]M. Kovacevic, A. Acampora, Benefits ofwavelength translation in all optical clearchannel networks, IEEE J. Sel. Area Comm. 14(1996) 69–79.

Résumé:

Les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sont des composants multifonctionnels utilisables dans des applications de plus en plus variées, notamment dans les réseaux multiplexés en longueur d'onde. Ce travail est consacré à la modélisation du comportement statique et dynamique des SOA. Le terme large-bande couvre une large plage de variation de la longueur d'onde des signaux optiques incidents, de leur puissance, ainsi qu'une large plage de variation du courant d'alimentation électrique des SOA.

Mots clés :

Amplificateur à base de semi-conducteur, optique non linéaire, mélange à quatre ondes, effet Kerr, conversion de la longueur d'onde.

Abstract:

Optical semiconductor amplifiers (SOA) are multifunctional components that can be used in an increasing variety of applications, in particular in wavelength multiplexed networks. This work is dedicated to the modeling of the static and dynamic behavior of SOA. The term broadband covers a wide range of variation of the wavelength of the incident optical signals, of their power, as well as a wide range of variation of the power supply current of the SOA.

Keywords:

Semiconductor based amplifier, nonlinear optics, four wave mixing, Kerr effect, wavelength conversion.

المخلص:

مضخمات أشباه الموصلات الضوئية (SOA) هي مكونات متعددة الوظائف يمكن استخدامها في مجموعة متنوعة متزايدة من التطبيقات ، لا سيما في شبكات مضاعفة الطول الموجي. تم تخصيص هذا العمل لنمذجة السلوك الثابت والديناميكي للخدمية. يغطي مصطلح النطاق العريض نطاقاً واسعاً من التباين في الطول الموجي للإشارات الضوئية الساقطة ، وقوتها ، بالإضافة إلى نطاق واسع من التباين في تيار إمداد الطاقة لـ SOA.

الكلمات الدالة:

مكبر الصوت القائم على أشباه الموصلات ، البصريات غير الخطية ، خلط الموجات الأربعة ، تأثير كير ، تحويل الطول الموجي.