



## MASTER ACADÉMIQUE

**Domaine:** Science et technologie

**Faculté:** Télécommunications

**Spécialité:** Systèmes des télécommunication

**Présenté par :**

Ben Guehza mohamed Bachir

Kachi Fares

**Le theme**

**Etude des systèmes de l'amplification dans les réseaux de  
transmission optique**

Soutenu publiquement le: 20/6/2023

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. LOUAZEN Hassiba

MCB à l'université de Ouargla

Président

Dr. OTMANI Hamza

MCA à l'université de Ouargla

Encadrant

Dr. CHENINA Hachmi

MCB à l'université de Ouargla

Examineur

Année Universitaire : 2022-2023



## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout-puissant , qui nous a soutenus dans nos études et nous a accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant, M. Hamza Otmani, pour ses , la ce travail. Nous souhaitons également adresser nos remerciements les plus sincères aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche, en acceptant de l'examiner et de l'enrichir grâce à leurs suggestions. Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers tous nos enseignants tout au long de notre parcours d'études. Enfin, nous souhaitons remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.





# DÉDICACE

Je dédie cet humble travail et ma profonde gratitude

A ceux qui m'ont appris l'ambition, mes parents, aux deux personnes à qui tous les mots de l'univers sont incapables d'exprimer mon amour et mon affection, aux deux êtres qui me sont les plus chers, à ma chère mère et à mon père. Maman, si tu savais combien je t'aime.

À mon cher père qui a payé le prix avec amour et sacrifice pour ma façon de penser. Papa, je te remercie d'avoir fait de moi un homme.

A mes chers frères et sœurs , A tous mes amis, collègues et tous mes professeurs tout au long de mes études , A tous ceux qui ont contribué, de loin ou de près, à la réalisation de ce travail.

***Ben Guehza Med El Bachir***





# DÉDICACE

Je veux remercier mon dieu jour et nuit pour son succès. Il m'a donné la patience et le pouvoir et la volonté, pour en arriver ici Aujourd'hui.

Où est-ce que je mets cet humble travail entre vos mains.

Je dédie ce travail simple à ceux qui ont été m'ont fait exister à mon père et ma chère maman, et je suis très content pour se tenir à côté de moi et veiller tard pour réussir mes études, et leur souci d'obtenir un niveau supérieur d'instruction et éducation..., je n'aurais pas atteint ce niveau, je le dédie aussi à tous mes frères et mes sœurs et ma famille.

***Kachi Fares***



## Résumé

Ce travail se concentre sur l'étude approfondie des systèmes d'amplification utilisés dans les réseaux de transmission optique. Avec l'évolution continue des techniques de communication optique, la demande croissante en termes de productivité et de capacité de transmission a rendu l'amplification optique nécessaire pour compenser les pertes de signal sur de longues distances.

Tout d'abord, nous étudions de manière générale les réseaux optiques. Ensuite, nous abordons les détails du processus fondamental de cette recherche, à savoir l'amplification optique. Notre objectif ici est de nous concentrer sur deux amplificateurs optiques, à savoir l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) et l'amplificateur à émission spontanée (SOA). Nous examinerons leurs caractéristiques, avantages et inconvénients.

Nous commençons par l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium, largement utilisé en raison de ses performances supérieures et de sa compatibilité avec les infrastructures de fibres optiques existantes. Ensuite, nous nous intéressons aux amplificateurs à semi-conducteurs, en particulier à l'amplificateur à émission spontanée, et aux principes de fonctionnement de ces amplificateurs, ainsi qu'à leurs avantages uniques tels que la réponse à haute fréquence.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous effectuons la simulation et l'interprétation des résultats à l'aide du logiciel OptiSystem. En conclusion, cette étude approfondie des systèmes d'amplification dans les réseaux de transmission optique fournit une base solide pour les chercheurs, ingénieurs et spécialistes souhaitant développer et améliorer les systèmes d'amplification optique. En comprenant les principes, les caractéristiques et les défis de ces systèmes, il est possible d'améliorer les performances des réseaux de communication optique de prochaine génération, offrant ainsi des débits de données plus élevés, des distances de transmission plus longues et une qualité de signal améliorée.

**Mots clés** -Amplification optique, Les Amplificateurs Optique, EDFA, SOA, Band passant, fibre optique.

## Abstract

This work focuses on the in-depth study of amplification systems used in optical transmission networks. With the continuous evolution of optical communication techniques, the increasing demand in terms of productivity and transmission capacity has made optical amplification necessary to compensate for signal losses over long distances.

First of all, we study in a general way the optical networks. Next, we discuss the details of the fundamental process of this research, namely optical amplification. Our objective here is to focus on two optical amplifiers, namely the erbium-doped fiber amplifier (EDFA) and the spontaneous emission amplifier (SOA). We will consider their features, advantages and disadvantages.

We start with the erbium-doped fiber amplifier, which is widely used due to its superior performance and compatibility with existing fiber optic infrastructures. Next, we are interested in solid-state amplifiers, in particular the spontaneous emission amplifier, and the principles of operation of these amplifiers, as well as their unique advantages such as high frequency response.

Finally, in the third chapter, we perform the simulation and the interpretation of the results using the OptiSystem software. In conclusion, this in-depth study of amplification systems in optical transmission networks provides a solid basis for researchers, engineers and specialists wishing to develop and improve optical amplification systems. By understanding the principles, characteristics and challenges of these systems, it is possible to improve the performance of next-generation optical communication networks, thus offering higher data rates, longer transmission distances and improved signal quality.

**Keywords** -Optical amplification, Optical Amplifiers, EDFA, SOA, Bandwidth, optical fiber.

## ملخص

يركز هذا العمل على الدراسة المتعمقة لأنظمة التضخيم المستخدمة في شبكات الإرسال البصري. مع التطور المستمر لتقنيات الاتصالات البصرية ، أدى الطلب المتزايد على الإنتاجية وقدرة الإرسال إلى جعل التضخيم البصري ضروريا للتعويض عن فقد الإشارة عبر مسافات طويلة.

أولا ندرس الشبكات البصرية وتفاصيلها بعد ذلك ، نبدأ في الحديث والدخول في تفاصيل العملية الأساسية لهذا العمل ، وهي عملية التضخيم البصري ، والهدف من دراستنا هنا يتعلق باثنين من المضخمات الضوئية ، وهما مضخمات الياف بصرية مشبعة بإيريبيوم ومكبر الانبعاث الذاتي ، حيث سنتطرق لخصائصهما وميزات وكذلك العيوب نبدأ ب مضخم الياف بصرية مشبع بإيريبيوم ، والتي تستخدم على نطاق واسع بسبب أدائها المتفوق وتوافقها مع البنى التحتية الألياف البصرية القائمة ، وثانيا نحن مهتمون في مضخمات الحالة الصلبة ، ولا سيما مكبر الانبعاث الذاتي ومبادئ التشغيل من هذه المضخمات ، ومزاياها الفريدة مثل استجابة عالية التردد ، وأخيرا في الفصل الثالث محاكاة وتفسير النتائج من قبل برنامج OptiSystem

في الختام ، توفر هذه الدراسة المتعمقة لأنظمة التضخيم في شبكات الإرسال البصري أساسا متينا للباحثين والمهندسين والمتخصصين في هذا المجال الراغبين في تطوير وتحسين أنظمة التضخيم البصري. من خلال فهم مبادئ وخصائص وتحديات هذه الأنظمة ، من الممكن تحسين أداء شبكات الاتصالات البصرية من الجيل التالي ، مما يوفر معدلات بيانات أعلى ومسافات إرسال أطول وجودة إشارة محسنة.

**الكلمات المفتاحية** -التضخيم البصري ، مضخمات البصرية ، مضخمات الياف بصرية مشبعة بإيريبيوم ، مكبر الانبعاث الذاتي ، عرض النطاق الترددي ، الألياف البصرية .

## Liste des Abréviations:

GAP: Band Gap

WDM: Wavelength Division Multiplexing

DEL : les diodes électroluminescentes

PIN : Positive Intrinsic Negative Photodiode

ADP : Avalanche Photo Diode

DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing

EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier

EDWA: Erbium-Doped Waveguide Amplifier

SOA: Semiconductor Optical Amplifier

DFB: Distributed Feedback

ESA: Emission Spontanée Amplifiée

GFF: Gain Flattening Filter

BER: Bit Error Rate

CATV : Câble Analogique de Télévision

TDM: Time Division Multiplexing

CW: Continuous Wave

LAN : Les réseaux locaux

FWM: Four-Wave Mixing

ASE: Amplified Spontaneous Emission

OSNR : Rapport Signal optique sur Bruit

SNR : Signal-to-Noise Ratio

VOA: Variable Optical Attenuator

NLS: Nonlinear Schrödinger Equation

ISI: Inter-Symbol Interference



# Table des matières

REMERCIEMENTS .....	II
DÉDICACE.....	III
Résumé.....	V
Abstract .....	VI
Liste des Abréviations:.....	VIII
Introduction general .....	XIV
I-1. Introduction .....	1
I-2.1.Définition :.....	1
I-2.2. Principe de Transmission Optique .....	1
I-2.2.Description des systèmes de transmission optique .....	2
A.L'émetteur:.....	3
B.Réception:.....	3
I.2.2.B.1. Photodiode PIN .....	4
I.2.2.B.2. Photodiode APD.....	4
I.2.2.B.3. Comparaison entre PIN etAPD .....	5
I-2.3.Caractéristiques du photo détecteur :.....	6
I-2.4.Avantages et inconvénients de la transmission optique .....	6
I-2.4.1. Avantages : .....	6
I-2.4.2. Inconvénients :.....	6
I-3.Fiber Optique.....	7
I.2.1. Définition .....	7
I.2.2. Différents types de fibres optiques.....	7
I.2.2.1. Fibre multimode à saut d'indice: .....	7
I.2.2.2. Fibre multimode à gradient d'indice: .....	8
I.2.2.3.Fibre monomode: .....	8
I.2.3. Comparaison entre les différents types de la fibre optique :.....	9
I.2.4. Caractéristiques de la fibre optique:.....	9
I.2.4.1. Ouverture numérique : .....	9
I.2.4.2. L'Atténuation : .....	10
I.2.4.3. La bande passante : .....	11
I.2.4.4. La dispersion dans la fibre optique : .....	11
I.2.5. Avantages et Inconvénients de la fibre optique .....	11
I.2.5.1. Avantages de la fibre optique.....	11

I.2.5.2. Inconvénients de la fibre optique .....	11
I.2.6. Les Effets non linéaires dans les fibres optiques: .....	11
I.2.6. L'utilisation de la fibre optique .....	12
I-3. Conclusion : .....	13
Bibliographie de chapitre 1 .....	13
Introduction: .....	14
II.1. Amplification optique : .....	13
II.1.1. Définition : .....	13
II.1.2. Mécanismes de l'amplification optique : .....	14
II.1.2.1. Interactions lumière matière: .....	14
II.1.3. Multiplexage en longueur d'onde et l'amplification optique: .....	14
II.1.3.1. Principe de WDM: .....	15
II.1.3.2. Application de WDM: .....	16
II.1.4. L'avantage de l'amplification optique : .....	16
II.1.5. Les inconvénients de l'amplification optique : .....	16
II.2. Amplificateurs optique : .....	17
II.2.1. Définition: .....	17
II.2.1. Les Amplificateurs optiques: .....	17
II.2.1.1. Les Types d'amplificateurs optiques : .....	17
II.2.1.2. Architecture & Configuration : .....	18
II.2.2. Modélisation des amplificateurs dopés à l'erbium : .....	19
II.2.2.1. Les caractéristiques des fibres dopées à l'erbium: .....	19
II.2.2.1. Les caractéristiques des fibres dopées à l'erbium: .....	19
II.2.2.4. Modèle de trois niveaux d'énergie : .....	20
II.2.2.4.1. Présentation du modèle de trois niveaux d'énergie .....	20
II.2.3. Présentation des autres d'amplificateurs optiques : .....	21
II.2.3.1. Les amplificateurs semi-conducteurs: .....	21
II.2.3.2. Les amplificateurs à guide d'onde dopés : .....	22
II.2.5. Conclusion: .....	22
Bibliographie de chapitre 2 .....	24
Introduction : .....	25
III-1. Logiciel Optisystem: .....	25
III.1.2. Présentation du logiciel OptiSystem: .....	25
III.1.3. Interface d'Optisystem : .....	26
III.1.4. Principales caractéristiques du logiciel Optisystem .....	26

III.1.5. Applications D'optisystem .....	27
III.1.6. Avantage du logiciel Optisystem .....	27
III.1.7. le Rôle de composante dans la chaine de transmission .....	27
III.2.1. Simulation: .....	29
III.2.1.1. Amplification par fibre dopée à l'erbium (EDFA) .....	29
III.2.1.2. Résultats de simulation : .....	31
III.2.3. Amplification optique à semi-conducteur .....	33
III.2.3.1. Simulation : .....	33
III.2.3.2. Discussions sur les résultats: .....	35
III.2.4. Les amplificateurs a fibre optiques les plus courants: .....	35
III.2.4.1. Amplificateur EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) .....	35
III.2.4.2. Amplificateur SOA (Semiconductor Optical Amplifier) .....	35
III.2.6. Contenu d'un extrait d'étude de ces amplificateurs : .....	35
III.2.7. Comparaison : .....	35
III.2.7.1. Tableau de comparaison .....	36
III.2.6. Étude réelle et des Exploits réels des Amplificateurs à Fibre Dopée à l'Erbium .....	34
III.2.6.1. Simulation des Caractéristiques des EDFA : .....	37
III.2.6.2. Configuration et Simulation des Caractéristiques du réseau WDM : .....	37
III.2.6.3. Configuration et Simulation des caractéristiques du mélange à quatre ondes FWM .....	38
III.2.6.4. Discussion sur les résultats : .....	37
III.2.6.5. Discussion : .....	43
III.2.7. Conclusion : .....	44
Conclusion Générale .....	45
Bibliographie de chapitre 3 .....	46

## Liste de figures :

Figure I.1: Parcours d'un rayon lumineux le long de la fibre optique.....	2
Figure I.2: Schéma de principe d'un système de transmission optique .....	3
Figure I.3: Photodiode PIN.....	4
Figure I.4: Structure d'une photodiode à avalanche APD .....	5
Figure I.5: Structure générale de la fibre optique. ....	7
Figure I.6: Fibre multi mode à saut d'indice.. ....	7
Figure I.7: Fibre multi mode à gradient d'indice.....	8
Figure I.8: Fibre multi mode à gradient d'indice.....	8
Figure I.9: L'ouverture numérique. ....	9
Figure I.10: Pertes optiques dans une fibre optique.....	10
Figure I.11: Effet de l'atténuation.....	11
Figure II.1: Opportunité d'utilisation du multiplexage couplée à l'amplification optique .....	15
Figure II.2: Principe d'une liaison WDM .....	15
Figure II.3: Représentation d'une amplification dopée à l'erbium .....	19
Figure II.4: Le diagramme des niveaux d'énergie visualisant les transitions possibles .....	20
Figure III.1: Schéma de l'interface OptiSystem .....	24
Figure III.2: Simulation de L'Amplification par fibre dopée à l'erbium .....	27
Figure III.3: visualisation des Spectres optiques de signal Pour $P_e=10$ dBm avant et après.....	28
Figure III.4: débit binaire au niveau de l'émetteur .....	28
Figure III.5: débit binaire au niveau du récepteur .....	29
Figure III.6: Visualisation de bruit avant et après le filtre Pass-bas chebyshev.....	29
Figure III.7: Visualisation de bruit le filtre Pass-bas chebyshev .....	30
Figure III.8: simulation de Amplification optique à semi-conducteur.....	31
Figure III.9: gain du signal .....	31
Figure III.10: puissance ASE totale à la sortie SOA .....	31
Figure III.11 :Spectres de bruit pour différentes puissances de signal d'entrée .....	32
Figure III.12: Amplificateur à étage unique et bruit associé au signal .....	35
Figure III.13: Configuration de la simulation EDFA .....	35
Figure III.14: Configuration de simulation WDM amplifiée et caractéristiques FWM dans un réseau optique .....	37
Figure III.15: Configuration de la simulation FWM .....	37
Figure III.16: Tracé de l'OSNR en fonction de la puissance de sortie.....	38
Figure III.18: Diagrammes oculaires du réseau WDM caractéristiques et FWM dans un réseau optique Passif.....	40
Figure III.19: Sortie après liaison fibre à dispersion= $16,75$ ps / nm / km .....	41
Figure III.20: Sortie de fibre à dispersion= $11,75$ ps / nm / km.....	41

# Liste de Tableau :

- Tableau.I.1: Comparaison entre PIN et APD. .... 6
- Tableau.I.2: comparaison entre les différents types de la fibre optique. .... 10
- Tableau.III.1: tableaux de comparaison entre les trois amplificateurs..... 34
- Tableau.III.2: caractéristiques de l'EDFA. .... 38
- Tableau.III.3: Sortie réseau WDM amplifiée.. .... 38
- Tableau.III.4: Puissance à l'entrée et à la sortie de la fibre..... 39
- Tableau.III.5: Puissance optique à la sortie EDFA..... 39
- Tableau.III.6: puissance de sortie optique de fibre avec le taux de dispersion chromatique..... 42

# Introduction général

Le développement des technologies de communication optique a révolutionné notre capacité à transmettre des données sur de longues distances avec une efficacité et une vitesse remarquables. Les réseaux de transmission optique jouent un rôle essentiel dans la mise en œuvre de ces technologies, permettant la transmission rapide et fiable de signaux optiques sur de grandes distances sans perte de qualité.

L'un des éléments clés qui garantit le bon fonctionnement des réseaux de transmission optique est l'amplification des signaux optiques. Les signaux optiques peuvent subir une atténuation en raison des pertes optiques résultant de divers phénomènes tels que la dispersion, l'absorption, et les défauts dans les composants optiques. L'amplification optique est utilisée pour compenser ces pertes et restaurer les signaux optiques à des niveaux de puissance appropriés pour une transmission efficace.

Dans ce mémoire de fin d'études, nous allons étudier en détail les systèmes d'amplification dans les réseaux de transmission optique. Nous explorerons les différentes technologies d'amplification optique utilisées dans les réseaux de communication optique à fibre optique, en mettant l'accent sur leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites. Nous aborderons également les aspects liés à la conception et à l'optimisation des systèmes d'amplification optique. Cela comprendra l'étude des paramètres clés tels que la puissance d'entrée, le gain, la figure de bruit, la bande passante, et les caractéristiques de distorsion. Nous examinerons les techniques et les méthodes utilisées pour améliorer les performances des amplificateurs optiques et pour optimiser leur fonctionnement dans les réseaux de transmission optique.

De plus, nous analyserons les problèmes auxquels sont confrontés les systèmes d'amplification optique dans les réseaux de transmission optique. Cela inclura l'étude des effets non linéaires, tels que la distorsion de phase et d'amplitude, qui peuvent se produire lors de l'amplification optique à haute puissance, nous examinerons également les stratégies de gestion de la puissance et de la distorsion pour atténuer ces effets indésirables et garantir des performances optimales du système.

Enfin, nous discuterons des avancées récentes dans le domaine de l'amplification optique et des perspectives d'avenir. Nous examinerons les nouvelles technologies émergentes, telles que les amplificateurs à semi-conducteurs, les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium, qui offrent des améliorations significatives en termes de performances et de fonctionnalités.

Ce travail fournira une compréhension approfondie des systèmes d'amplification dans les réseaux de transmission optique, mettant en évidence leur rôle crucial dans la réalisation de communications optiques rapides et fiables. Il offrira également un aperçu des défis actuels et des perspectives futures pour l'amplification optique, ouvrant la voie à de nouvelles avancées dans ce domaine en constante évolution.

*Chapitre I*

# **Généralités sur les Fiber Optiques**

## **I-1. Introduction :**

Les réseaux de communication longue distance ont considérablement valorisé les télécommunications optiques, qui tirent leur succès de leur grande bande passante et de leur faible taux de perte de signal, ce dernier étant particulièrement déterminant.

Il est dorénavant envisageable de concevoir des systèmes de transmission à très haute capacité, ce qui positionne la fibre optique comme un élément essentiel des réseaux métropolitains, transnationaux et inter continent de manière historique, les technologies de télécommunications optiques ont pour objectif principal de transmettre des données et des informations à des débits extrêmement élevés.[1]

Ce premier chapitre a pour objet de présenter brièvement les notions de système de transmission optique. Nous allons commencer par une étude de la transmission optique et de la fibre optique, on va faire une présentation d'un ensemble des notions et des définitions.

## **I.2. Transmission Optique:**

### **I.2.1. Définition :**

Les organisations de télécommunications ont adopté les systèmes de transmission par fibres optiques il y a un certain temps déjà. Depuis, les chercheurs ont mis au point une multitude de composants actifs et passifs sophistiqués, des techniques de transmission dédiées aux liaisons optiques et des logiciels basés sur des outils de modélisation pour différents composants, liens et réseaux. Grâce à ces développements, les systèmes de transmission optique offrent désormais des débits de plus en plus rapides sur des distances de plus en plus longues. L'invention du LASER dans les années 1960 a incité les chercheurs à examiner le spectre optique comme une extension du spectre des ondes radio et des micro-ondes afin de fournir des liaisons de transmission haut débit.[2]

### **I.2.2. Principe de Transmission Optique :**

Dans les années 1970, la compagnie américaine Corning Glass Works (aujourd'hui Corning Incorporated) a élaboré le concept de transmission optique. Ce principe implique que les informations sont transmises par des ondes lumineuses guidées à travers une fibre, utilisant le phénomène de réflexion qui se produit à la frontière entre le noyau et la gaine. La représentation graphique ci-dessous dépeint la trajectoire d'un rayon lumineux à travers la fibre. [3]



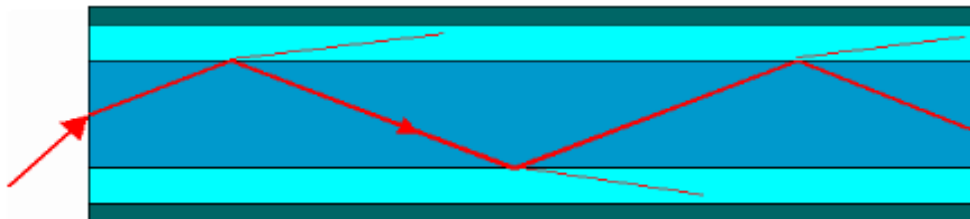


Figure I.1: Parcours d'un rayon lumineux le long de la fibre optique

### Trois éléments clés sont nécessaires pour former un système de transmission optique :

- Un support de transmission guidant la lumière
- Le récepteur optique, qui est un détecteur de lumière, est également appelé transducteur optoélectrique.
- Un transducteur électro-optique est une source de lumière, également connue sous le nom d'émetteur optique.

En utilisant des fibres optiques monomodes, il est désormais possible de transmettre des données sur une distance de 100 km à une vitesse de 50 Gbit/s sans avoir besoin d'amplification. En laboratoire, des vitesses de transmission plus élevées ont été atteintes sur des distances plus courtes. (plus de 10 Tbit/s). [3]

### I.2.2. Description des systèmes de transmission optique :

La Figure I.2 montre le schéma de principe d'un système de transmission par fibres optiques, ou système de transmission optique. Tous les systèmes se composent d'un bloc émetteur, d'une série de tronçons de fibres optiques séparés par des amplificateurs, et d'un bloc récepteur. Le rôle d'un tel système est tout d'abord, au niveau de l'émetteur, d'émettre un signal optique continu et de le moduler en fonction des données binaires et du format choisi.

L'objectif supplémentaire est de faire voyager le signal optique sur une distance précise en utilisant une ligne optique composée de fibres optiques et d'amplificateurs, afin de minimiser les impacts des divers effets de propagation qui peuvent interférer avec le signal. En fin de compte, le récepteur détecte le signal optique après la transmission et le convertit en signal binaire électrique. [4]

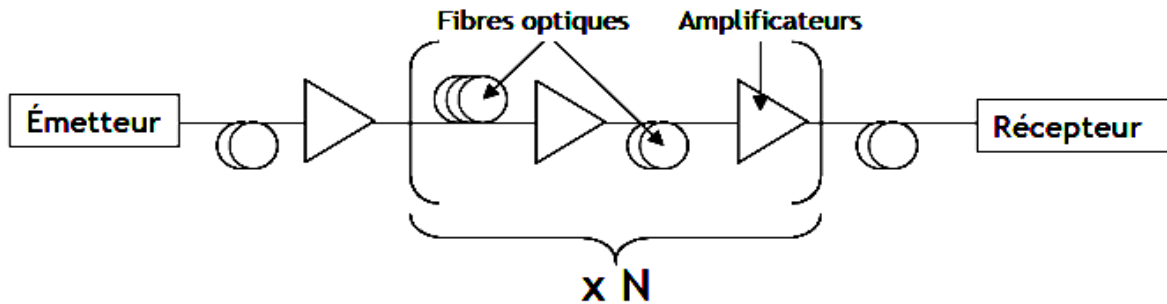


Figure I.2. Schéma de principe d'un système de transmission optique

**A. L'émetteur:**

Le dispositif d'émission est initialement composé d'un laser, généralement une diode laser, qui émet en continu à une certaine puissance et à une certaine longueur d'onde. La puissance d'un signal lumineux s'exprime en mW, mais dans l'usage elle sera la plupart du temps exprimée en décibels-milliwatts (dBm), échelle en décibels dotée d'une référence absolue à 1 mW. [4]

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{mW}}{1mW} \right) \dots \dots \dots I$$

Leur fonction principale consiste à transformer l'énergie électrique en énergie optique, également appelée (conversion électro-optique).

Dans le domaine des télécommunications optiques, l'augmentation constante de la bande passante requiert l'utilisation de sources à spectres restreints, telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL). ces deux sources sont réalisées à partir de jonction PN polarisée en direct, le principe d'émission est dû à la recombinaison des paires électron-trou. [5]

**B. Réception:**

Le photodétecteur joue un rôle crucial dans les communications à fibre optique, en convertissant le signal optique transmis par la fibre en un signal électrique pour traitement par des dispositifs électroniques. Dans notre étude nous allons parler des photodétecteurs, les plus utilisés dans les systèmes de transmission par fibre optique qui sont les photodiodes PIN ou APD. [6]

### I.2.2.B.1. Photodiode PIN :

Cette photodiode, appelée "Positive Intrinsic Negative Photodiode", est fabriquée à partir de trois couches de semi-conducteur et fonctionne en polarisation inverse. Deux couches fortement dopées P+ et N+ entre lesquels existe une couche de grande résistivité (presque intrinsèque) où il existe très peu de charges mobiles. En raison de leur performance satisfaisante, de leur coût abordable et de leur facilité d'utilisation, les photodiodes PIN sont largement privilégiées. (Voir figure I.3)[7].

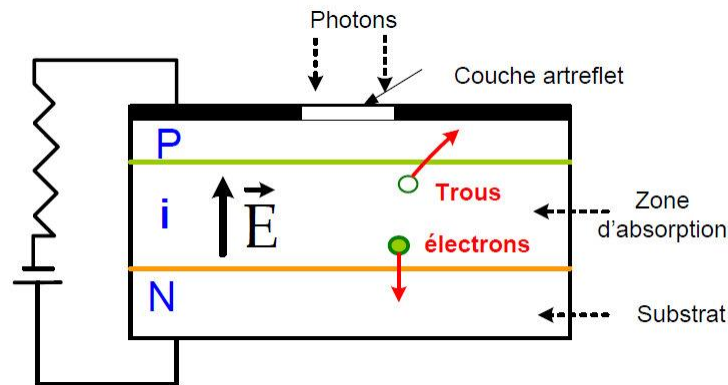
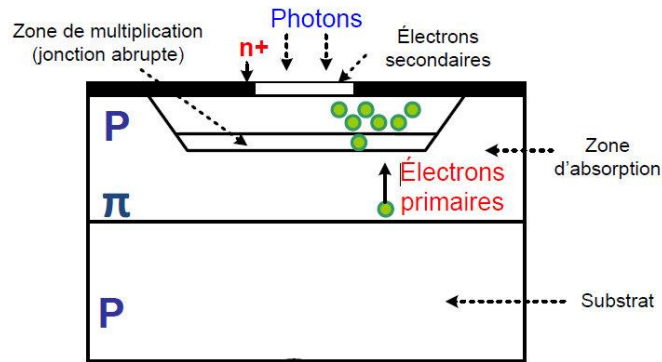


Figure I.3. Photodiode PIN

### I.2.2.B.2. Photodiode APD (Avalanche Photo Diode):

Lorsque la quantité de lumière captée est extrêmement faible, les courants mesurés sont également très faibles et peuvent être confondus avec le courant d'obscurité, ce qui a pour effet de diminuer le rapport signal/bruit sur bruit médiocre. Il est essentiel d'augmenter le courant détecté pour améliorer les performances. Pour cela, il est possible d'utiliser des photodiodes à gain interne de type avalanche, qui sont capables d'amplifier la puissance lumineuse pour obtenir un signal électrique plus fort. Les photodiodes à avalanche ont une réponse rapide et un gain important, mais elles sont plus coûteuses et nécessitent une polarisation inverse très forte. [7]



**Figure1.4. Structure d'une photodiode à avalanche APD**

Dans les télécommunications optiques les détecteurs doivent :

- Fournir une connexion efficace avec la fibre optique.
- Présenter une sensibilité élevée à la longueur d'onde utilisée dans le système de transmission.
- Posséder une largeur de bande adéquate.
- Requérir une tension de source peu élevée. [7]

### I.2.2.B.3 Comparaison entre PIN et APD:

**Tableau I.1. Comparaison entre PIN et APD.**

Caractéristiques	PIN	APD
<b>Technologie</b>	Simple	Complexe
<b>Mise en oeuvre</b>	Simple	Délicate
<b>Gain interne</b>	Nom	Oui (gain d'avalanche)
<b>Tension de polarisation</b>	Faible	Elevée
<b>Courant d'obscurité</b>	Faible	Moyenne
<b>Facteur d'accès debruit</b>	non	Oui



## I.3.Fiber Optique:

### I.2.1. Définition:

La fibre optique est un mince fil de verre transparent capable de transmettre la lumière, utilisé pour les transmissions de données sur terre et en mer. Elle permet un débit d'informations bien supérieur à celui des câbles coaxiaux et peut supporter un réseau "large bande" permettant la transmission de différents types de médias tels que la télévision, le téléphone, la visioconférence et les données informatiques.[9]

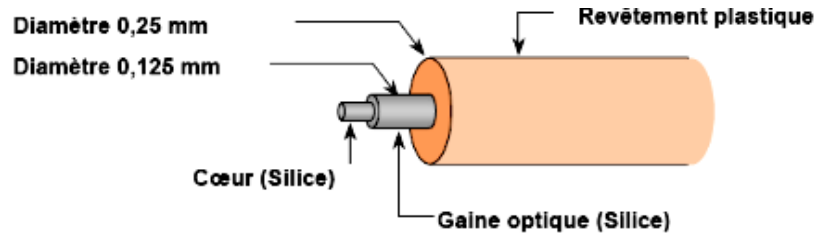


Figure.I.5.Structure générale de la fibre optique

- Le signal lumineux est propagé dans et à proximité du Cœur.
- La gaine optique sert essentiellement à amener le diamètre à 125 $\mu$ m, pour des raisons mécaniques.
- Le revêtement sert à protéger la fibre optique. (Voir figure 1.7)

### I.2.2. Différents types de fibres optiques [10]:

#### I.2.2.1. Fibre multimode à saut d'indice:

Les fibres optiques à saut d'indice ont un noyau transparent avec un indice constant et une gaine foncée, ce qui entraîne une réflexion du rayon lumineux à la frontière entre les deux matériaux. Cependant, cette réfraction entraîne une variation du chemin optique, ce qui peut être problématique car cela étire le même signal à la sortie.

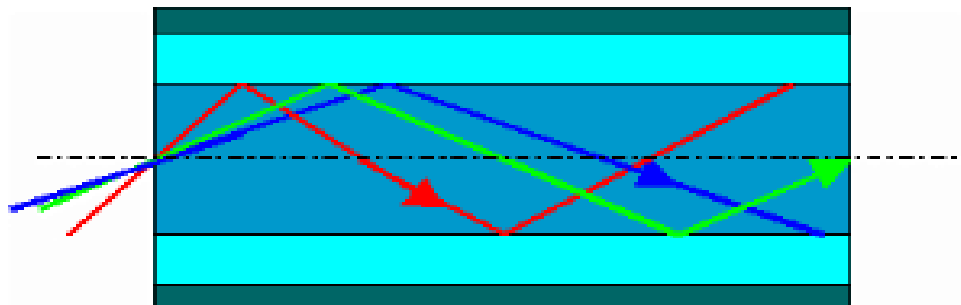


Figure 1.6. Fibre multi mode à saut d'indice

### I.2.2.2. Fibre multimode à gradient d'indice:

Dans cette région, l'indice de réfraction change graduellement depuis le centre vers la gaine, ce qui entraîne une trajectoire plus sinusoidale pour les rayons lumineux qui sont déviés à mesure qu'ils s'éloignent du centre. La variation du chemin optique est moins importante car le diamètre du cœur est plus petit. De ce fait, l'étalement du signal est réduit grâce à cette variation d'indice.

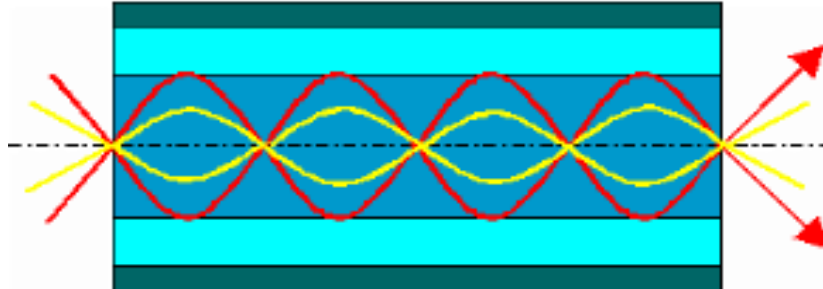


Figure I.7. Fibre multi mode à gradient d'indice.

### I.2.2.3. Fibre monomode:

Pour les transmissions sur de plus grandes distances et/ou avec des débits plus élevés, il est préférable d'utiliser des fibres monomodes (SMF, pour Single Mode Fibre), qui sont technologiquement plus avancées car plus fines. Avec leur cœur très fin, ces fibres n'admettent qu'un seul mode de propagation, qui suit une trajectoire directe dans l'axe de la fibre. Les pertes sont donc minimisées (il y a moins de réflexions sur l'interface cœur/gaine), ce qui les rend adaptées aux transmissions à très haut débit sur de très longues distances, telles que les lignes intercontinentales par câble sous-marin.[9]

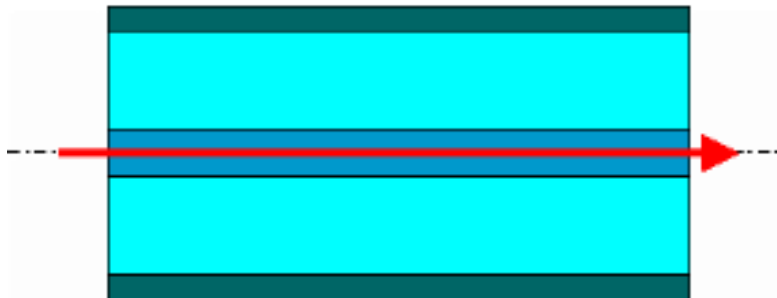


Figure I.8. Fibre multi mode à gradient d'indice

**I.2.3. Comparaison entre les différents types de la fibre optique:**

Tableau I.2.comparaison entre les différents types de la fibre optique

Structure	Avantage	Inconvénients	Application pratique
Multimode a saut indice	Grande ouverture numerique Comexien facile	Perts disperion	Communications a courtes distance
Multimode a gradients indice	Bande passante raisonnable	Difficile a mettre en ouevre	Communications a courtes et moyennes
monomode	Bande passante tres grande	Prix tres eleve	Communications a longues distances

**I.2.4. Caractéristiques de la fibre optique:**

La fibre optique possède plusieurs caractéristiques, parmi lesquels nous allons étudier les quatre paramètres les plus essentiels:

- L'ouverture numérique.
- L'atténuation.
- La bande passante.
- La dispersion.

**I.2.4.1. Ouverture numérique :**

La capacité d'un guide à capter la lumière d'une source à sa section frontale est exprimée par l'angle limite d'acceptation de la lumière. Cet angle est directement lié à l'ouverture du cône qui accepte les rayons lumineux critiques, qui conduisent à une réflexion totale, comme illustré dans la figure suivante :

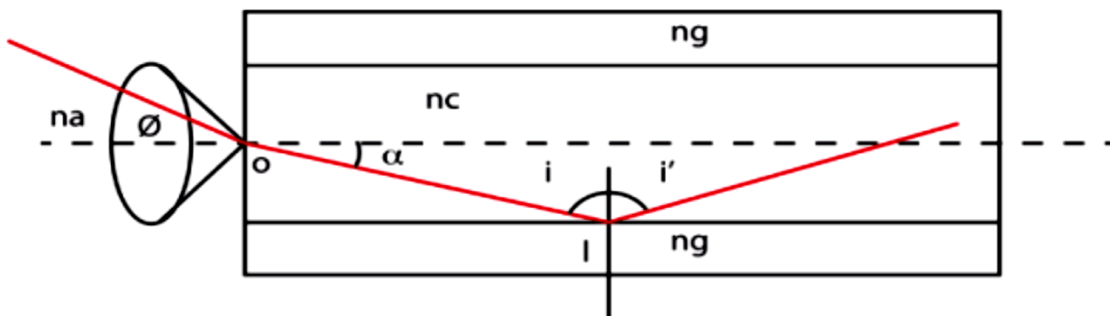


Figure I.9. L'ouverture numérique



**Remarque :** Il est recommandé d'utiliser une source laser pour les fibres monomodes en raison de leur faible ouverture numérique. Cependant, pour les fibres à gradient d'indice, où l'indice varie le long du diamètre, l'ouverture numérique est maximale sur l'axe de la fibre et diminue jusqu'à annulation à la périphérie du cœur. [11]

En cas d'entrée de la fibre par l'air (indice de réfraction = 1), l'ouverture numérique est calculée en fonction de :

$$ON = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} < 1 \dots \dots \dots V$$

**I.2.4.2. L'Atténuation :**

En raison de sa résistance aux torsions et aux tractions, de sa faible épaisseur, ainsi que de la robustesse et de la faible atténuation de son signal optique codé, la fibre optique est considérée comme le meilleur moyen de transport de l'information. Cette atténuation minimale est due à l'utilisation d'une chaîne d'éléments, principalement constituée de tronçons de fibre et d'amplificateurs optiques. Bien que cette faible atténuation soit nettement inférieure à celle des câbles coaxiaux en cuivre, elle n'est pas nulle et peut devenir un problème pour les longues distances de propagation.[12]

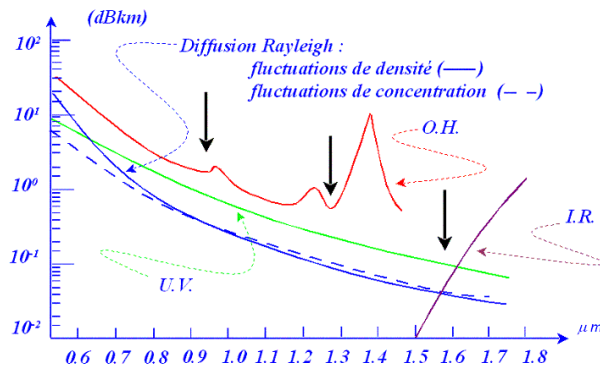
$$\alpha(\lambda) \left( \frac{dB}{Km} \right) = - \frac{10}{L} \log \left[ \frac{P_S}{P_E} \right] \dots \dots \dots VI$$

où :

**$P_E$** : Puissance injectée à l'entrée.

**$P_S$** : Puissance à la sortie.

La fibre optique présente une atténuation plus faible par rapport à d'autres supports de transmission tels que le cuivre, avec une dépendance particulière de l'atténuation sur la longueur d'onde des impulsions lumineuses.



**Figure I.10. Pertes optiques dans une fibre optique**

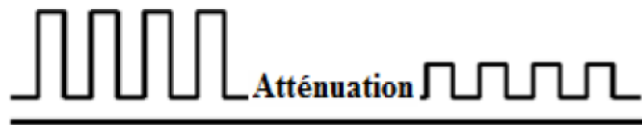


Figure I.11.Effet de l'atténuation

### I.2.4.3. La bande passante :

exprimée en bits par seconde (bps), correspond à la quantité d'informations transmissibles sur la fibre optique pendant un intervalle de temps donné. Elle peut également désigner la plage de fréquences utilisables sur un support, mesurée en hertz (Hz).[13]

### I.2.4.4.La dispersion dans la fibre optique :

Les impulsions lumineuses qui voyagent dans la fibre optique ont tendance à se disperser en raison des temps de propagation différents, un phénomène communément appelé dispersion.

Donc Il y a plusieurs causes pouvant expliquer ce phénomène :

- Dispersion intermodale.
- Dispersion chromatique.
- Dispersion de guide d'onde.
- Dispersion matérielle.

### I.2.5. Avantages et Inconvénients de la fibre optique [14]:

#### I.2.5.1. Avantages de la fibre optique :

Voici les principaux bénéfices de la fibre optique :

- Faible atténuation : la fibre optique a une atténuation plus faible que les conducteurs électriques, ce qui permet de transmettre des informations sur de plus longues distances avec moins de répéteurs.
- Sécurité accrue : la fibre optique offre un niveau de sécurité élevé, car elle ne peut pas être interceptée et mise sur écoute.

#### I.2.5.2. Inconvénients de la fibre optique :

- L'assemblage peut être difficile.
- Le coût d'exploitation est élevé.

### I.2.6. Les Effets non linéaires dans les fibres optiques:

Trois phénomènes seront exposés, à savoir :

✓ **L'effet de Kerr** : qui consiste en l'augmentation de l'indice de réfraction de la fibre optique sous l'influence de l'onde électromagnétique [15].

✓ **Les effets Brillouin** : qui résultent de l'agitation thermique des molécules constituant le milieu, créant de petits déplacements autour de leur position d'équilibre. Les phonons ainsi

créés se couplent entre eux et modifient l'indice de réfraction du milieu, créant des ondes acoustiques de très faible amplitude. Ainsi, lorsqu'une onde électromagnétique se propage, elle est diffusée dans toutes les directions par ces ondes élastiques. [16]

### **I.2.6.L'utilisation de la fibre optique [17]:**

**Utilisation en réseaux et télécommunication :**La fibre optique est largement utilisée dans les réseaux de télécommunication pour la transmission de divers types de données, y compris les conversations téléphoniques, les images et d'autres informations.

**Utilisation dans le domaine de l'éclairage :**Il y a plusieurs méthodes d'éclairage à travers les fibres optiques, mais la plus populaire est la diode électroluminescente (LED).

### **I.3.Conclusion :**

Ce chapitre examine les supports de transmission disponibles, en évaluant leurs caractéristiques, avantages et inconvénients pour déterminer le support optimal pour notre chaîne de transmission optique. Les données transmises via des signaux optiques peuvent offrir des débits de transmission extrêmement rapides, tandis que les fibres optiques présentent plusieurs avantages pratiques, tels qu'une grande bande passante, une faible sensibilité aux interférences électromagnétiques et une résistance à de nombreux facteurs externes. Par conséquent, les fibres optiques sont devenues le choix privilégié pour les supports de transmission. Enfin, l'utilisation de la fibre optique nécessite l'utilisation de systèmes de transmission optique, qui relient la composante émettrice à la composante réceptrice, comme c'est le cas pour tout autre système de transmission.

## Bibliographie de chapitre 1

- [1] Derrouiche Hadjer & Bouzar Zohra « Etude et simulation du système OCDMA optique ainsi que l'influence des réseaux de Bragg » pp 3-14 ,2019-2020
- [2] [http://igm.univmlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission\\_sur\\_fibre\\_optique/pertes.html](http://igm.univmlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/pertes.html) 10/04/2023  
Université Paris Est-Marne la vallée .
- [3] <https://www.memoireonline.com/04/10/3402/Etude-sur-limpact-de-la-transmission-optique-dans-un-reseau-multiservices-cas-de-rnis.html> 10/04/2023
- [4] Mathieu Lefrançois. ÉTUDE DE TECHNOLOGIES AVANCÉES POUR L'OPTIMISATION DES SYSTÈMES DE TRANSMISSION OPTIQUE MULTIPLEXÉS EN LONGUEUR D'ONDE AU DÉBIT DE 40 GBIT/S. Physique [physics]. Université Paris Sud-Paris XI, 2007.
- [5] A. Belkhira et S. Mokrani, « L'amplification optique et son intérêt majeur dans les réseaux de télécommunications », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, Promotion juin 2010.
- [6] Pierre Lecoy, « Télécom sur fibres optiques », 3<sup>ème</sup> édition revue et augmentée.
- [7] A. Dellal et E. Essafi, « Etude de l'amplification dans les systèmes de transmission par fibre optique », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, Promotion juin 2010.
- [8] Aib. S, « Modélisation d'un photodétecteur dans une chaîne de transmission par fibre optique » , (2017).
- [9] « Analyse Numérique Et Etude Spectrale De Réseaux De Bragg A Fibre: Compensation De La Dispersion Chromatique Dans Une Ligne De Transmission Optique », Projet de fin cycle Université de Blida 1, 2019.
- [10] Mr Badreddine Boubir « Etude et optimisation des différents paramètres d'un amplificateur à fibre optique dopée avec des ions de terres rares », Université de Annaba, pp 10-11, 2009
- [11] John A, « Fundamentals of Optical Fibers » 2nd Edition, 1995.
- [12] Elodie Cren « Etude de composants absorbants saturables à semi-conducteurs à multi-puits quantiques dopés au fer pour la régénération de signaux optiques à très hauts débit d'information » Thèse de doctorat Université de Rennes I 2004.
- [13] Keiser G 2000 Optical fiber communication. 3rd edition. McGraw-Hill.
- [14] K.D. Kungwa « Etude d'une liaison de transmission par fibre optique et simulation d'un résonateur optique en anneau » Informatique–Ingénieur Industriel 2016.
- [15] <https://docplayer.fr/3150506-Communications-optiques-a-tres-haut-debit.html> 15/04/2023
- [16] T. Sylvestre, H. Maillotte et V. Laude « La diffusion Brillouin dans les fibres optiques microstructurées » Université de Franche-Comté , Décembre 2007
- [17] Taba Lina, Messadek Ahlem « Amplification paramétrique dans une fibre optique » UNIVERSITY UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA , pp15, 2021

*Chapitre II*

# **Amplification optique**

### **Introduction:**

Un des souhaits d'un concepteur de systèmes de transmission est de pouvoir allonger au maximum la distance séparant un émetteur optique du récepteur optique. La technologie a évolué dans cette direction en passant de la fibre multimodes à la fibre monomode, supprimant ainsi la dispersion intermodale et en passant de la longueur d'onde de 1330 nm à 1550 nm, minimisant ainsi l'atténuation. Celle-ci demeure pourtant la première limitation des liaisons à longue distance.

Dès lors que la distance sur laquelle on doit transmettre devient supérieure à la portée du système, on est obligé d'utiliser des répéteurs régénérateurs optoélectroniques qui convertissent le signal optique en signal électrique, le régénèrent et le convertissent à nouveau en signal optique en vue de le transmettre vers un autre répéteur ou terminal de ligne.

Le régénérateur optoélectronique comprend un laser, une photodiode et un grand nombre de circuits intégrés. Tous ces composants fonctionnant à grands débits sont chers, complexes, délicats à réaliser et à interfacier. Malgré les progrès incontestables de l'électronique à large bande, il y a lieu de penser que le développement de ce type de régénérateurs à des débits supérieurs à 2.5 Gbits/s est coûteux. Pourtant, les besoins en débit ne cessent d'augmenter. Cette course à la capacité semble devoir se ralentir pour des raisons technologiques liées à la faisabilité des régénérateurs optoélectroniques; d'où le grand engouement vers les systèmes non régénérés avec l'utilisation de « l'amplification optique » [1].

### **II.1. Amplification optique :**

#### **II.1.1. Définition :**

L'amplification optique est une technique cruciale en transmission qui permet de dépasser les limites du compromis distance/débit dans ces systèmes. Au cours des dernières années, de nombreuses recherches ont été menées pour développer des amplificateurs optiques. Cette technique repose sur l'émission stimulée de photons pour amplifier directement un signal. En utilisant un guide (semi-conducteur ou fibre), le signal est amplifié grâce à une source externe d'énergie appelée « pompage », qui crée une inversion de population. La recombinaison électron-trou peut ensuite être provoquée par un photon incident, générant ainsi un deuxième photon et amplifiant le signal. [2]

### II.1.2. Mécanismes de l'amplification optique :

Le terme "mécanismes d'amplification optique" fait référence au processus dans lequel des dispositifs d'amplification optique sont utilisés pour amplifier des signaux lumineux sans qu'il soit nécessaire de convertir le signal optique en un signal électronique et de l'amplifier, ce qui contribue à améliorer la qualité du signal optique et augmenter la portée du signal entre les appareils optiques. Les mécanismes d'amplification optique sont utilisés dans plusieurs applications, notamment les communications optiques, les dispositifs médicaux, la science et la recherche. C'est ainsi aussi Interactions lumière matière.

#### II.1.2.1. Interactions lumière matière:[3]

La théorie quantique montre que les électrons occupent un certain nombre de niveaux d'énergies. Le comportement d'un atome peut être connu grâce aux électrons contenus dans les deux dernières bandes d'énergie:

- La bande de valence, d'énergie  $E_v$ .
- La bande de conduction, d'énergie  $E_c$ .

La différence d'énergie entre ces deux bandes représente la bande interdite (GAP) laquelle caractérise les différents constituants de la matière.

L'absorption et l'émission d'énergie sont obtenues à partir de la transition des électrons d'un niveau d'énergie vers un autre niveau. La longueur d'onde de la radiation émise ou absorbée est liée à la différence d'énergie entre ces deux niveaux.

$$\Delta E = E_c - E_v = \frac{hc}{\lambda} \dots \dots \dots \text{VII}$$

#### II.1.3. Multiplexage en longueur d'onde et l'amplification optique:

Les besoins croissants en débit ont amené à rechercher une technique pour augmenter les capacités de transmission des réseaux optiques [2]. L'une des solutions à cette demande est de poser plus de câble mais cette solution pose des problèmes d'ingénierie.

Une autre solution beaucoup plus efficace et meilleur est de multiplier le débit par câble, ce procédé est obtenu par la technologie WDM qui consiste en un multiplexage en longueur d'onde. L'un des éléments primordiaux de la technique du multiplexage est l'amplificateur optique. L'apparition de l'amplification optique fut le véritable point de départ du développement de la technologie WDM longue portée. En effet, l'amplificateur procure un avantage économique décisif par son aptitude à amplifier l'ensemble des N longueurs d'ondes. De ce fait, un seul amplificateur se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec le nombre de canaux .

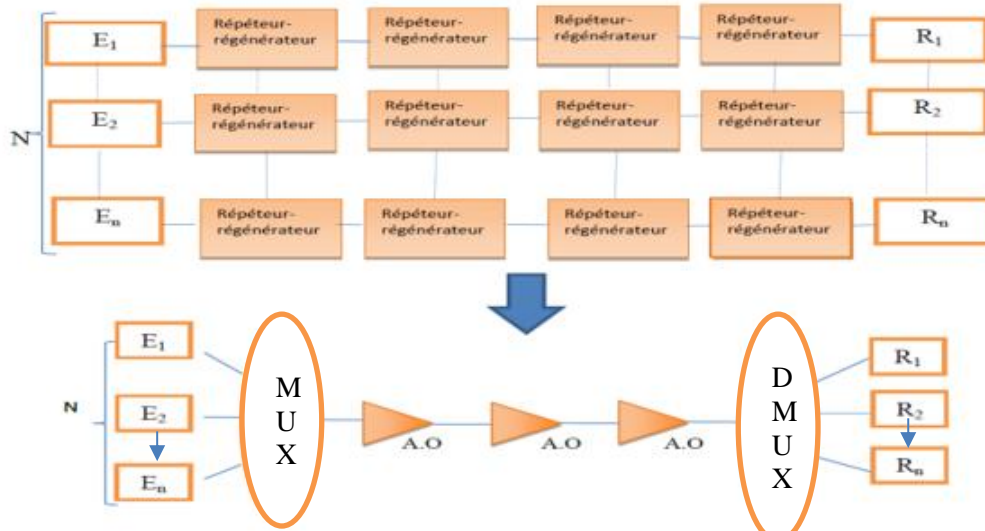


Figure II.1. Opportunité d'utilisation du multiplexage couplée à l'amplification optique

### II.1.3.1. Principe de WDM:

Le multiplexage en longueur d'onde consiste à envoyer dans une seule fibre N porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit  $D_b$  [2]. La bande passante est découpée en plusieurs sous-bandes dont chacune est affectée à une voie.

L'utilisation du multiplexage WDM nécessite un ensemble de diodes laser émettant à des longueurs d'ondes différentes mais assez proches, sans qu'il y ait de mélange entre eux au cours de la propagation. Ainsi un multiplexeur/démultiplexeur optiques pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans/de la fibre. La Figure II.5 représente un exemple d'une liaison utilisant le multiplexage WDM. La fibre optique transporte alors un débit numérique égal à  $N * D_b$ . Cette dernière est souvent définie comme la capacité du système.

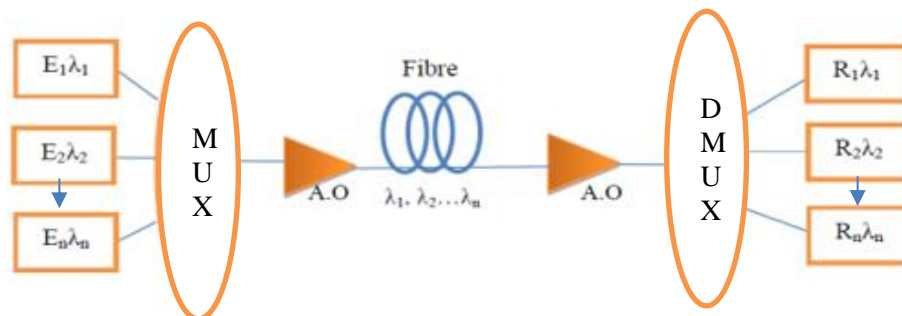


Figure II.2. Principe d'une liaison WDM



### II.1.3.2. Application de WDM: [4]

L'intérêt premier du WDM est de permettre le transport de débits d'informations très importants sur une même fibre, à destination de plusieurs utilisateurs. Les systèmes actuels autorisent 4, 8, 16,32 et même 64 canaux optiques différents. Par exemple chacune pouvant supporter 2,5Gbits/s, on obtient alors des débits de 10, 40,80 et 160Gbits/s. Mais le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission WDM s'est fait lorsqu'il a été associé à l'amplification optique (Figure II.4).

En effet, l'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA) a permis l'amplification simultanée de l'ensemble des N canaux d'un multiplex, sans distorsion du signal utile. Envoyer N canaux dans une fibre optique plutôt que N fibres devenait un avantage économique indiscutable. Si, il y a encore peu de temps, l'espacement entre canaux était de l'ordre de 1nm, le terme de DWDM est maintenant utilisé. En effet, avec l'apparition, sur le marché, de lasers accordables de très bonne qualité, l'espacement entre les longueurs d'onde a pu être progressivement réduit, et est descendu à 0,8 nm ou 0,4nm.

### II.1.4. L'avantage de l'amplification optique :

L'avantage de l'amplification optique est qu'elle permet de préserver la qualité du signal sans nécessiter de conversion en signaux électriques, ce qui peut entraîner une perte de qualité et une augmentation du bruit. De plus, l'amplification optique permet de transmettre des signaux sur de plus longues distances sans nécessiter de répéteurs, ce qui réduit les coûts et améliore l'efficacité des réseaux de communication optique.

### II.1.5. Les inconvénients de l'amplification optique :

Bien que l'amplification optique présente de nombreux avantages, il y a également quelques inconvénients à prendre en compte. Voici quelques-uns des inconvénients les plus importants de l'amplification optique :

**Coût :** Les amplificateurs optiques peuvent être coûteux à produire, à acheter et à entretenir,

**Sensibilité aux fluctuations de température :** Les amplificateurs optiques peuvent être sensibles aux variations de température, ce qui peut affecter leur performance.

**Bruit :** Comme tout amplificateur, les amplificateurs optiques peuvent introduire du bruit dans le signal amplifié. Bien que ce bruit puisse être atténué, il peut toujours être présent à des niveaux perceptibles dans certains cas.

**Consommation d'énergie :** Les amplificateurs optiques peuvent consommer une quantité considérable d'énergie, ce qui peut être un inconvénient pour les applications qui ont des

contraintes strictes en termes de consommation d'énergie.

Malgré ces inconvénients, l'amplification optique reste une technologie très utile et importante dans de nombreux domaines de l'optique et de la communication optique.

### **II.2. Amplificateurs optique :**

Dans la partie suivante on se concentre principalement sur les amplificateurs optiques. Nous commencerons par présenter un aperçu des communications optiques, y compris leur évolution et les améliorations apportées. Nous aborderons ensuite la modélisation des amplificateurs optiques en examinant leurs caractéristiques et les modèles qui les représentent. Enfin, nous aborderons quelques notions importantes sur les processus auto-similaires et les processus ayant une dépendance à longue mémoire .

#### **II.2.1. Définition:**

Les amplificateurs optiques sont des dispositifs qui augmentent le niveau de puissance d'un signal optique. Ils sont utilisés pour amplifier des signaux optiques faibles afin de les transmettre sur de longues distances. Les amplificateurs optiques sont généralement constitués de matériaux semi-conducteurs qui sont sensibles à la lumière .[5]

#### **II.2.1. Les Amplificateurs optiques:**

##### **II.2.1.1. Les Types d'amplificateurs optiques :**

Les premières tentatives de l'application des amplificateurs optiques dans les systèmes de communication optique remontent aux années 60. D'ailleurs les premières expérimentations sur l'amplification utilisaient une fibre dopée aux terres rares qui a été initiée par Koestner en 1964. Mais ces recherches sur les fibres dopées ont été freinées jusqu'à une date très proche faute de l'existence de source continue puissante capable de pomper suffisamment pour pouvoir amplifier les signaux. [5]

##### **II.2.1.1.A Amplificateurs à semi-conducteur :**

Ceci a permis de s'intéresser aux **amplificateurs à semi-conducteur** et surtout à la suite des progrès réalisés sur les lasers à semi-conducteur qui fonctionnent en continu avec une fiabilité acceptable. Toutefois, ces recherches ont été freinées aussi puisque ces amplificateurs présentaient une sensibilité à la polarisation des signaux et au problème de diaphonie.

##### **II.2.1.1.B Amplificateurs à semi-conducteur :**

A ce moment là, une équipe dirigée par Payne [6] à l'université de *Southampton* a mené des recherches qui ont permis d'aboutir en 1987 par la présentation du premier **amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA)**. Aujourd'hui, ces amplificateurs sont utilisés dans le domaine

des transmissions de longue distance dans la bande de 1550nm, alors que les amplificateurs à semi-conducteurs qui sont devenus moins sensibles au phénomène de polarisation, se sont spécialisés dans les applications fonctionnant dans la bande 1300nm.

Ce regain d'intérêt est justifié par de nombreux avantages offerts, à savoir un faible niveau de bruit, une diaphonie réduite, la simplicité dans l'implémentation, la flexibilité de l'utilisation des longueurs d'ondes des signaux (puisque le profil de gain dépend uniquement de la longueur d'onde de la pompe et non pas, comme dans le cas des EDFAs, des sections efficaces du dopant). Toutefois, les EDFAs se sont montrés plus attractifs pour être utilisés dans les systèmes de communication à fibre optique. Lorsqu'on les compare aux amplificateurs à semi-conducteurs, les avantages des EDFAs incluent plusieurs facteurs, parmi eux on cite [7] :

- Faible consommation électrique
- Bande de fréquence plus large et Bruit faible.

### **II.2.1.2. Architecture & Configuration :**

Il existe deux architectures différentes et trois configurations possibles pour un amplificateur à fibre dopée erbium (EDFA). L'EDFA peut être à un seul étage ou à double étages, l'architecture la plus courante étant celle à un seul étage. Cependant, avec la demande croissante de capacité et la nécessité d'utiliser des amplificateurs supplémentaires au niveau des nœuds d'accès, il est possible que ce choix change à l'avenir. Pour répondre à ces besoins, il est nécessaire d'avoir des EDFAs offrant plus de gain et moins de bruit. L'architecture à double étages peut répondre à ces deux exigences en incorporant un filtre entre les deux étages pour éliminer la partie du bruit ASE développée par le premier étage.

En ce qui concerne les configurations possibles, un amplificateur à fibre dopée erbium (EDFA) peut avoir trois méthodes différentes de pompage. Il est possible d'utiliser le même sens de pompage que celui des signaux, un sens contraire ou deux sources de pompage.

### **II.2.2. Modélisation des amplificateurs dopés à l'erbium :**

Avec tout l'intérêt qui a été porté aux EDFA et parallèlement aux travaux expérimentaux qui ont été réalisés, plusieurs tentatives de modéliser théoriquement les EDFA ont été effectuées. L'objectif de ces modélisations est d'une part l'optimisation des amplificateurs et des réseaux et d'autre part la détermination du gain, du spectre et des puissances de sortie. D'ailleurs, la première tentative de modélisation est celle qui a été présentée par Giles et Desurvive [8].

#### **II.2.2.1. Les caractéristiques des fibres dopées à l'erbium:**

Le phénomène fondamental dans un amplificateur à fibre est que l'inversion de population est

créée par la source de pompage, ce qui permet d'exciter les ions  $Er^{3+}$  et de les rendre actifs. Cela conduit à l'amplification des signaux d'entrée.

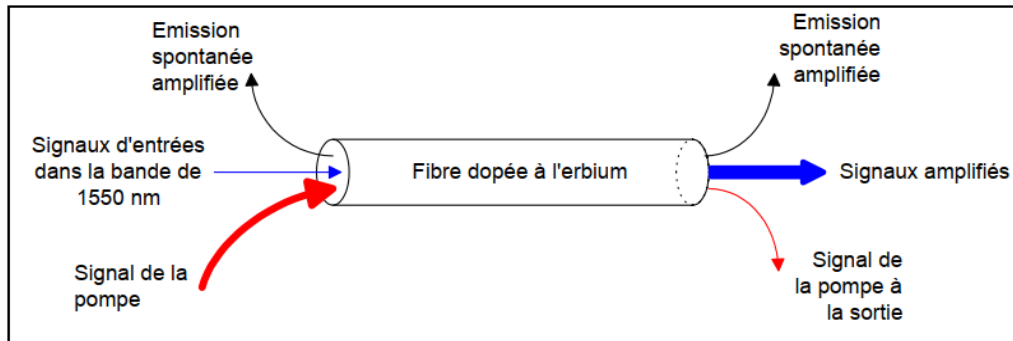


Figure II.3. Représentation d'une amplification dopée à l'erbium

### II.2.2.2. Choix de l'erbium :

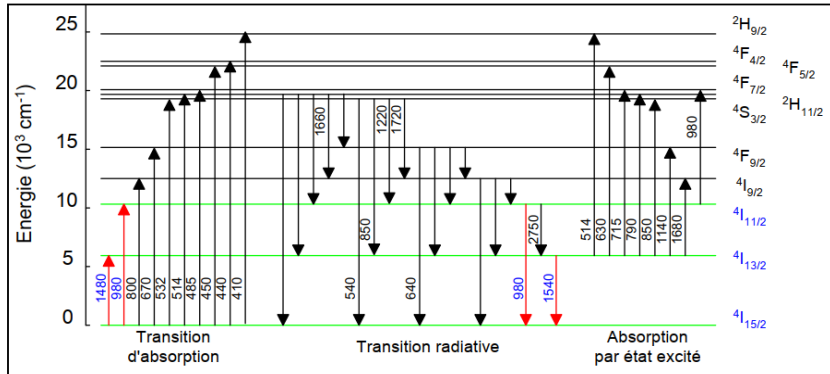
Parmi les critères de choix, qui ont été utilisés pour déterminer le meilleur dopant capable d'amplifier les signaux optiques, on cite [9] :

1. La longueur de transition du laser doit être proche de 1,31 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 correspond à la transition débutant du niveau fondamental doit être proche de la région infra-rouge (800 à 1500 nm).
3. Les transitions des signaux et de la pompe doivent être libres de l'effet de l'état d'absorption excité.

Les critères évoqués ont limité la sélection des matériaux à la famille des lanthanides ou des terres rares, comprenant le praséodyme ( $Pr^{3+}$ ), le néodyme ( $Ne^{3+}$ ) et l'erbium ( $Er^{3+}$ ). L'erbium est le plus couramment utilisé car il fournit une transition amplificatrice à la longueur d'onde de 1550 nm, qui correspond à la région présentant le profil de gain le plus homogène.

### II.2.2.3. Les niveaux d'énergie de l'erbium :

La figure suivante montre les niveaux d'énergie correspondant à chaque état atomique possible :



**Figure II.4. le diagramme des niveaux d'énergie visualisant les transitions possibles [9]**

La figure (II.4) permet de visualiser les transitions possibles dans la région visible et infrarouge, qui correspond à la région de la pompe, ainsi que les transitions radiatives. De plus, elle montre la transition de la bande de longueur d'onde 1550 nm, qui commence du niveau 4I 13/2 (niveau excité) et se termine au niveau 4I 15/2 (niveau fondamental).

Cela nous permet de nous limiter dans la modélisation des amplificateurs dopés à l'erbium aux niveaux d'énergie suivants : 4I 11/2, 4I 13/2 et 4I 15/2, qui correspondent respectivement au niveau excité, au niveau métastable et au niveau fondamental.

Cependant, il est possible que des transitions vers des niveaux supérieurs (absorption par état excité) soient induites par la pompe ou par les signaux. Dans ce cas, des électrons peuvent tomber de ces niveaux supérieurs vers les niveaux les plus bas selon un processus de transition non radiative. Cela a un effet néfaste sur l'intensité de la pompe et des signaux, ainsi que sur la diminution de la population du niveau fondamental.

### II.2.2.4. Modèle de trois niveaux d'énergie :

#### II.2.2.4.1. Présentation du modèle de trois niveaux d'énergie :

Comme décrit précédemment, le modèle le plus simple capable de modéliser les(EDFA) prend en compte les trois niveaux d'énergie 4I 11/2, 4I 13/2 et 4I 15/2.

Les ions d'erbium sont excités à des niveaux supérieurs par l'absorption de la lumière provenant de la pompe à 980 nm (4I 11/2) ou à 1480 nm (4I 13/2). Pour retourner à une distribution d'énergie équilibrée, les ions excités retournent à un niveau d'énergie inférieur à travers l'une des deux processus suivants :

L'émission spontanée est un phénomène où les ions retournent spontanément à un niveau d'énergie inférieur après un certain temps, qui n'est autre que le temps de vie de l'état visité.

L'émission stimulée se produit lorsque les ions excités entrent en contact avec des photons incidents, qui ont pour origine les signaux d'entrée. Les photons stimulent les ions excités à émettre des photons supplémentaires, créant ainsi une émission stimulée.

Les ratios des ions d'erbium pour chaque niveau d'énergie sont notés  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ , dont la somme est égale à 1. Pour obtenir une amplification efficace des signaux d'entrée, il est nécessaire d'avoir une inversion suffisante entre les deux premiers niveaux d'énergie et une puissance de pompe adéquate.

### **II.2.3. Présentation des autres d'amplificateurs optiques :**

Les amplificateurs à semi-conducteurs (SOA) sont des amplificateurs optiques à région dopée en semi-conducteurs offrant des gains élevés et une large bande passante. Cependant, leur bruit de fond élevé limite leur utilisation dans les réseaux optiques à haut débit. Les amplificateurs à guide d'onde dopé à l'erbium (EDFA) utilisent un guide d'onde en silice dopé en erbium pour amplifier le signal optique. Ils ont une bande passante plus étroite mais une taille plus compacte, adaptée aux applications intégrées. Le choix de l'amplificateur optique dépend des besoins spécifiques de l'application en termes de bande passante, de gain, de bruit de fond et de coût.

#### **II.2.3.1. Les amplificateurs semi-conducteurs:**

Les amplificateurs semi-conducteurs, également appelés SOA, sont des lasers semi-conducteurs dotés de miroirs de faible réflexion aux deux extrémités. Ils ont été les premiers amplificateurs optiques proposés. La lumière est guidée à travers un milieu de gain à travers lequel elle émet dans des directions aléatoires. Ce milieu de gain peut être excité par une pompe électrique ou optique, ce qui permet de relaxer des particules cohérentes avec le signal. Les SOA peuvent fournir du gain pour différentes longueurs d'onde et peuvent également être utilisés comme lasers semi-conducteurs.

Cependant, les SOA ont quelques limitations. Leur gain n'est pas plat comme celui des EDFA, ce qui les rend plus adaptés aux applications utilisant une seule longueur d'onde plutôt que plusieurs. De plus, ils sont réputés pour être bruyants en raison de l'émission de lumière dans différentes directions avec des longueurs d'onde et des phases différentes. Les SOA présentent également une dépendance à la polarisation et ont une puissance de sortie limitée, ce qui les limite en tant qu'amplificateurs de puissance. Cependant, les SOA ont l'avantage d'avoir une réponse rapide au signal d'entrée, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant une porte optique rapide ou une conversion de longueur d'onde. Dans les systèmes de routage optique,

ils peuvent être utilisés comme amplificateurs ainsi que pour d'autres fonctions.

### **II.2.3.2. Les amplificateurs à guide d'onde dopés :**

Les amplificateurs à guide d'onde dopés sont une évolution des amplificateurs à fibre dopée qui sont entièrement réalisés dans un substrat planaire. Cette construction permet une intégration facile avec d'autres composants planaires tels que les diviseurs de puissance ou les multiplexeurs. Les amplificateurs à guide d'onde dopés à l'erbium maintiennent la polarisation contrairement aux EDFA, mais ils sont moins sensibles à la température. En outre, ils sont moins coûteux que les EDFA, ce qui les rend attrayants pour les déploiements futurs. Cependant, il reste des problèmes à résoudre avec les amplificateurs à guide d'onde dopés. Le couplage entre la fibre et le guide d'onde est un problème, tout comme les pertes de propagation. Pour compenser les pertes de propagation, il y a un compromis à trouver entre le niveau de dopage et les pompes utilisées. Si le niveau de dopage est trop élevé, les pompes nécessaires peuvent causer des problèmes de diffusion (scattering du signal). En revanche, si le niveau de dopage est trop faible, le niveau de gain par unité de longueur sera également faible, ce qui nécessitera des guides d'onde plus longs.

### **II.2.4. Conclusion:**

L'amplification optique est basée sur le phénomène d'émission stimulée, où le signal est amplifié dans un guide (semi-conducteur ou fibre) grâce à un apport d'énergie externe appelé "pompage". Ce pompage peut être réalisé par l'injection d'un courant ou par l'utilisation d'une source de lumière. Lorsqu'un photon incident provoque la recombinaison électron-trou, un deuxième photon est émis, ayant la même fréquence, phase et direction que le photon incident. Cette émission stimulée entraîne une amplification du signal.

En plus de l'émission stimulée, la recombinaison électron-trou peut également se produire sans la présence d'un photon incident, ce qui génère des photons spontanés émis de manière non cohérente. Ces photons spontanés contribuent au bruit de l'amplification optique. Tous les photons, qu'ils soient d'origine ou spontanés, subissent une série d'amplifications, ce qui amplifie également les photons spontanés. Cela crée une source de bruit appelée "Emission Spontanée Amplifiée" (ESA). Dans ce chapitre on a fait une étude sur l'amplification optique et les différents types de d'amplificateurs, les caractéristiques de chacun et les leurs applications dans les télécommunications optiques.

### Bibliographie de chapitre 2

- [1] A. Boyoguéno Bendé, M. A. Duguay, P. Fortier. Étude sur l'amplification en ligne des systèmes de communication optique, 1995.
- [2] Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40Gbits/s : Jean-Louis VERNEUIL( UNIVERSITE DE LIMOGES, 21 novembre 2003).
- [3] Transmission par fibres optiques: Mr. SIDI Ali Mebarek : INTTIC Oran.
- [4] FRANCE TELECOM, *Les communications optiques du futur*, Mémento Technique n°19, juin 2002, pp. 7-27.
- [5] C.J. Koestner, E. A. Snitzer "Amplification in a fiber laser", *Applied Optics*, Vol. 3, 1964.
- [6] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jaucey, D. N. Payne "Low-Noise Erbium-Doped Fiber operating in 1,54 mm", *Electronic Letters*, Vol. 23, 1987.
- [7] E. Desurvire "Erbium-Doped Fiber Amplifiers: principles and applications", *A Wiley Inter-science Publication*, 1994.
- [8] C. R. Giles & E. Desurvire "Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers", *Journal of Lightware Technology*, Vol. 9, N° 2, Février 1991.
- [9] E. Desurvire "Erbium-Doped Fiber Amplifiers: principles and applications", *A Wiley Inter-science Publication*, 1994.



*Chapitre III*

**Simulation et  
Interprétation des  
résultats**

### **Introduction:**

Ce chapitre présente notre travail en utilisant OptiSystem, un outil de simulation optique utilisé dans la conception de systèmes de communication optiques. Ce logiciel fournit une interface graphique conviviale permettant aux utilisateurs de modéliser et de simuler des systèmes optiques complexes, y compris des systèmes de transmission optique, des réseaux de capteurs optiques, des systèmes de communication par satellite et des systèmes de télécommunications à haut débit.

Le logiciel comprend une bibliothèque complète de composants optiques, y compris des sources de lumière, des fibres optiques, des amplificateurs, des modulateurs, des démodulateurs et des détecteurs, ainsi que des outils d'analyse de signal avancés tels que des oscilloscopes, des analyseurs de spectre et des analyseurs de phase. Les utilisateurs peuvent également ajouter leurs propres composants personnalisés en utilisant des langages de programmation tels que MATLAB et C++.

OptiSystem est conçu pour être utilisé par les chercheurs, les ingénieurs et les étudiants travaillant dans le domaine de la communication optique. Le logiciel permet aux utilisateurs de simuler et d'optimiser des systèmes optiques avant leur mise en œuvre, ce qui peut réduire considérablement les coûts de développement et de test [1].

Nous nous concentrerons également sur trois techniques d'amplification optique, à savoir l'amplification par fibre dopée à l'erbium (EDFA) et l'amplification par amplificateur optique à semi-conducteur (SOA).

### **III.1.Logiciel Optisystem:**

#### **III.1.2Présentation du logiciel OptiSystem:**

Logiciel OptiSystem développé par Optiwave Canada logiciel de conception des systèmes de communication optique utilisés par les ingénieurs et les chercheurs pour la conception, la simulation et l'analyse la distribution optique dans le système de communication. De nombreux systèmes de simulation évolutifs insèrent une fonction définie par l'utilisateur que nous pouvons ajouter à notre système de simulation. Testent et optimisent pratiquement tous les types de liaison optique sur lesquels nous comptons, pour une modélisation réaliste des systèmes de communication par fibre optique[2].

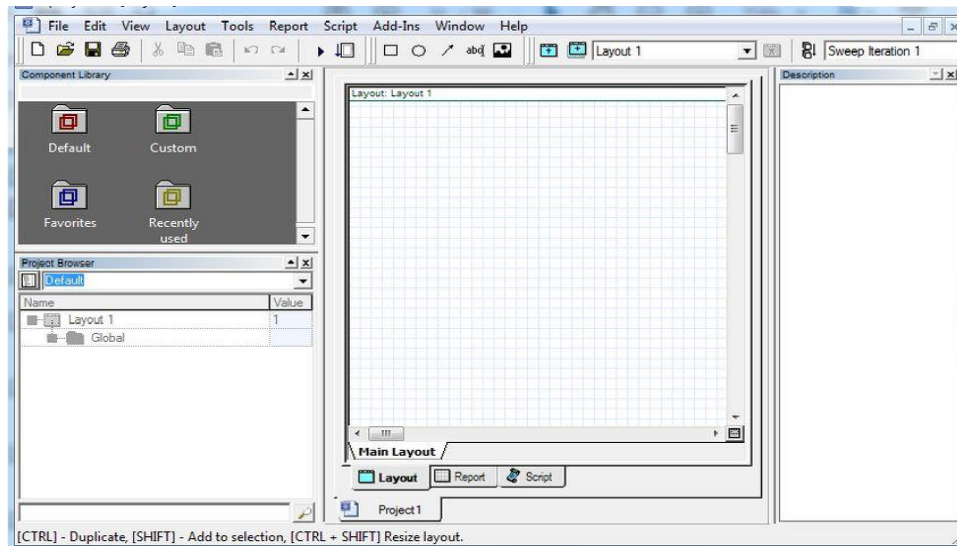


Figure III.1. Schéma de l'interface OptiSystem

### III.1.3. Interface d'Optisystem :

- **Bibliothèque** : une base de données de divers composants existants,
- **Editeur du layout** : Permet la modification et l'ajustement du schéma pendant le processus de conception.
- **Projet en cours** : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.

### III.1.4. Principales caractéristiques du logiciel Optisystem :

- Les éléments simulés présents dans la bibliothèque peuvent recréer avec précision les mêmes effets et comportements que les composants réels, en fonction de la précision sélectionnée, tout en maintenant une efficacité équivalente.
- La bibliothèque de composants permet de saisir les paramètres mesurables à partir de périphériques réels et peut être intégrée aux équipements de test pour mesurer des équipements de différents fournisseurs.
- Il est faisable de connecter un nombre quelconque de périphériques sur le même port du moniteur.
- Les outils de visualisation sophistiqués permettent la génération du signal sonore, des diagrammes de l'œil, de l'état de la polarisation, des schémas de constellation.

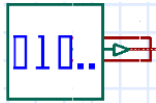
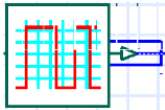

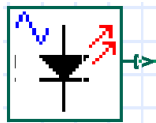

### III.1.5. Applications D’optisystem [3] :

- Amplificateurs et lasers (EDFA, SOA, hybride, optimisation GFF, Lasers à fibre).
- Estimation du BER et des pénalités du système avec différents modèles de récepteur.
- BER système amplifié et calculs du budget de liaison.
- Transmission monomode / multimode.
- Conception de système de communication optique du composant au niveau du système au niveau de la couche physique.
- Conception de l'émetteur, du canal, de l'amplificateur et du récepteur

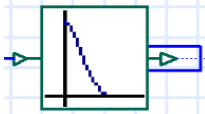
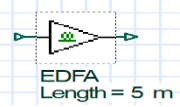
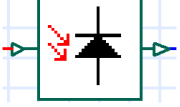
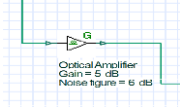

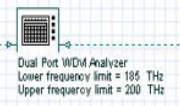

### III.1.6. Avantage du logiciel Optisystem :

- 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.

### III.1.7. Le rôle de composante dans la chaine de transmission :

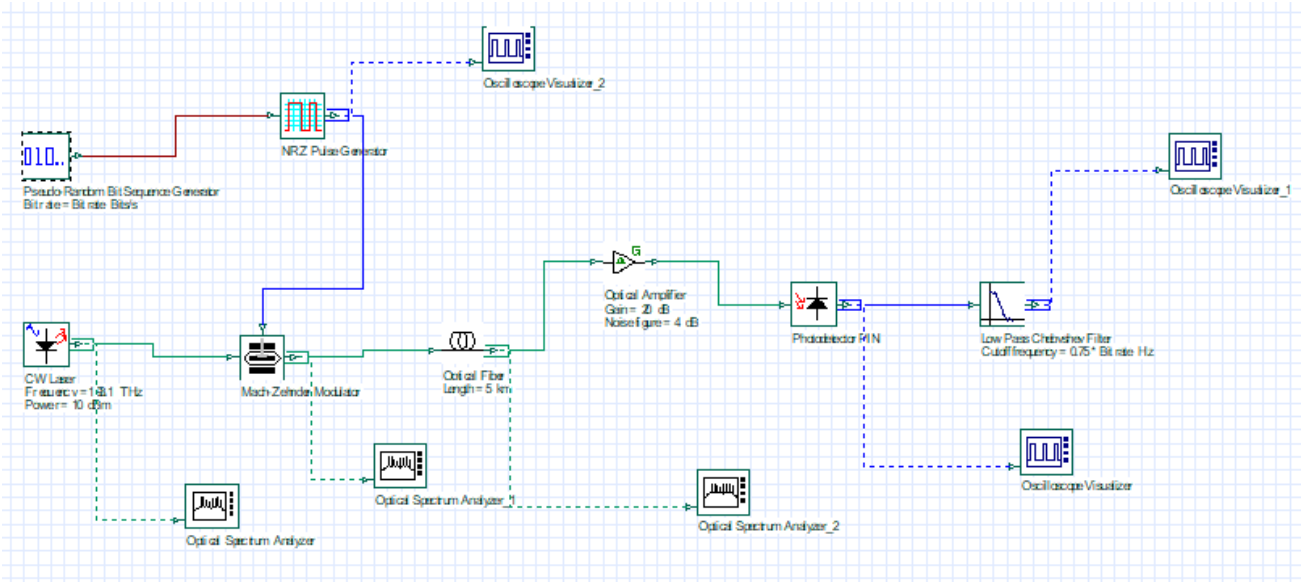
Les Composants	Les Role
	Pseudo-Random Bit Sequence Generator: Un générateur de nombres pseudo-aléatoires (PRNG), également appelé générateur de bits aléatoires déterministes (DRBG), est un algorithme permettant de générer une séquence de nombres dont les propriétés se rapprochent des propriétés de séquences de nombres aléatoires.
	NRZ Pulse Generator : Le générateur d'impulsions NRZ génère un signal électrique codé de non-retour à zéro qui dépend d'une entrée de séquence de bits. Étant donné que la sortie du générateur d'impulsions dépend d'une séquence de bits, nous allons connecter un générateur de séquence de bits défini par l'utilisateur à son entrée.
	Mach-Zehnder Modulator : Un modulateur de Mach-Zehnder est utilisé pour contrôler l'amplitude d'une onde optique qui lui est donnée. Le guide d'onde d'entrée est divisé en deux bras d'interféromètre de guide d'onde. Si une tension est appliquée sur l'un des bras, un déphasage est induit pour l'onde traversant ce bras.
	CW LASER : Une onde continue ou forme d'onde continue (CW) est une onde électromagnétique d'amplitude et de fréquence constantes L'onde continue est également le nom donné à une première méthode de transmission radio, dans laquelle une onde porteuse sinusoïdale est activée et désactivée. L'information est transportée dans la durée variable des périodes d'activation et de désactivation du signal.
	Fibres optiques : sont largement utilisées comme composants de capteurs chimiques optiques et de biocapteurs optiques. La fibre optique peut être utilisée pour transmettre de l'énergie en utilisant une cellule photovoltaïque pour convertir la lumière en électricité.

## Chapitre III Simulation et Interprétation des résultats

	<p>Filtre de Bessel : est un type de filtre linéaire analogique utilisé dans les applications RF et autres applications électroniques qui a un groupe ou un retard de phase au maximum plat. Cela préserve une forme d'onde des signaux dans la bande passante. Comme on pouvait s'y attendre, le filtre de Bessel fournit une transition plus lente.</p>
	<p>Amplificateur optique : Il peut être utilisé pour augmenter la puissance des signaux optiques qui se sont affaiblis lors de leur propagation à travers la fibre optique, simulant ainsi l'amplification réelle dans un système de communication optique.</p>
	<p>PHOTODÉTECTEUR PIN : Le champ électrique élevé présent dans la région d'appauvrissement provoque la séparation des porteurs photo-générés et leur collecte à travers la jonction polarisée en inverse. Cela donne lieu à un flux de courant dans un circuit externe, appelé photocourant.</p>
	<p>fournir une fonction d'amplification aux signaux optiques dans un système de communication optique simulé. Voici quelques-uns des rôles clés du composant "Optical Amplifier"</p>
	<p>Wideband Traveling Wave SOA : fonctionne selon le principe d'une onde progressive, où le signal optique d'entrée interagit avec le milieu amplificateur sur toute la longueur de l'amplificateur. Cette interaction permet d'amplifier le signal optique sans avoir besoin de composants externes supplémentaires ou de configurations complexes.</p>
	<p>Dual Port WDM Analyzer : est utilisé pour effectuer une analyse et une caractérisation des systèmes de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) à double port.</p>
	<p>Optical Power Meter : est de fournir une mesure précise de la puissance optique d'un signal et de visualiser cette mesure pour faciliter l'analyse et la surveillance des niveaux de puissance optique.</p>

### III.2.1. Simulation:

#### III.2.1.1. Amplification par fibre dopée à l'erbium (EDFA) :



**Figure III.2. Simulation de L'Amplification par fibre dopée à l'erbium**

#### Où nous observons :

Nous avons un émetteur composé de quatre éléments, le premier est un générateur de bits, un générateur d'impulsions et un laser qui transporte ces impulsions contenant les bits. Enfin, le MACH-ZEHNDER gère ces impulsions vers le signal ou le laser. Ensuite, nous passons à l'étape de transmission, la première est la fibre optique, à une distance de 5 km. Maintenant, nous avons besoin d'un amplificateur pour amplifier le signal à sa force car il est passé. Il est atténué sur cette distance, après quoi il est converti en l'électricité, à travers PIN, qui est l'étape de réception, après quoi elle est envoyée au filtre, en raison de la présence de bruits indésirables, il filtre donc ce bruit.

## III.2.1.2. Résultats de simulation :

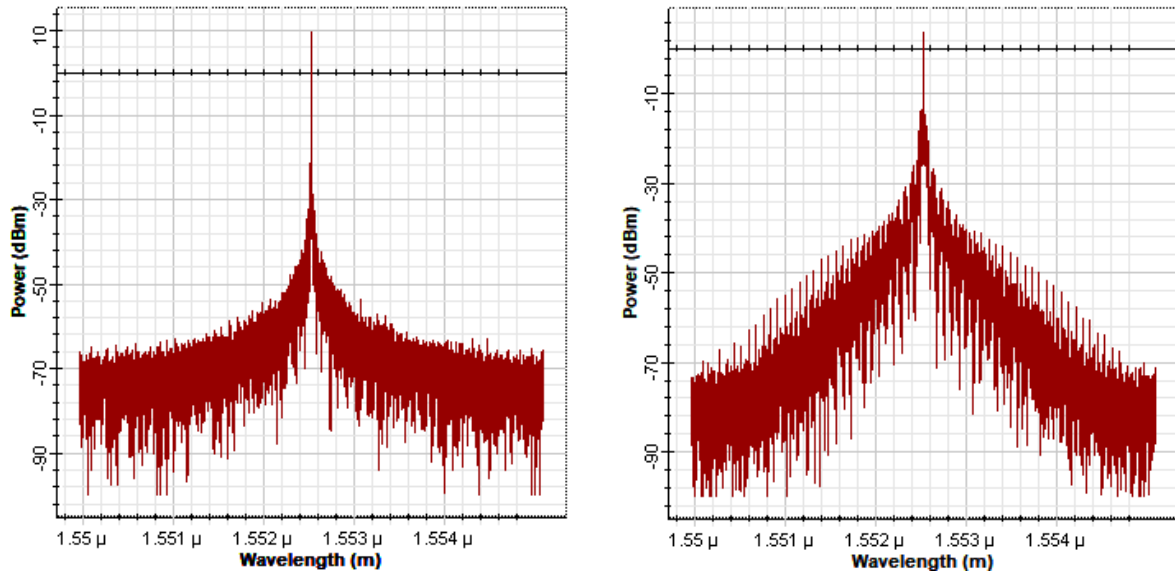


Figure III.3. visualisation des Spectres optiques de signal Pour  $P_e=10$  dBm avant et après la Modulator Mach-Zehnder.

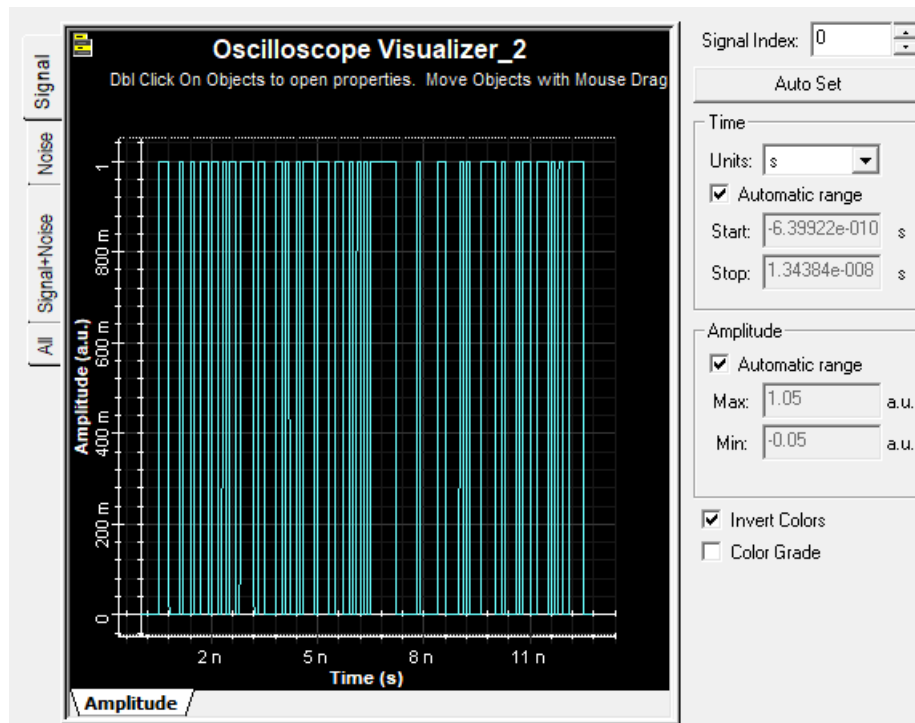
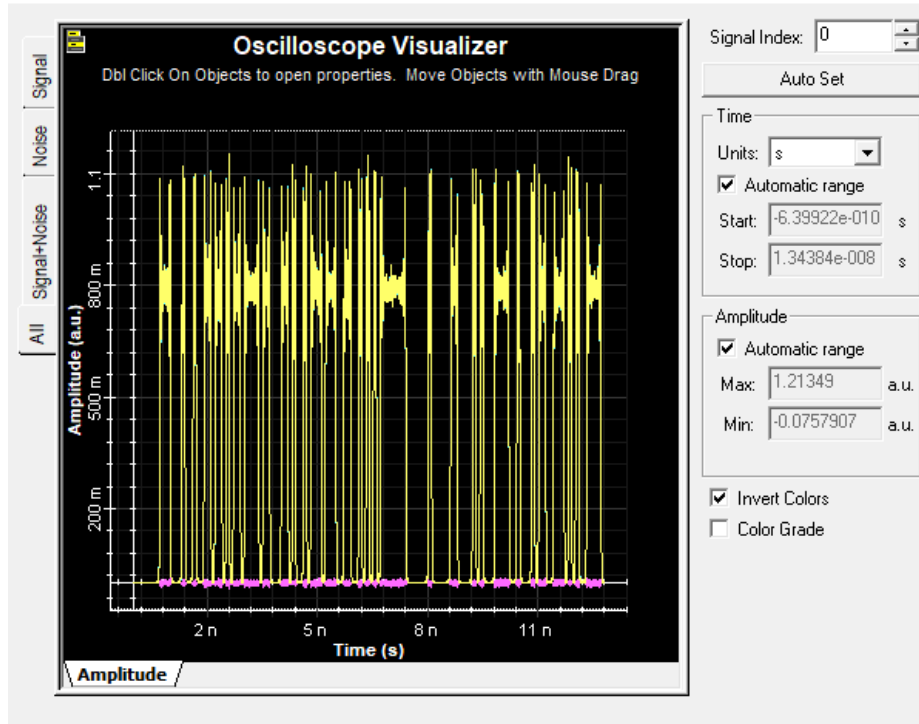
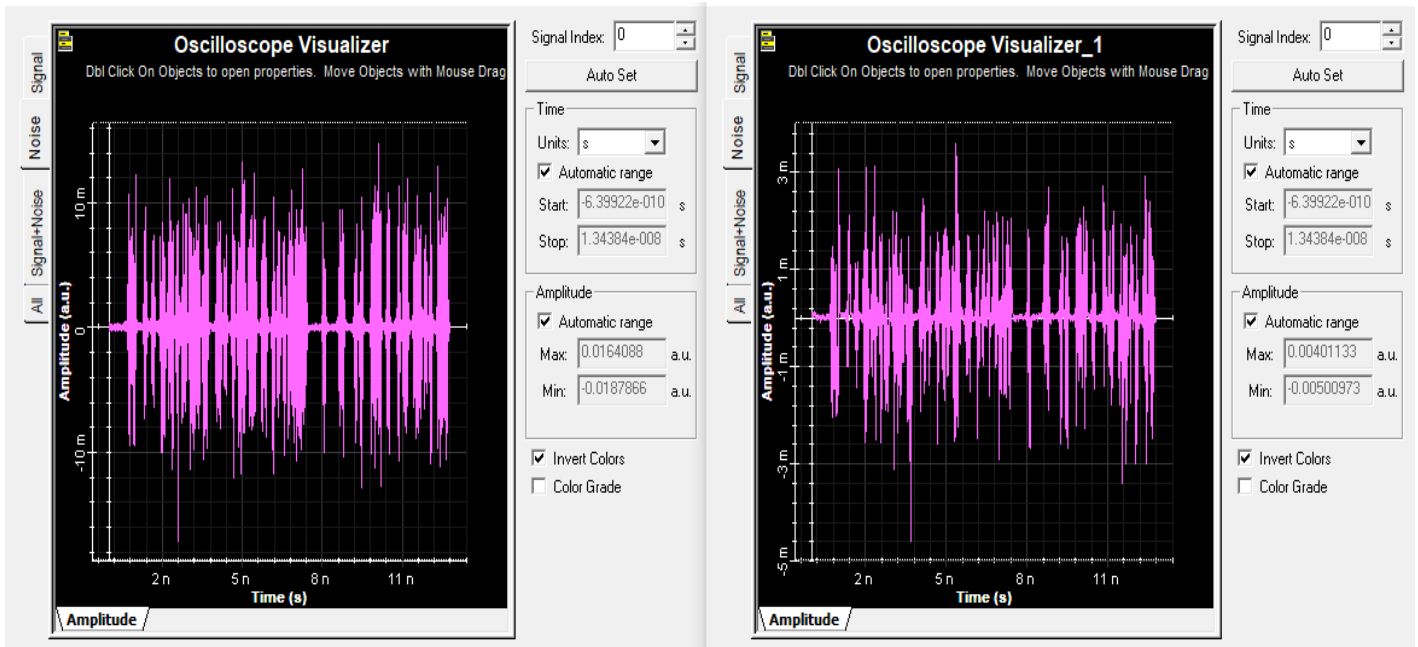


Figure III.4. débit binaire au niveau de l'émetteur



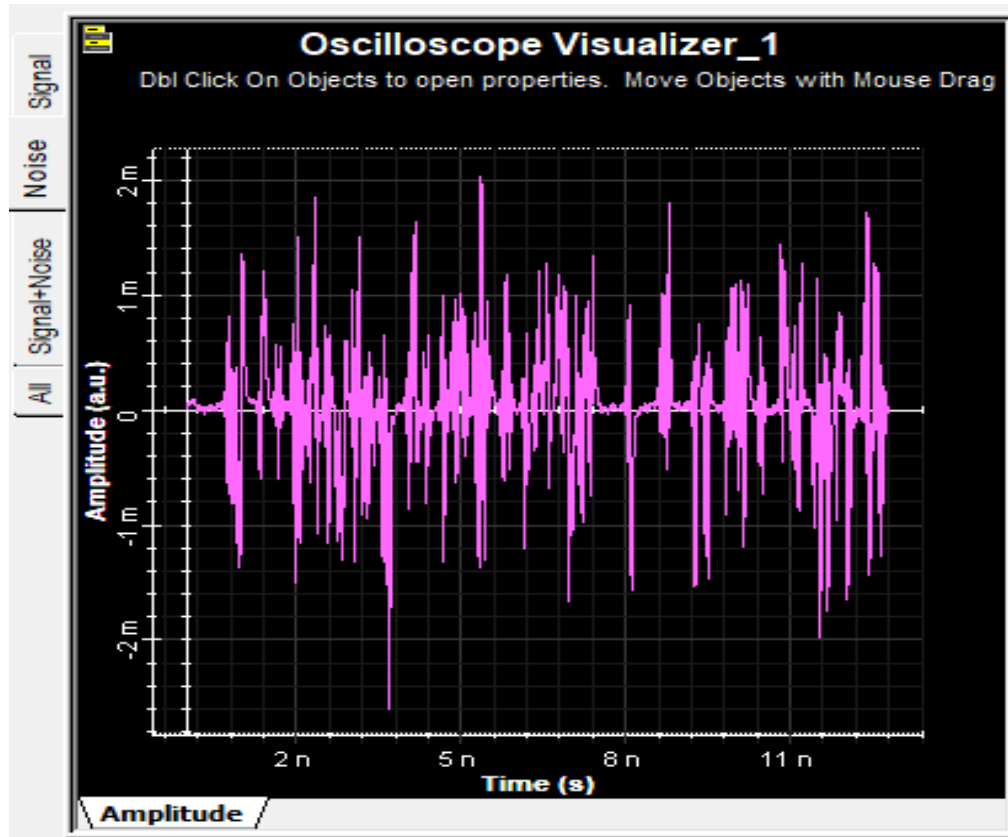
**Figure III.5. débit binaire au niveau du récepteur**

Par rapport au signal de transmission, nous remarquons un net changement dans la réception, qui est une diminution du signal avec la présence de bruit, nous avons donc ajouté le filtre passe-bas Chebyshev, et voici le résultat :



**Figure III.6. Visualisation de bruit avant et après le filtre Pass-bas chebyshev**



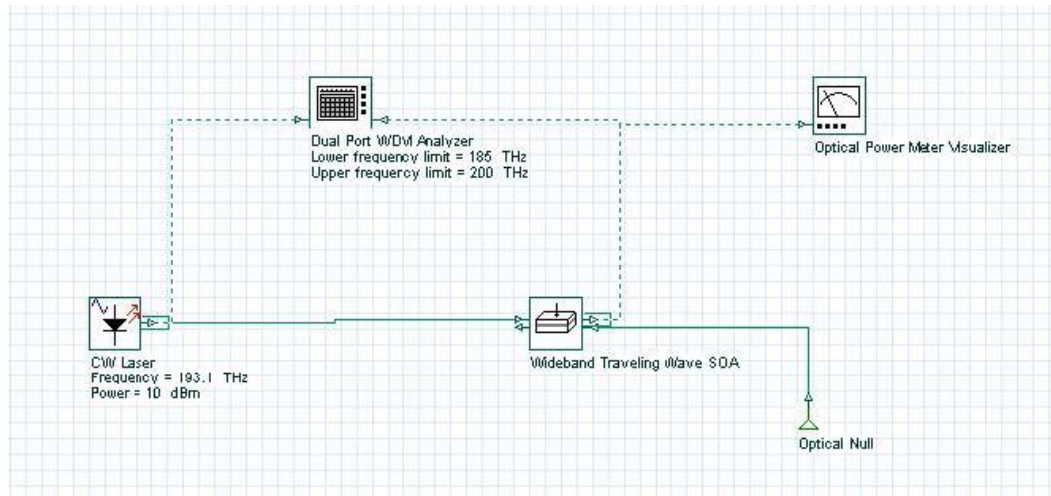


**Figure III.7. Visualisation de bruit le filtre Pass-bas chebyshev pour  $0.20 * \text{Bit rate}$**

Nous avons modifié les paramètres du filtre de pass-bas à  $0,20 * \text{débit binaire}$  Nous avons remarqué une amélioration significative et bonne de la disparition et de l'absence de bruit.

Donc, L'amplificateur EDFA est particulièrement adapté aux applications longue distance dans les réseaux de télécommunication, car il peut amplifier les signaux optiques sur une large gamme de fréquences sans les convertir en signaux électroniques. Il est utilisé dans plusieurs amplificateurs le long du réseau pour maintenir la puissance du signal

## III.2.3. Amplification optique à semi-conducteur:

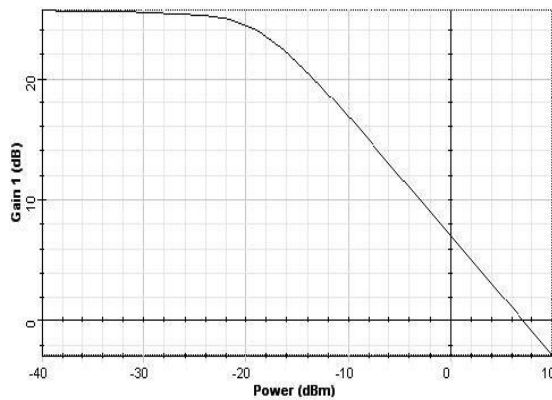


**Figure III.8. simulation de Amplification optique à semi-conducteur**

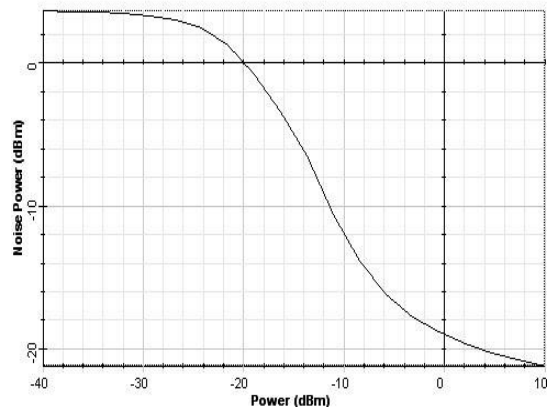
Où nous observons :

Le signal est envoyé à wideband traveling wave Soa où le signal optique d'entrée interagit avec le milieu de gain sur la longueur de l'amplificateur. Cette interaction permet l'amplification du signal optique sans avoir besoin de composants externes supplémentaires ou de configurations complexes. À l'intérieur d'un analyseur WDM à deux ports, il mesure la puissance et estime le bruit avant et après l'amplification

### III.2.3.1. Simulation:



**Figure III.9. gain du signal**



**Figure III.10. puissance ASE totale à la sortie SOA**

Nous analysons la variation du spectre de bruit lorsque la puissance du signal d'entrée change. Dans ce cas, le bruit direct a été analysé. La figure 8 montre les spectres pour 4 puissances d'entrée différentes : -30 dBm, -20 dBm, -10 dBm et 0 dBm.

Les Résultats dans l' « optical power meter » Pour chaque Puissance :

- Pour une puissance d'entrée de 10 dBm, la puissance mesurée est de  $6.188e^{-3}$  W et 7.915 dBm.
- Pour une puissance d'entrée de -30 dBm, la puissance mesurée est de  $2.984e^{-3}$  W et 4.749 dBm.
- Pour une puissance d'entrée de -20 dBm, la puissance mesurée est de  $4.491e^{-3}$  W et 6.524 dBm.
- Pour une puissance d'entrée de -10 dBm, la puissance mesurée est de  $6.070e^{-3}$  W et 7.831 dBm.
- Pour une puissance d'entrée de 0 dBm, la puissance mesurée est de  $6.163e^{-3}$  W et 7.898 dBm.

Ces résultats montrent une variation de la puissance mesurée en fonction de la puissance d'entrée du signal. Nous pouvons observer que la puissance mesurée augmente avec l'augmentation de la puissance d'entrée. Cela indique une relation directe entre la puissance du signal d'entrée et la puissance mesurée.

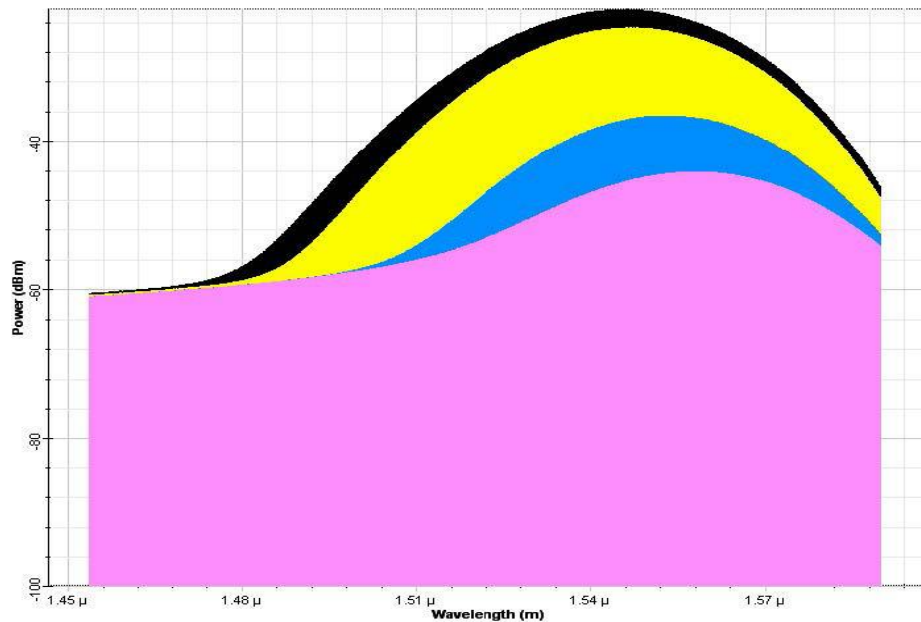


Figure III.11. Spectres de bruit pour différentes puissances de signal d'entrée

### III.2.3.2. Discussions sur les résultats:

Pour le bruit, nous avons observé que la puissance de crête du bruit augmente dès que la puissance du signal d'entrée diminue. Cela peut être observé dans la figure III.11, qui présente les spectres pour différentes puissances d'entrée, notamment -30 dBm, -20 dBm, -10 dBm et 0 dBm. En comparant ces spectres, nous pouvons clairement voir une augmentation de la puissance de crête du bruit avec la diminution de la puissance du signal d'entrée. Cela suggère qu'une diminution de la puissance du signal d'entrée entraîne une augmentation du bruit associé au signal.

### III.2.4. Les amplificateurs à fibre optiques les plus courants:

Les amplificateurs à fibre optique EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), SOA (Semiconductor Optical Amplifier), mais ils ont des caractéristiques et des applications différentes.[4]

#### III.2.4.1. Amplificateur EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) :

L'EDFA est le type d'amplificateur à fibre optique le plus couramment utilisé en raison de sa large bande passante et de sa grande puissance de sortie. L'EDFA utilise un dopage à l'erbium pour amplifier les signaux optiques dans une fibre optique. Les signaux optiques passent à travers la fibre optique dopée à l'erbium, où ils sont amplifiés par l'absorption et l'émission stimulée de photons par l'erbium. Les EDFA sont utilisés dans les systèmes de communication optique à longue distance tels que les réseaux de télécommunications.

#### III.2.4.2. Amplificateur SOA (Semiconductor Optical Amplifier):

Le SOA est un amplificateur à fibre optique à semi-conducteur qui utilise une diode à semi-conducteur pour amplifier les signaux optiques. Les SOA sont capables de fournir un gain élevé et un temps de réponse rapide, mais leur bande passante est limitée et ils ont une figure de bruit élevée. Les SOA sont utilisés dans les systèmes de communication optique à courte distance tels que les réseaux locaux (LAN) et les réseaux de stockage.

### III.2.6. Contenu d'un extrait d'étude de ces amplificateurs :

Enfin, l'étude de ces amplificateurs implique également une analyse des applications dans lesquelles ils sont couramment utilisés. Les EDFA sont utilisés dans les réseaux de télécommunications à longue distance, tandis que les SOA sont utilisés dans les réseaux de communication à courte distance.

### III.2.7. Comparaison :

Les amplificateurs à fibre optique EDFA, SOA sont des amplificateurs optiques qui sont largement utilisés dans les systèmes de communication optique. Voici une comparaison entre ces deux types d'amplificateurs à fibre optique (Tableau et analyse comparative) :

### III.2.7.1. Tableau de comparaison :

Tableau.1 comparaison entre les deux amplificateurs

Paramètres	EDFA	SOA
Longueur d'onde	1530 à 1565 nm	1500 à 1600 nm.
Bruit	3 à 9 dB	8
Gain	15 to 30 dB	20 >
Bande passante	1530 – 1620 nm	50 nm
Sensibilité de Polarisation	Non	Oui
Max Saturation en dBm	+20 dBm	+10 dBm
Effet non linéaire	Non	Oui
Puissance de sortie	40 dBm	20dBm
Coût	haut coût financier	Généralement moins cher

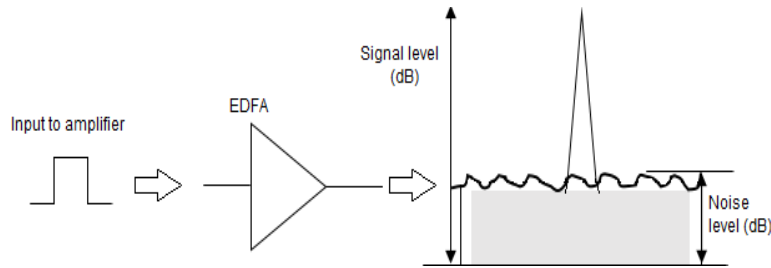
### III.2.6. Étude sur les Amplificateurs à Fibre Dopée à l'Erbium (EDFA)

La propagation d'impulsions optiques sur un réseau optique subit des pertes dues aux effets de dispersion et de non-linéarité, ce qui entraîne un besoin d'amplification. L'amplificateur couramment utilisé est l'amplificateur de rétroaction dopé à l'erbium (EDFA) [5]. L'EDFA est couramment utilisé en raison du fait que dans la communication optique à longue portée, il amplifie efficacement la longueur d'onde de la lumière là où les fibres de télécommunication ont une perte minimale [6].

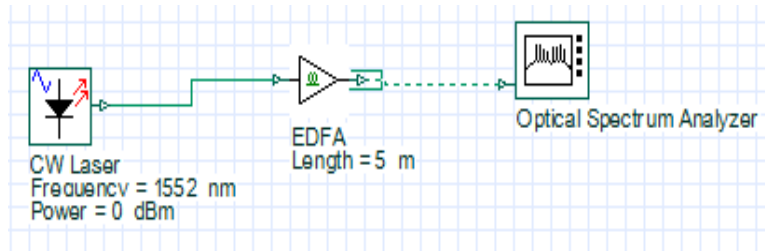
Le réseau optique subit également des effets de dégradation dus à diverses formes de dispersion telles que le mélange à quatre ondes (FWM) [7], qui interfère et dégrade la sortie du signal transmis [8]. Dans ce travail, la performance des caractéristiques EDFA a été étudiée en observant l'ASE sous une puissance d'entrée variable de -30dB à -20dB en utilisant le simulateur OptiSystem [9] et par conséquent le Rapport Signal optique sur Bruit (OSNR) a été obtenu. Dans la deuxième partie de ce travail, un réseau optique DWDM est configuré pour observer la caractéristique de l'EDFA en utilisant quatre longueurs d'onde différentes dans la bande C [6].

**III.2.6.1. Simulation des caractéristiques des EDFA :**

La configuration de simulation a été connectée comme illustré à la figure III.11, la chaîne de transmission est constituée d'un module laser à ondes continues, d'un module EDFA et d'un analyseur de spectre optique. L'émetteur fonctionnait à 1550 nm et la puissance du laser était réglée entre -30dB et -20dB et la sortie était mesurée à l'analyseur de spectre optique. L'ASE, la puissance de sortie et le rapport signal / bruit optique (SNR) ont été mesurés à partir de la sortie.



**Figure III.12. Amplificateur à étage unique et bruit associé au signal [10]**



**Figure III.13. Configuration de la simulation EDFA**

$$Gain = \frac{outputpower}{inputpower} \quad OSNR = \frac{outputpower}{ASE}$$

**III.2.6.2 Configuration et Simulation des Caractéristiques du réseau WDM :**

La simulation a été réalisée en remplacement d'un montage expérimental réel. Compte tenu du coût élevé des câbles à fibres optiques, il n'est pas assez facile de réaliser un véritable montage expérimental. De plus, compte tenu de la complexité de la structure et du coût élevé du système, il n'est pas pratique d'optimiser les performances de ces deux amplificateurs par expérimentation [11]. Cependant, les résultats obtenus dans ce travail étaient cohérents avec les résultats d'autres travaux de recherche.

Le simulateur a été configuré pour effectuer des tests sur le FWM sur la base de connaissances théoriques familières dans les systèmes à fibres optiques. Le simulateur utilise les effets d'atténuateur de liaison, représentés par une variable (VOA) insérée avant l'amplificateur. À la fin, l'atténuation du signal optique peut être obtenue comme [12]:

$$\vec{E}_{outX,F}(t) = \vec{E}_{inX,F}(t) 10^{-\alpha/20} \dots\dots\dots VIII.$$

Ou  $\vec{E}_{X,F}(t)$  est le vecteur champ électrique (polarisation en x et y) et  $\alpha$  est l'atténuation (dB).

Le modèle de fibre optique utilisé simule la propagation du champ électrique dans une fibre monomode avec des effets de dispersion et non linéaires considérés à partir de l'intégration numérique de l'équation de Schrödinger non linéaire (NLS) [13].

Le réseau WDM a été configuré comme illustré à la figure 3. Les quatre émetteurs représentent quatre longueurs d'onde FRAME = 1560 nm, ESI 1 = 1550 nm, ESI 2 = 1541 nm, ESI 3 = 1532 nm à travers la bande C.

La configuration consistait en un multiplexeur, un EDFA, deux liaisons de fibre de longueur 50 km chacune, un démultiplexeur, quatre récepteurs optiques chacun pour chaque longueur d'onde, des analyseurs BER pour visualiser le diagramme de l'œil correspondant, deux analyseurs de spectre optique (OSA) pour observer l'OSNR. Les résultats sont présentés dans les paragraphes suivants.

### III.2.6.3. Configuration et Simulation des caractéristiques du mélange à quatre ondes FWM (Four Wave Mixing):

L'expérience a été configurée comme le montre la Figure 13 où le réseau optique se composait de quatre émetteurs optiques avec une longueur d'onde située dans la bande C avec un inter espace de 50 GHz, un multiplexeur, une liaison câblée de 100 km de longueur de fibre et un amplificateur EDFA. La longueur d'onde de l'émetteur était  $\lambda = 1550.52 \text{ nm}$ ,  $\lambda_1 = 1550.12 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 1549.72 \text{ nm}$ ,  $\lambda_3 = 1549.42 \text{ nm}$  respectivement. Les puissances mesurées à l'entrée et à la sortie de la fibre sont présentées dans le tableau 3.

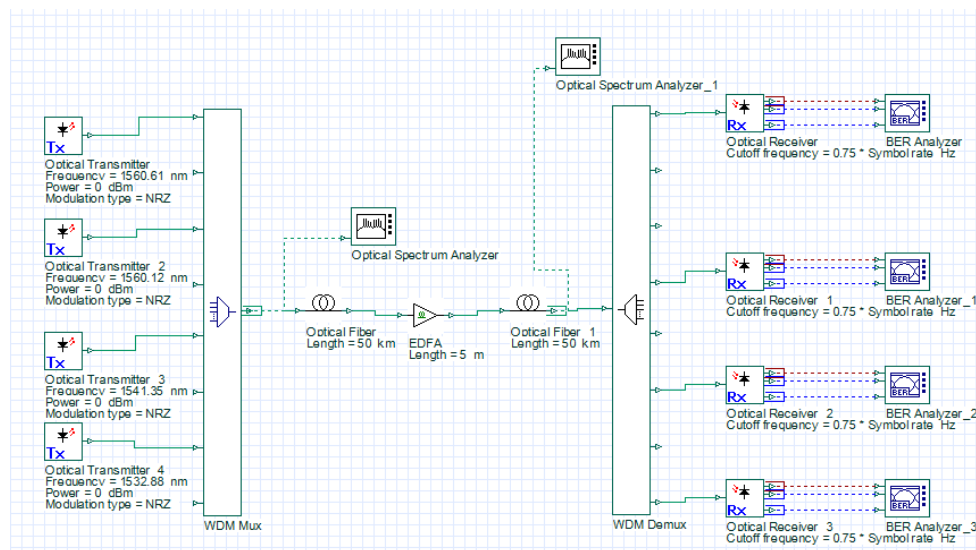
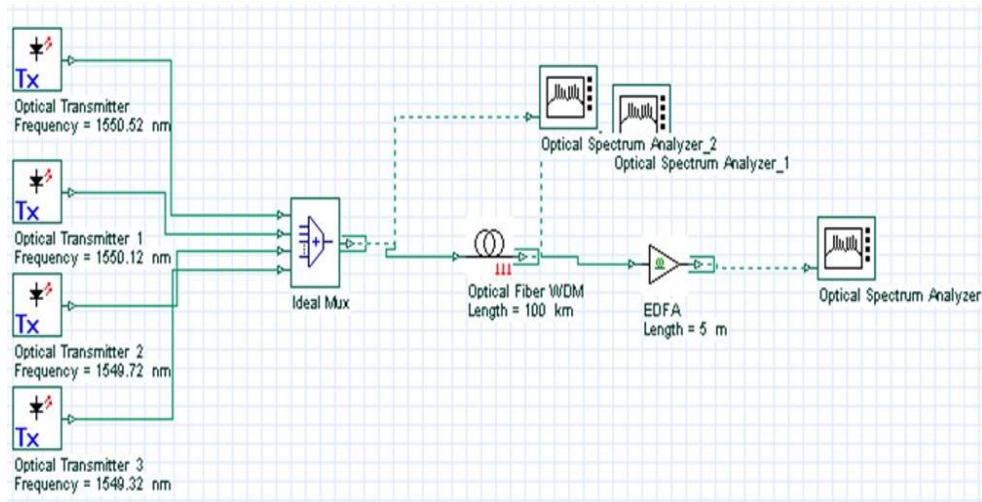


Figure III.14. Configuration de simulation WDM amplifiée et caractéristiques FWM dans un réseau

### optique passif



**Figure III.15. Configuration de la simulation le mélange à quatre ondes FWM (Four Wave Mixing)**

#### III.2.6.4. Résultats et Discussion :

Les caractéristiques des EDFA sont présentées dans le tableau 1. D'après le tableau, on peut déduire que lorsque l'ASE augmentait par rapport à la puissance de sortie, l'OSNR diminuait en conséquence. Autrement dit, plus l'AS est élevé, plus l'OSNR est bas. Cela limitera à son tour par extension le nombre d'amplificateurs pouvant être utilisés dans des applications pratiques. La figure 3 montre le tracé de l'OSNR par rapport à la puissance de sortie à l'EDFA. On peut observer sur le graphique que l'EDFA a de meilleures performances à une puissance de sortie plus élevée qu'à la région inférieure, c'est-à-dire qu'à une puissance de sortie inférieure, l'ASE est plus élevé et cela affecte l'OSNR résultant.

**Tableau 2. Caractéristiques de l'EDFA**

Puissance d'entrée	Puissance de sortie	ASE(dB)	Gain(dB)	OSNR(dB)
-30	4.7	-29.2	34.7	33.9
-28	6.6	-29.4	34.6	36.0
-26	8.38	-29.6	34.4	37.98
-24	10.8	-29.9	34.8	40.7
-22	11.7	-30.4	33.7	42.1
-20	13	-31.1	33	44.1

D'après le tableau 2, on peut déduire qu'à la longueur d'onde de est  $\lambda = 1541$  nm et EST  $\lambda = 1532$  nm, la hauteur de l'œil a la plage de valeurs la plus élevée en raison de la faible interférence intersymbolique (ISI) au niveau de ces régions, et donc ces régions peuvent être prises en compte lors du choix d'une bande passante pour l'amplification. La figure 17 montre le tracé de la hauteur



## Chapitre III Simulation et Interprétation des résultats

de l'œil par rapport à la longueur d'onde.

On peut observer que la hauteur de l'œil a une valeur plus élevée dans la plage de enthal  $\lambda = 1541\text{nm}$  et de  $\lambda = 1532\text{nm}$ .

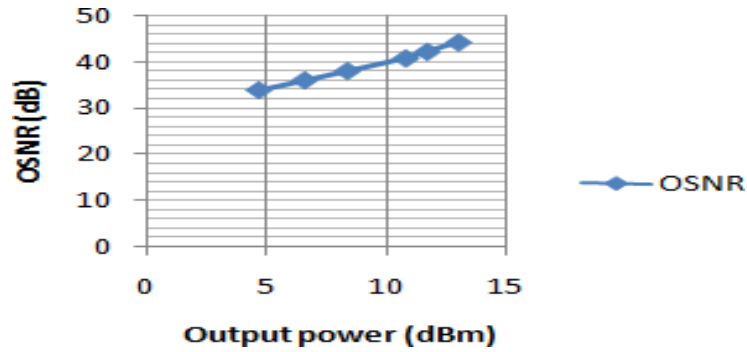


Figure III.16. Tracé de l'OSNR en fonction de la puissance de sortie

Tableau 3. Sortie réseau WDM amplifiée

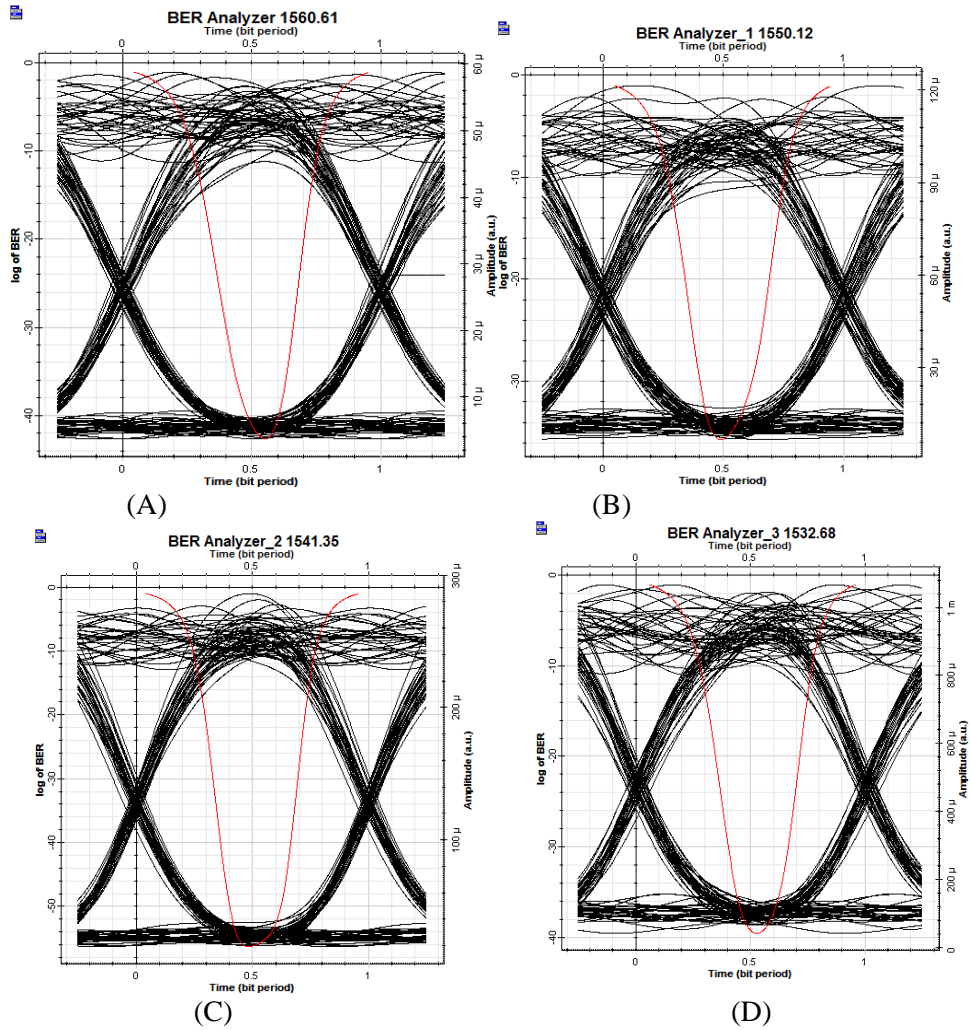
longueurs (nm)	Puissance de sortie (dBm)	ASE(dB)	OSNR(dB)	Hauteur des yeux (m)
1560	-16.06	-41.66	25.65	3.62619e-005
1550	-13.06	-38.49	25.43	6.90165e-005
1541	-9.10	-38.23	29.13	0.000183269
1532	-3.46	-27.58	24.12	0.000643659

Tableau 4. Puissance à l'entrée et à la sortie de la fibre

Longueur d'onde (nm)	Puissance de sortie à l'entrée de la fibre (dBm)	Puissance de sortie à la sortie de la fibre (dBm)
$(\lambda_1)1550.52$	9.4250	-11.61
$(\lambda_2)1550.12$	9.9503	-11.10
$(\lambda_3)1549.72$	9.9054	-10.59
$(\lambda_4)1549.32$	9.9404	-11.05

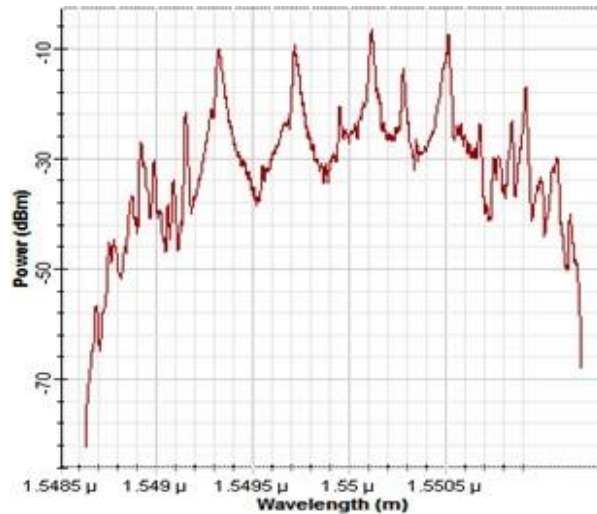
Tableau 5. Puissance optique à la sortie EDFA

Puissance à l'émetteur (dB)	Puissance optique de la sortie EDFA (dB)			
	$\lambda$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
13	10.02	10.48	10.00	09.37
16	7.679	09.30	08.05	07.908
19	5.732	6.767	4.774	5.712

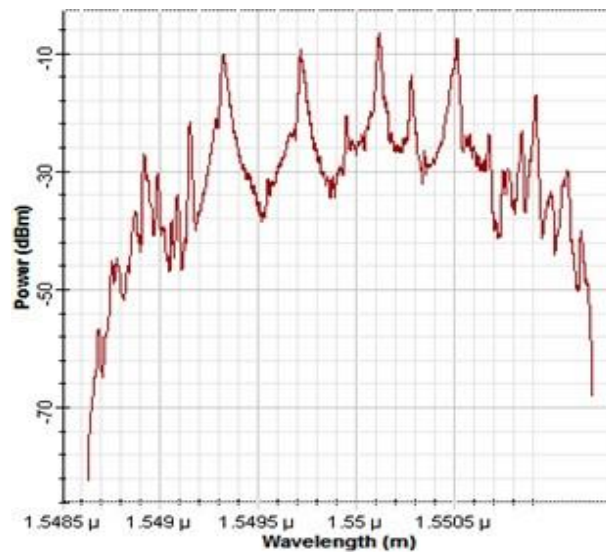


**Figure III.17. Diagrammes oculaires du réseau WDM caractéristiques et FWM dans un réseau optique Passif**

Comme le montre le tableau 4, lorsque la puissance au niveau de l'émetteur augmentait, la sortie au niveau de l'EDFA pour l'As à Es 3 diminuait en raison de l'effet du mélange à quatre ondes. C'est - à-dire que l'onde nouvellement formée a dégradé à la sortie du signal transmis par rapport à l'augmentation de la puissance de l'émetteur (13dB-19dB). Lorsque le paramètre de dispersion chromatique est passé de 16,75 ps / nm / km à 11,75 ps/nm / km, la valeur de la sortie a diminué, ce qui montre que la dispersion peut être utilisée pour réduire l'effet de la FWM, comme le montrent les figures 19 et 20.



**Figure III.18. Sortie après liaison fibre à dispersion=16,75 ps / nm / km**



**Figure III.19. Sortie de fibre à dispersion=11,75 ps / nm / km**

La figure 18 montre la sortie au niveau de la fibre à une dispersion chromatique de 16,75 ps / nm / km et la figure 19 montre la sortie à 11,75 ps / nm / km. La dispersion chromatique a été réduite de 16,75 à 11,75 ps / nm / km indiquant que le signal était dégradé comme illustré. En raison des interférences du FWM, davantage de longueurs d'onde latérales se sont formées à 11,75 ps/nm/km, ce qui a dégradé le signal transmis, comme l'observe la figure 20. Le tableau 5 donne la puissance de sortie mesurée pour une dispersion chromatique de 16,75 ps/nm/km et 11,75 ps/nm/km respectivement.

**Tableau 6. De puissance de sortie optique de fibre avec le taux de dispersion chromatique diminué**

## Chapitre III Simulation et Interprétation des résultats

Longueur d'onde (nanomètre)	De puissance de sortie à la dispersion de 16,75 chevaux / nm / km (dBm)	De puissance de sortie à la dispersion de 1,75 ps/nm/km (dBm)et plus
$(\lambda)$ 1550.52	-7.5	-7.8
$(\lambda_1)$ 1550.12	-6.6	-6.7
$(\lambda_2)$ 1549.72	-9.2	-10.28
$(\lambda_3)$ 1549.32	-10	-12.2

Compte tenu des données du tableau 5, on constate qu'en raison du coefficient chromatique supérieur à 16,75 ps/nm/km, l'effet de la FWM sur la sortie à l'EDFA a été réduit tandis qu'à 11,75 ps/nm/km, l'effet de la FWM était plus prononcé. C'est-à-dire que le nombre de bandes latérales a été réduit.

### III.2.6.5. Discussion :

Dans cette étude, trois caractéristiques ont été discutées en ce qui concerne le réseau optique, comme la montre l'analyse ci-dessus. Trois conclusions peuvent être tirées sur la base de l'analyse et des statistiques mentionnées ci-dessus. Tout d'abord, les résultats obtenus à partir de l'expérience EDFA ont montré que pour qu'un EDFA soit utilisé comme amplificateur, la caractéristique d'émission spontanée amplifiée (ASE) de l'EDFA doit être prise en compte, car il a été observé que lorsque l'ASE augmente, le gain de l'amplificateur diminue et donc par extension le rapport signal sur bruit (OSNR) réduit. Deuxièmement, il a également été observé qu'à partir du diagramme de l'œil obtenu, l'interférence entre symboles (ISI) était réduite à une longueur d'onde de 1541 nm et 1532 nm et cette plage conviendra à l'amplification pour une application pratique en raison de son faible niveau d'interférence comme indiqué par le résultat obtenu dans l'expérience.

Le résultat obtenu a également montré que l'effet du mélange à quatre ondes FWM (Four Wave Mixing) augmentait avec une augmentation de la puissance d'entrée. C'est-à-dire qu'une plus grande bande latérale a été formée et que la nouvelle bande latérale a dégradé le signal en interférant de manière à provoquer un chevauchement sur le signal transmis et donc à le dégrader. Lorsque la puissance d'entrée de l'émetteur était à 19 dB, l'effet du FWM était plus prononcé. Lorsque le coefficient de dispersion chromatique a été réduit, l'effet et le nombre de bandes latérales formées ont également augmenté, montrant que l'effet de FWM sur l'onde de sortie transmise peut être réduit en augmentant la dispersion chromatique de la liaison fibre.

### III.2.7. Conclusion :

OptiSystem est un logiciel de simulation optique très populaire qui permet de concevoir et de simuler des systèmes de télécommunications optiques complexes. Le logiciel prend en charge la modélisation et la simulation des amplificateurs EDFA, SOA, et permet de comparer leurs performances dans différents cas.

En utilisant OptiSystem pour simuler les amplificateurs EDFA, SOA, on peut évaluer leurs performances en termes de gain, de bruit, de distorsion et de réponse en fréquence. On peut également évaluer leur comportement en fonction de la longueur d'onde, de la puissance d'entrée et d'autres paramètres.

En conclusion, OptiSystem est un outil puissant pour la simulation et la conception de systèmes de télécommunications optiques, y compris l'évaluation et la comparaison des performances des amplificateurs EDFA, SOA. En utilisant ce logiciel, on peut optimiser la conception de ces amplificateurs pour répondre aux exigences spécifiques du système et améliorer les performances globales du système de télécommunications optique.

## Conclusion Générale

Au terme de cette étude sur les systèmes d'amplification on a fait des comparaisons des amplificateurs dans les réseaux de transmission optique, nous pouvons conclure que l'amplification optique joue un rôle essentiel dans la réalisation de communications optiques rapides, fiables et à longue distance. Les réseaux de transmission optique reposent sur des amplificateurs optiques pour compenser les pertes optiques et maintenir la qualité des signaux optiques tout au long de la chaîne de transmission. Nous avons examiné différentes technologies d'amplification optique, telles que les amplificateurs à semi-conducteurs, les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium. Chacune de ces technologies présente des avantages et des limites spécifiques en termes de gain, de bande passante, de figure de bruit et de distorsion. Le choix de la technologie d'amplification dépend des exigences spécifiques du système et des performances recherchées. La conception et l'optimisation des systèmes d'amplification optique sont des aspects cruciaux pour assurer un fonctionnement efficace et fiable des réseaux de transmission optique. Les paramètres clés tels que la puissance d'entrée, le gain, la figure de bruit et la bande passante doivent être soigneusement évalués et optimisés pour atteindre les performances souhaitées. Des stratégies telles que l'utilisation de techniques de compensation et de correction de distorsion, ainsi que l'optimisation des paramètres de fonctionnement, sont mises en œuvre pour minimiser ces effets indésirables. Les progrès continus dans ce domaine offrent des opportunités pour des réseaux de transmission optique plus efficaces, plus rapides et plus évolutifs.

Cette étude des systèmes d'amplification dans les réseaux de transmission optique nous a permis de comprendre l'importance critique de l'amplification optique dans les communications optiques modernes. Elle a mis en évidence les différentes technologies d'amplification optique disponibles. Cette connaissance approfondie ouvre la voie à de nouvelles opportunités et à des améliorations continues dans les réseaux de transmission optique, contribuant ainsi à l'avancement des communications optiques à l'ère de l'information.

Enfin, nous aspirons à améliorer les performances de l'amplificateur à fibre imprégnée d'erbium (EDFA) en augmentant l'efficacité de la conversion optique, en améliorant la conception du module optique, en améliorant la distribution de l'énergie optique, la gestion du bruit et des interférences, et en utilisant des technologies avancées telles que les fibres revêtues de polymère. Nous aspirons également à améliorer les performances des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) en améliorant la structure du SOA, en réduisant les effets de saturation, en réduisant le bruit et les interférences, en améliorant la linéarité et en intégrant le SOA dans des systèmes optiques plus complexes.

### Bibliographie de chapitre 3

- [1] "OptiSystem: A software suite for optical communication system simulation" publié par A. H. Gharba , 2013 la revue Computer Standards & Interfaces.
- [2] Mr.Ziane Ilyas Mr. Boudaoud Hichem' Etude et simulation d'un amplificateur SOA : convertisseur de longueurs d'ondes 'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN ,2021
- [3] OptiSystem Getting Started Optical Communication System Design Software Copyright © 2014 Optiwave.
- [4] <https://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-system-wideband-soa-characterization> 2/05/2023
- [5] M. Cvjetic, Optical amplifiers, optical transmission systemsengineering,Artech house,Norwood 2004.
- [6] M.N.O. Sadiku, Optical multiplexer and amplifier, opticalandwirelesscommunications:nextgenerationnetworks,CRCPress,Florida,2002
- [7] L. Chen, P. Meyrueix, W. Huang, Four wave mixing suppression, (2009). US Pat. 20090208223 A1.
- [8] M.A.A. Elmaleeh, F. G. S. Gamar, A. B. A., Mustafa, Minimization of signal degradation in single mode fibre optic link. Int. J. Latest Res. Sci. Technol. 3(5), (2014) 95-102.
- [9] W. Xiang, S. Wang, Reinforce Networking, Theory with Opnet simulation, J. Inf. Technol. Edu. Res., 6(1), (2007) 215-226.
- [10] N. Z. M.Rawi, M.Z.Jamaludin, F. Abdullah, OptiSystem: an alternative to optoelectronics and fiber optics teaching e-laboratory. Int. J. Asian Soc. Sci. 4(2) (2014) 307-313..
- [11] L. Liu, Y. Ma & J. Yang, Performance simulation and optimization of Er<sup>3+</sup>/Pr<sup>3+</sup> doped fiber amplifier by Optisystem, Inform. Technol. J. 12 (13), (2013) 2561-2567.
- [12] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 4th Ed. John Wiley, 2010. DOI: 10.1002/9780470918524.ch1.
- [13]Opti System, Optical system overview, Optical Communication System Design [Online] Retrieved 15 December 2015, available: [http://optiwave.com/products/system\\_overview.html](http://optiwave.com/products/system_overview.html) 05/05/2023