



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI LAGHOUCAT**  
**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE**

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE**

En vue d'obtenir le Diplôme de Master

**Domaine: Science et Technologie**

**Filière: Télécommunication**

**Option: Systèmes des télécommunications**

**Thème**

---

**Étude et simulation des réseaux de Bragg sur fibre optique pour  
l'aplatissement du gain de l'amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA) dans  
la transmission WDM**

---

**Présenté par :**

**NEBEG Meriem**

**BOUCHENAK Lina**

**Soutenu le : 22 juin 2023 devant le jury composé de :**

**Mr. Mourad REGUIGUE**

**MCB (UATL)**

**Président**

**Mr. Mouhoub BIRANE**

**MCA (UATL)**

**Examineur**

**Mr. Abdelkader SONNE**

**MCA (UATL)**

**Encadreur**

*Année Universitaire 2022/2023*



## ***Remerciements***

*Avant tout nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr SONNE Abdelkader, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier également les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.*

*A nos familles et amis pour leurs aides.*

*Nous ne pourrions nommer ici toutes les personnes qui nous ont aidés et encouragés de près ou de loin à l'avancement de notre projet et nous les remercions vivement.*



## *Dédicace*

*Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie.*

*À mon très cher père qui a tant espéré voir ce jour, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude, et qu'il soit fier de moi comme il l'a toujours été.*

*À ma mère qui m'a soutenue durant mes études et ne m'a jamais privée de son amour, de son attention et de ses encouragements, à toi maman je dédie ce travail.*

*À mes sœurs, Leïla et Souad.*

*À Lina, chère amie avant d'être binôme.*

*À toute ma famille, source d'espoir et de motivation, Maima Mebarqa, chère tante Salima, Zora, Aïcha, Imane, Walid, Hamza, Mohamed, Aïssa et Hadjer...*

*Aux petits enfants Sarah, Nihal, Adam.*

*À tous mes amis et aimés, Bouchra, Meriem, Soumia et Aïcha.*

*À tous qui ont participé à ma réussite.*

*Meriem*



## *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*À mon cher père, Bouchenak Miloud, tu as toujours été un père  
Idéal pour moi.*

*À ma mère qui m'a entourée d'amour et d'affection et qui fait  
Tout pour ma réussite, que Dieu la protège.*

*À toute ma famille, en particulier mes sœurs Zahia et Djalila que dieu  
vous donne tout le bonheur du monde.*

*À tous mes amis surtout Bouchra et Amira.*

*Je vous dédie ce travail et vous souhaite une vie pleine de  
Santé et de bonheur.*

*À mon binôme Meriem, je te souhaite une vie pleine de succès et de  
bonheur.*

*À le meilleur ami et frère Delassi Idris je te remercie pour tout, que  
Dieu te donne tout ce que ton cœur désire.*

*Lina*

## Résumé

De nos jours, la fibre optique devient un support de transmission très important, mais il existe toujours d'autres problèmes, notamment la non-uniformité du gain des amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA) dans la transmission WDM, ce qui est l'objectif de notre étude aujourd'hui. Les différentes longueurs d'onde du peigne WDM sont alors amplifiées de manière inégale. Pour résoudre le problème du gain non aplati dans les amplificateurs EDFA, nous avons utilisé les réseaux de Bragg uniforme à petit pas pour corriger le problème et avoir un gain aplati.

**Mots clés :** la fibre optique, la transmission WDM, l'amplificateur EDFA et les réseaux de Bragg.

## Abstract

Today, optical fiber is becoming a very important transmission medium, but there are still other problems, in particular the non-uniformity of the gain of Erbium-doped fibre amplifiers (EDFA) in WDM transmission, which is the objective of our study today. This means that the different wavelengths of the WDM comb are amplified unevenly. To solve the problem of no flattened gain in EDFA amplifiers, we used small-step Bragg gratings uniform to correct the problem and achieve flattened gain.

**Keywords :** Optical fiber, WDM transmission, the EDFA amplifier and Bragg gratings.

## ملخص :

اليوم، أصبحت الألياف البصرية وسيلة مهمة جدا في نقل المعلومات، ولكن لا تزال هناك مشاكل أخرى من بينها عدم تسطيح أطيف المضخمات الضوئية المخدرة بالإربيوم EDFA في تقنية مزج الإرسال بتقسيم طول الموجه WDM وهو هدف دراستنا اليوم. هذا يعني أن الأطوال الموجية المختلفة لمشط WDM (مزج الإرسال بتقسيم طول الموجه) يتم تضخيمها بشكل غير متساوي. لحل مشكلة عدم تسطيح أطيف المضخمات الضوئية استخدمنا شبكات براج الموحدة بخطوات صغيرة لتصحيح المشكلة وتحقيق أطيف مسطحة.

**الكلمات المفتاحية :** الألياف البصرية, مزج الإرسال بتقسيم طول الموجه WDM, المضخمات الضوئية المخدرة بالإربيوم EDFA و شبكات براج.

# Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Généralité sur les systèmes de communication optique

I. Introduction.....	3
II. Historique .....	3
III. Système de communication optique.....	5
IV. Les réseaux optiques .....	5
IV.1 Réseaux locaux LAN .....	6
IV.2 Réseaux métropolitains MAN.....	6
IV.3 Réseaux longue distance WAN.....	7
V. Eléments basiques d'un système de communication optique .....	8
V.1 Source optique .....	9
V.1.1 Mécanismes d'émission-absorption d'un photon .....	9
V.1.2 Jonction p-n .....	10
V.1.3 Diodes électroluminescentes LEDs (Light Emitting Diodes) .....	10
V.1.4 Diodes lasers (DLs).....	11
V.1.5 Comparaison entre LEDs et lasers .....	11
V.2 Modulation optique .....	12
V.3 Amplificateurs optiques.....	13
V.4 Filtres optiques .....	14
V.5 Photodétecteurs.....	14
VI. Les critères de choix de la fibre optique par rapport au cuivre.....	16
VII. conclusion.....	19

## Chapitre II : Fibre optique et Réseau de Bragg

I. Introduction.....	20
II. La fibre optique .....	20
II.1 les matériaux de fibre optique .....	20

II.2 les composants de fibre optique.....	20
III. Types des fibres optiques .....	21
III.1 fibre optique monomode.....	21
III.2 Fibre optique multimode .....	22
III.2.1 Fibres multimodes à saut d'indice.....	22
III.2.2 Fibres multimodes à gradient d'indice .....	23
IV. Propagation guidée de la lumière.....	23
IV.1 Description du rayon guidé .....	23
IV.2 Ouverture numérique et l'angle d'acceptation .....	25
V. L'atténuation .....	27
V.1 L'atténuation de fibre optique .....	27
VI. Dispersion .....	29
VI.1 Dispersion intermodale .....	30
VI.2 Dispersion chromatique .....	31
VI.2.1 Dispersion du matériau .....	32
VI.2.2 Dispersion du guide d'onde .....	32
VI.2.3 Effets de La dispersion chromatique sur la transmission.....	34
VI.3 Dispersion du mode de polarisation (PMD) .....	35
VII. Les techniques de transmission dans Les fibres optiques.....	36
VII.1 Le multiplexage temporel (TDM) .....	36
VII.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM).....	37
VIII. Amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA).....	38
VIII.1 Principe de fonctionnement de l'EDFA.....	39
IX. Fibre à réseaux de Bragg (FBG) .....	40
IX.1 Historique.....	40
IX.2 Principe d'une fibre à réseaux de Bragg.....	41
IX.3 Technique de fabrication des fibres à réseaux de Bragg.....	42
IX.4 Types de réseaux de Bragg .....	42
IX.4.1 Réseau de Bragg uniforme .....	43
IX.4.1.1 Réseau de Bragg à pas long .....	43
IX.4.1.2 Réseau de Bragg à pas courts.....	44
IX.4.2 Réseau de Bragg à pas variable (chirpé) .....	45
IX.5 L'apodisation des réseaux de Bragg .....	46
X. Conclusion.....	48

## Chapitre III : Optimisation des FBG pour l'aplatissement du gain de l'EDFA

I. Introduction.....	49
II. Présentation des logiciels de simulation.....	49
II.1 OptiSystem .....	50
II.2 OptiGrating.....	51
III. Simulation et caractéristiques.....	51
III. 1 Modélisation du réseau de Bragg uniforme .....	52
III.2 Influence des paramètres physiques sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme .....	53
III.2.1 Influence de la longueur du réseau sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme .....	53
III.2.2 Influence de l'indice de modulation sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme .....	54
III.2.3 Influence de la période du réseau sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme .....	56
III.2.4 Influence de l'apodisation sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme .....	57
III. 3. L'aplatissement du gain d'un amplificateur EDFA en utilisant des réseaux de Bragg .....	57
IV. Conclusion .....	64
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>65</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>66</b>

### Liste des figures

Figure I.1: La première communication optique par les signaux de fumée.....	3
Figure I.2: La première recherche sur la transmission guidée de la lumière par Tyndall .....	4
Figure I.3: Alexander Graham Bell et son collaborateur au photophone.....	4
Figure I.4: Le principe de la transmission optique.....	5
Figure I.5: Schéma d'un réseau local .....	6

Figure I.6: Schéma d'un réseau Métropolitain.....	7
Figure I.7: Schéma d'un réseau longue distance WAN .....	7
Figure I.8: Les éléments basiques d'un système de communication optique .	8
Figure I.9: Les trois principaux modes d'interaction de la lumière avec un système atomique à deux niveaux.....	9
Figure I.10: Structure d'une LED .....	10
Figure I.11: La structure d'un Laser.....	11
Figure I.12: Courbe de sortie de la LED et du Laser en fonction du courant d'entrée .....	12
Figure I.13: Les deux méthodes de la modulation optique .....	13
Figure I.14: La structure d'un Photodétecteur .....	14
Figure I.15: Photodiodes PIN.....	15
Figure I.16: Photodiodes à Avalanche .....	16
Figure II.1: Structure d'une fibre optique .....	21
Figure II.2 : fibre optique monomode .....	22
Figure II.3 : fibre optique multimode à saut d'indice.....	22
Figure II.4 fibre optique multimode gradient d'indice.....	23
Figure II.5 : Parcours des rayons à l'intérieur d'une fibre .....	24
Figure II.6 : Lumière à une interface d'indice de réfraction avec $n_1 > n_2$ : (a) réfraction, (b) réfraction critique et (c) réflexion interne totale.....	25
Figure II.7 : Atténuation des signaux .....	27
Figure II.8 : Spectre d'atténuation de la fibre optique .....	28
Figure II.9 : Dispersion des impulsions en fonction de la distance parcourue dans la fibre .....	29
Figure II.10 : Le phénomène de dispersion intermodale.....	30
Figure II.11. Dispersion chromatique dans une fibre optique.....	31
Figure II.12 : dispersion du matériau en fonction de la longueur d'onde.....	32
Figure II.13 : dispersion du guide d'onde en fonction de la longueur d'onde.....	33
Figure II.14 : dispersion totale (chromatique) en fonction de la longueur d'onde ....	34
Figure II.15 : L'effet de l'atténuation et la dispersion chromatique Sur la transmission.....	35
Figure II.16 : Effet de la PMD sur le mode.....	36
Figure II.17 : Schéma de principe du multiplexage ETDM dans les communications par fibre optique .....	37

Figure II.18 : Peigne des fréquences en DWDM .....	38
Figure II.19 : Schéma de principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre optique .....	38
Figure II.20 : un schéma détaillé sur le fonctionnement de l'EDFA .....	39
Figure II.21 : Spectre d'un EDFA .....	40
Figure II.22 : Schéma d'un réseau de Bragg et leurs spectres .....	41
Figure II.23 : Inscription d'un réseau par la technique interférométrique .....	42
Figure II.24 : Profil de l'indice de réfraction de réseau uniforme.....	43
Figure II.25 : Réponse d'un réseau de Bragg à pas long.....	44
Figure II.26 : réponse spectrale en transmission d'un réseau de Bragg droit à pas long inscrit dans une fibre monomode conventionnelle.....	44
Figure II.27 : Réponse d'un réseau de Bragg à pas court.....	45
Figure II.28 : réponse spectrale en transmission d'un réseau de Bragg droit à pas courts inscrit dans une fibre monomode conventionnelle .....	45
Figure II.29: Profil de l'indice de réfraction d'un réseau de Bragg linéaire à pas variable .....	46
Figure II.30: Profil de l'indice de réfraction réseau de Bragg apodisé (enveloppe gaussienne) .....	47
Figure III.1 : Capture d'écran sur la fenêtre principale de logiciel OptiSystem.....	50
Figure III.2 : Capture d'écran sur la fenêtre principale de logiciel OptiGrating .....	51
Figure III.3 : Spectre de réflectivité(a) et de temps de retard(b) d'un réseau de Bragg uniforme. ....	52
Figure III.4 : Effet de la variation de la longueur du réseau sur la réponse spectrale d'un FBG uniforme .....	54
Figure III.5 : Effet de la variation de l'indice de modulation du réseau sur la réponse spectrale d'un FBG uniforme .....	55
Figure III.6 : Effet de la variation de la période du réseau sur la réponse spectrale d'un FBG uniforme .....	56
Figure III.7 : Effet de l'apodisation du réseau sur la réponse spectrale d'un FBG uniforme .....	57
Figure III.8 : Capture d'écran sur le schéma d'optimisation du gain EDFA pour une transmission WDM sous logiciel OptiSystem .....	58
Figure III.9 : Spectre en transmission d'un amplificateur à fibre dopé Erbium (EDFA).....	59

Figure III.10 : Les 16 WDM canaux à l'entrée de l'EDFA .....	60
Figure III.11 : Les 16 WDM canaux à la sortie de l'EDFA.....	60
Figure III.12 : principe de l'égalisation du gain des EDFA en utilisant une série de 16 réseaux de Bragg uniformes à pat court .....	61
Figure III.13 : Capture d'écran sur le schéma d'optimisation du gain EDFA pour avoir le résultat du gain aplati à l'aide du bloc OptiGrating .....	61
Figure III.14 : Spectre en transmission d'un réseau de Bragg en cascad.....	62
Figure III.15 : Les 16 WDM canaux après uniformisation du gain .....	63

### **Liste des tableaux**

Tableau I.1 : Une comparaison entre la LED et le Laser .....	12
Tableau I.2: La différence entre la fibre optique et le cuivre .....	18

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

Les systèmes de communication optique utilisent la lumière (Onde lumineuse) pour transmettre l'information d'un lieu à un autre en des distances de quelques kilomètres à des milliers de kilomètres, L'information est souvent transportée par une onde porteuse électromagnétique pour délivrer l'information aux maisons et même l'échange entre les centraux téléphoniques des grandes villes.

La technique de transmission de données d'un endroit à un autre en transmettant des impulsions lumineuses infrarouges à l'aide d'une fibre optique est connue sous le nom de communication par fibre optique. Ici, la lumière se présente sous la forme d'un signal porteur qui est modifié pour contenir les données. Les câbles à fibres optiques remplacent les câbles électriques chaque fois que de longues distances, une bande passante élevée et une résistance aux interférences électromagnétiques sont nécessaires. Contrairement à la transmission par fil de cuivre où la transmission dépend entièrement des signaux électriques traversant le câble, la transmission par fibre optique implique la transmission de signaux sous forme de lumière d'un point à l'autre. De plus, un réseau de communication à fibre optique se compose de circuits de transmission et de réception, d'une source de lumière et de dispositifs de détection.

Les fibres optiques possèdent des atténuations et des dispersions sur de longues distances, donc il devient nécessaire d'amplifier le signal par des amplificateurs optiques EDFA, mais ces amplificateurs, ils ne sont pas d'amplifier le signal par une manière inégale, donc en utilise les réseaux de Bragg pour résoudre ce problème et obtenir un gain aplatir.

Ce mémoire est concentré notre attention sur l'étude et simulation des réseaux de Bragg sur fibre optique pour l'aplatissement du gain de l'amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA) dans la transmission WDM. La simulation des réseaux de Bragg a été effectuée dans deux logiciels "OptiSystem" et "OptiGrating".

Notre mémoire est organisé en trois parties:

Le premier chapitre contient d'une notion fondamentale sur les systèmes communication optiques.

Le deuxième chapitre, est exposé tout ce qui concerne les fibres optiques. Ensuit de multiplexage, ainsi que le principe de fonctionnement de l'amplificateur à fibre dopée à

l'erbium (EDFA). Enfin, le principe de fonctionnement des réseaux de Bragg et les différents types de réseaux.

Le troisième chapitre est simulé les réseaux de Bragg uniforme à pas courts dans une fibre pour aplatir le gain des amplificateurs EDFA dans la transmission WDM, et pour faire cette simulation, on a utilisé les deux logiciels de simulation "OptiSystem" et "OptiGrating". Dans cette partie, il faut à chaque fois adapter les paramètres d'un FBG à pas court en fonction de la longueur d'onde de Bragg de chaque source à éliminer (l'inverse de la valeur du gain de l'EDFA).

Enfin on termine par une conclusion générale.

# Chapitre 1

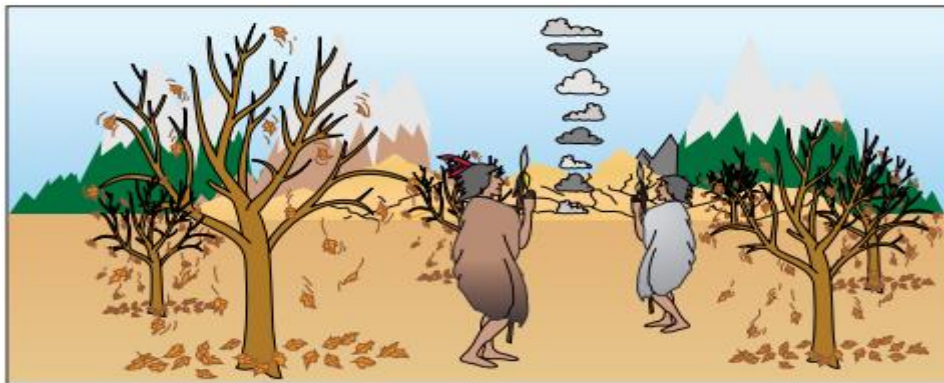
*Généralité sur les systèmes de  
communication optique.*

## I. Introduction

Un système de communication transmet des informations d'un endroit à un autre, qu'il s'agisse séparés par quelques kilomètres ou par des distances transocéaniques [1]. L'information est souvent véhiculée par une onde porteuse électromagnétique dont la fréquence peut varier de quelques mégahertz à plusieurs centaines de térahertz. Les fibres optiques sont des conducteurs de lumière. Afin de bien comprendre le contexte dans lequel notre étude s'inscrit, le premier chapitre fait office d'une notion fondamentale sur les système de transmission par fibre optique, et plus particulièrement, à la fibre optique, qui a fait l'objet de notre travail [2].

## II. Historique

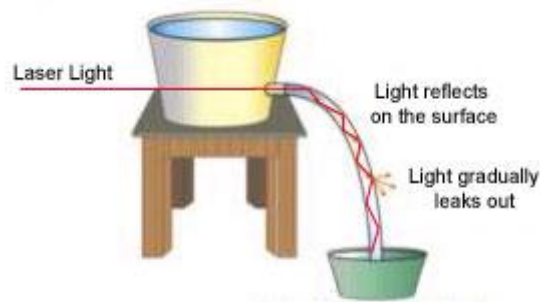
Les premiers signaux optiques, les signaux de fumée, ont été utilisés partout où la civilisation a surgi. Nous associons généralement les signaux de fumée uniquement aux Indiens d'Amérique du Nord, mais les signaux de fumée étaient utilisés par les Chinois, les Égyptiens, les Assyriens et les Grecs. Pour nuancer davantage les messages, la fumée pourrait être colorée en brûlant une variété d'écorces ou d'autres matières végétales. La nuit a toujours été une excellente occasion de communiquer en utilisant lumière. Dans les premières civilisations, diverses combinaisons de torches sur les hauts sommets des montagnes étaient utilisées pour communiquer rapidement sur des distances considérables.



*Figure I.1: La première communication optique par les signaux de fumée*

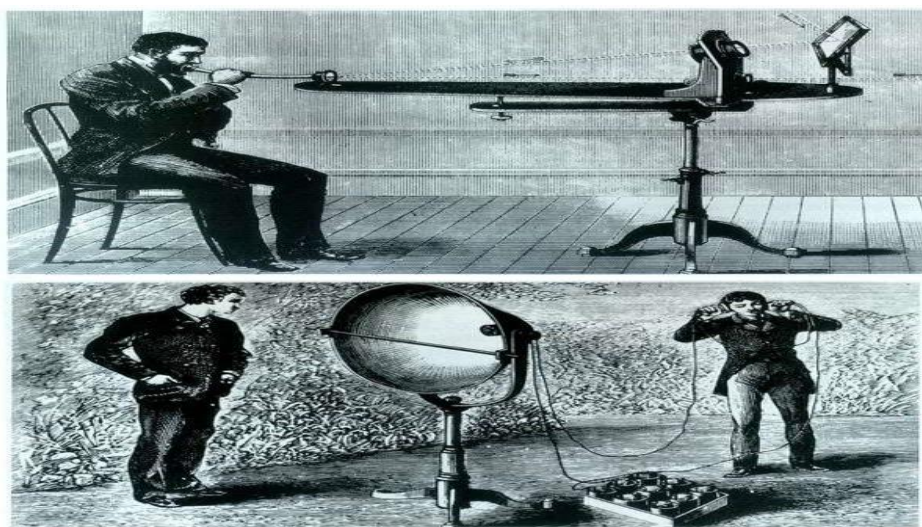
Au milieu des années 1850, le télégraphe morse électrique a été inventé, qui a finalement remplacé le télégraphe optique. Cet événement a été aussi plus ou moins le début du genre du monde des communications modernes que nous vivons aujourd'hui.

Dans les années 1870, l'inventeur anglais Tyndall a démontré que la lumière pouvait être faite pour voyager à travers un jet d'eau courbé. Le principe de la transmission optique des informations dans les conducteurs de lumière avait été établi.



**Figure I.2: La première recherche sur la transmission guidée de la lumière par Tyndall**

Vers la fin du XIXe siècle, Alexander Graham Bell a été la première personne à tenter de transmettre des informations au sens moderne en utilisant la lumière. Son invention, le photophone, utilise la modulation de la lumière du soleil pour envoyer un message à un récepteur situé à 200 mètres. La lumière du soleil se reflétait sur une membrane vibrant au son d'une voix humaine. Le rayon lumineux modulé frappe une cellule au sélénium placée au milieu d'un miroir parabolique. Des écouteurs et des batteries étaient attachés à la cellule au sélénium. Le rayon de la lumière a généré des fluctuations de courant dans la cellule au sélénium et ces fluctuations fait vibrer la membrane des écouteurs, rendant ainsi audible le signal reçu.



**Figure I.3: Alexander Graham Bell et son collaborateur au photophone**

En 1934, l'américain Norman R. French dépose un brevet pour un téléphone de système optique. Ce système a réuni les idées de Bell et de Tyndall. Le brevet décrivait un système dans lequel la voix était transmise à l'aide de la lumière dans un réseau de câbles optiques. Les câbles devaient être en verre massif avec une faible atténuation aux fréquences utilisées. Vingt-cinq ans plus tard, la technologie avait suffisamment avancé pour que les idées présentées dans ce brevet se concrétisent. En 1964, le prix Nobel a été décerné aux inventeurs du laser. En 1962, les premiers types de laser semi-conducteur ont été produits. Le prototype de la source lumineuse était maintenant disponible et le seul problème il ne restait plus qu'à produire un support de transmission acceptable [3].

### III. Systèmes de communication optique

La communication optique est tout type de communication dans lequel la lumière est utilisée pour transporter le signal à l'extrémité distante, au lieu du courant électrique. La communication optique repose sur des fibres optiques pour acheminer l'information d'un point vers un autre. La figure (I.4) présente le principe d'une transmission optique [4].

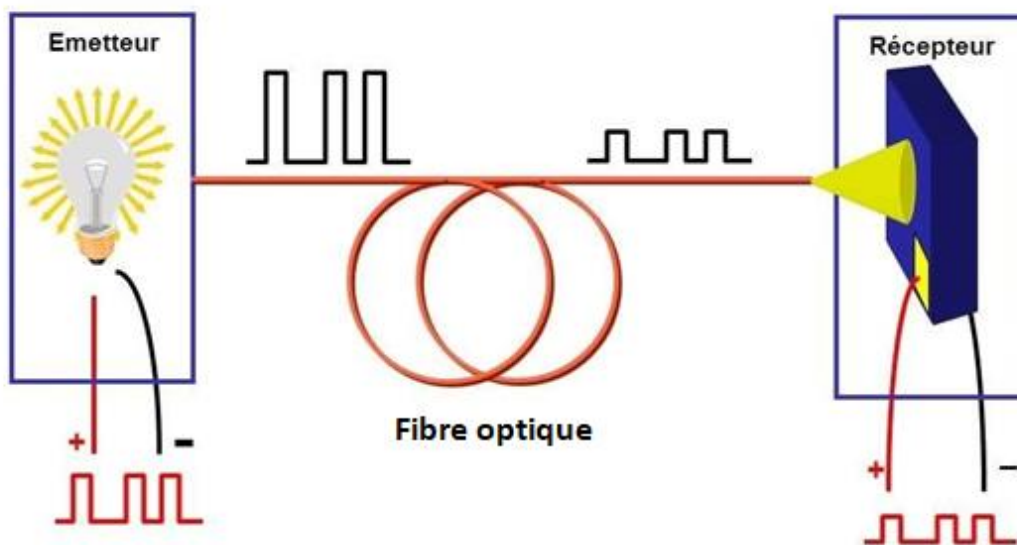


Figure I.4: Le principe de la transmission optique

### IV. Les réseaux optiques

Les réseaux optiques sont des réseaux de télécommunications qui sont caractérisés par la vitesse, la capacité et la portée pour envoyer des informations entre deux ou plusieurs points. Les points peuvent être des ordinateurs dans un bureau, des grands centres urbains ou même des nations du système mondial de télécommunications. La technologie de la fibre optique utilise des câbles à fibre optique et de la lumière comme mécanisme principale pour convertir

et transmettre les données et les communications vocales via un réseau. Les réseaux sont généralement divisés en réseaux locaux (LAN), réseaux métropolitains (MAN) et réseaux à grande distance (WAN) [5].

#### IV.1 Réseaux locaux LAN

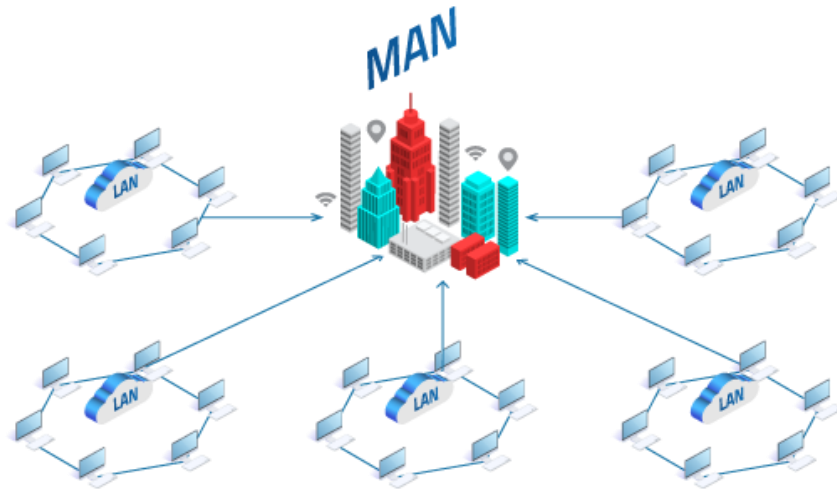
Un réseau local ou LAN (Local Area Network en anglais) est un réseau informatique couvrant une petite zone géographique d'une portée de 1 à 5 km, comme un domicile, un bureau, une école ou un groupe de bâtiments où sont installés des ordinateurs, serveurs et périphériques comme par exemple des imprimantes, scanners, projecteurs et autres dispositifs de stockage. Très souvent, les connexions entre les serveurs sont réalisées par des câbles Ethernet, et les dispositifs terminaux communiquent entre eux par une connexion sans fil, c'est-à-dire Wi-Fi [6].



*Figure I.5: Schéma d'un réseau local*

#### IV.2 Réseaux métropolitains MAN

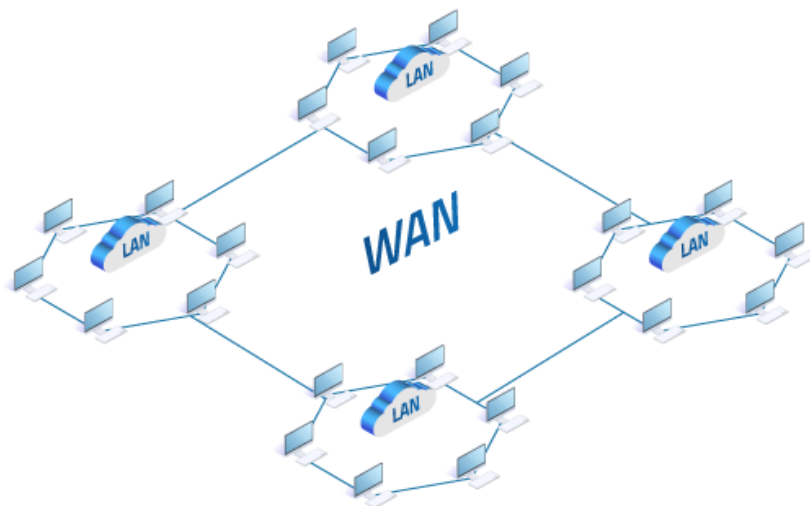
Un réseau métropolitain ou MAN (Metropolitan Area Network en anglais), comme son nom l'indique, est souvent utilisé dans les villes et autres lieux couvrant une portée de 50 à 60 km. Les MAN sont des réseaux de connexion à haut débit qui interconnectent plusieurs réseaux locaux en un seul réseau de grande taille avec un pont commun. Ce pont est appelé "backbone lines" qui est généralement établi par fibre optique pour augmenter la vitesse de transfert des données. Autrement dit, le réseau métropolitain peut être considéré comme un groupe d'un ou plusieurs réseaux LAN reliés entre eux par une connexion [7].



*Figure I.6: Schéma d'un réseau Métropolitain*

### IV.3 Réseaux longue distance WAN

Un réseau étendu ou WAN (Wide Area Network en anglais) est un réseau informatique qui couvre une vaste zone géographique d'environ 100 à 1000 km de diamètre, c'est-à-dire tout réseau dont le lien de communication traverse les frontières métropolitaines, régionales ou nationales. Les dispositifs concernés sont plus diversifiés que ceux appliqués aux autres types, des routeurs aux switches réseau, en passant par les modems pare-feu, etc. Des entreprises telles que FS ou autres organisations internationales utilisent la connexion WAN entre leurs différentes filiales en communiquant via transmissions par satellites ou câbles sous-marins internationaux [8].



*Figure I.7: Schéma d'un réseau longue distance WAN*

## V. Eléments basiques d'un système de communication optique

Le rôle d'un canal de communication est de transporter le signal optique de l'émetteur au récepteur sans le déformer. Les principaux éléments d'un système de communication par fibre optique sont : l'émetteur optique, la fibre optique et le récepteur optique comme indiqué à la figure (I.8).

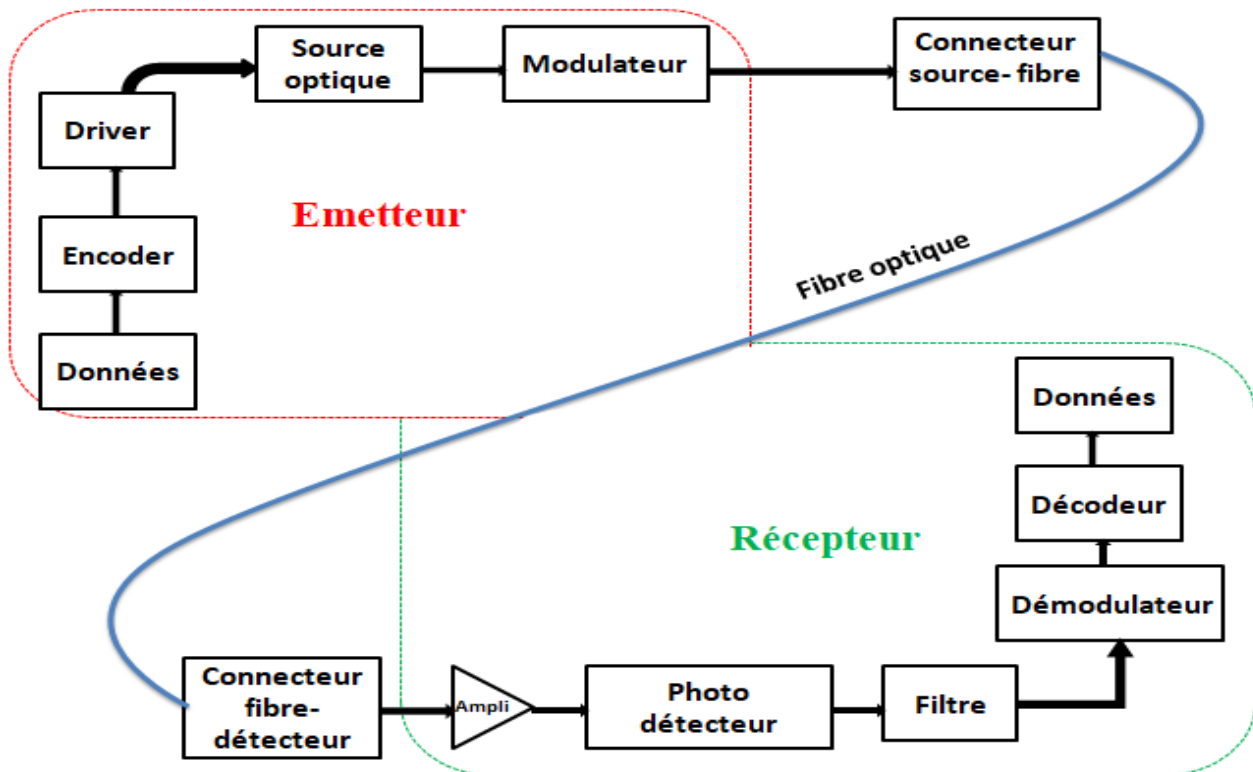


Figure I.8: Les éléments basiques d'un système de communication optique

L'encodeur est un circuit électrique dans lequel l'information est codée en séquences binaires de zéros et un. Dans l'émetteur d'ondes lumineuses, chaque "un" correspond à une impulsion électrique et "zéro" correspond à une absence d'impulsion. Ces impulsions électriques sont utilisées pour allumer et éteindre très rapidement une source lumineuse. Le driver convertit le signal électrique entrant en une forme qui fonctionnera avec la source lumineuse. La fibre optique agit comme un guide d'ondes et transmet les impulsions optiques vers le récepteur, par le principe de la réflexion interne totale. Le détecteur de lumière reçoit les impulsions optiques et les convertit en impulsions électriques. Ces signaux sont amplifiés par l'amplificateur. Les signaux amplifiés sont décodés par le décodeur [9].

## V.1 Source optique

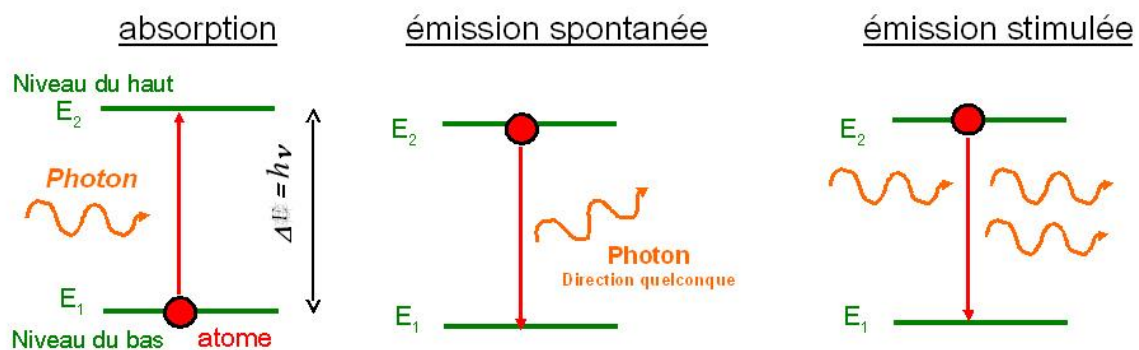
Le rôle de l'émetteur optique est de convertir l'énergie électrique en énergie optique à condition que la sortie de lumière soit effectivement lancée dans la fibre optique. Le composant principal des transmetteurs optiques est une source optique. Les systèmes de communication par fibre optique utilisent souvent des sources optiques à semi-conducteurs telles que les diodes électroluminescentes (LED) et les lasers à semi-conducteurs en raison de plusieurs avantages inhérents qu'ils offrent [2].

### V.1.1 Mécanismes d'émission-absorption d'un photon

Le processus d'absorption et d'émission d'un photon est résumé dans la figure suivante. Où les niveaux les plus hauts tels que  $E_2$  sont les niveaux excités et le niveau le plus bas  $E_1$  est l'état fondamental des atomes du milieu.  $(E_1 - E_2)$  est l'énergie qu'il faut donner sous forme de photon, pour passer de l'état bas à l'état haut est une absorption et de l'état haut à l'état bas est une émission.

$$E_1 - E_2 = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I. 1})$$

$h$  : c'est la constante de Planck.



*Figure I.9: Les trois principaux modes d'interaction de la lumière avec un système atomique à deux niveaux*

- **Absorption:** Un atome du niveau du bas peut monter dans le niveau du haut par effet d'absorption d'un photon de fréquence.
- **Émission spontanée:** Un atome du niveau du haut peut se désexciter spontanément vers le niveau du bas et engendrer l'émission d'un photon de fréquence si la transition entre  $E_2$  et  $E_1$  est radiative. Ce photon a une direction et une phase aléatoire.

- **Émission stimulée**

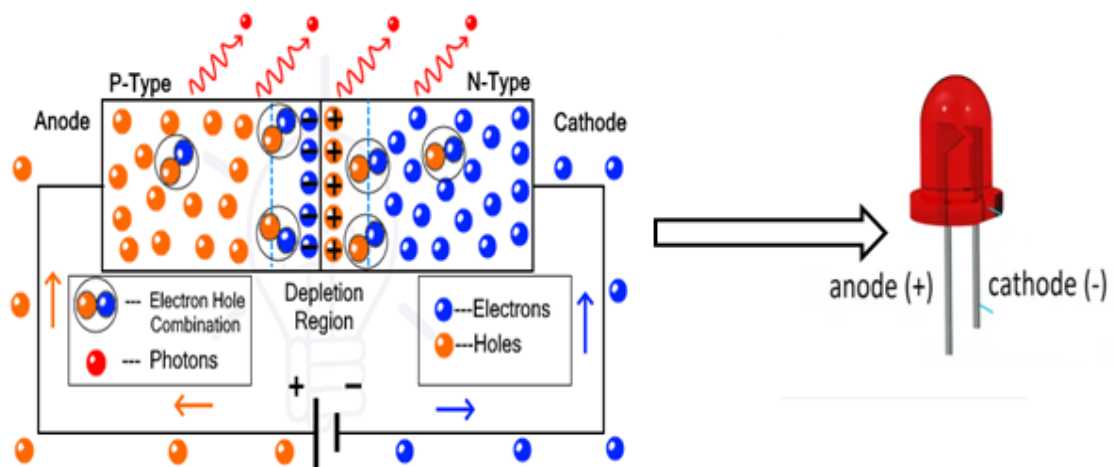
par l'action d'un photon incident, un atome du niveau du haut peut également se désexciter en émettant un photon dit "stimulé" dont les propriétés sont exactement les mêmes que le photon incident. Le terme stimulé souligne le fait que ce type de rayonnement n'existe que si un photon incident est présent pour "stimuler l'émission". L'amplification vient des similitudes entre le photon incident et le photon émis [10].

### V.1.2 Jonction p-n

Une jonction p – n est une frontière ou une interface entre deux types de matériaux semi-conducteurs, de type p et de type n, à l'intérieur d'un monocristal de semi-conducteur. Le côté "p" (positif) contient un excès de trous, tandis que le côté "n" (négatif) contient un excès d'électrons dans les enveloppes externes des atomes électriquement neutres. Cela permet au courant électrique de traverser la jonction dans une seule direction [9].

### V.1.3 Diodes électroluminescentes LEDs (Light Emitting Diodes)

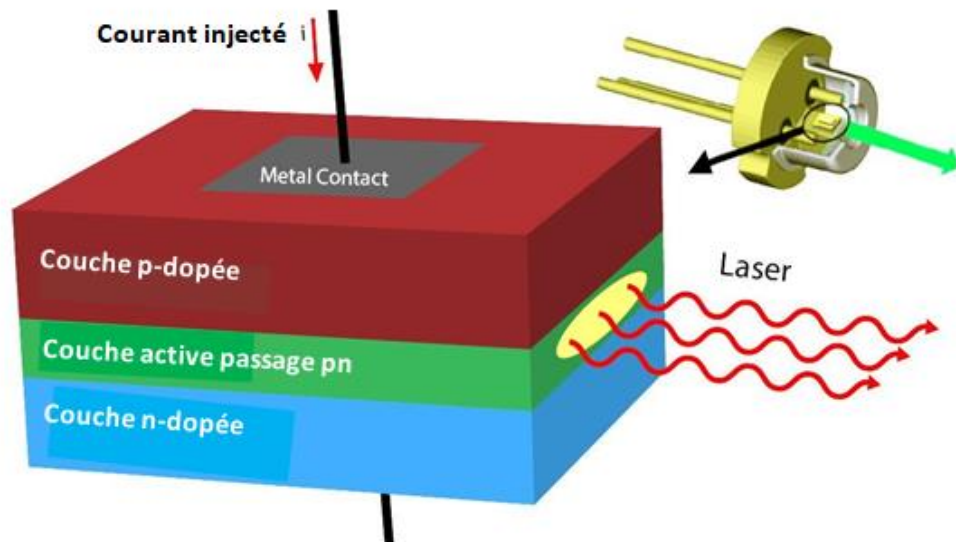
La LED est une homojonction p–n polarisée en direct. Lorsque le courant direct traverse la diode électroluminescente, les porteurs (électrons et trous) se déplacent. Les trous dans la région de type p se déplacent vers la région de type n et les électrons dans la région de type n se déplacent vers la région de type p. Les porteurs injectés se recombinent, et la différence d'énergie avant et après la recombinaison est libérée sous forme de lumière, une partie s'échappe de l'appareil et peut être couplée dans une fibre optique. La lumière émise est incohérente avec une largeur spectrale relativement large (25–100 nm) et un étalement angulaire relativement important [11].



*Figure I.10: Structure d'une LED*

### V.1.4 Diodes lasers (DLs)

Les lasers à semi-conducteurs émettent de la lumière par émission stimulée. En raison des différences fondamentales entre l'émission spontanée et l'émission stimulée, ils ne sont pas seulement capables d'émettre des puissances élevées ( $\sim 100$  mW), mais ont aussi d'autres avantages liés à la nature cohérente de la lumière émise. La dispersion angulaire du laser est relativement étroite du faisceau de sortie par rapport aux LEDs. La lumière émise permet un fonctionnement à bit élevé ( $\sim 10$  Gb/s) avec une largeur spectrale relativement étroite (0.1–5 nm), car la dispersion de la fibre devient moins critique pour une telle source optique. La plupart des systèmes de communication à fibre optique utilisent des lasers à semi-conducteurs comme source optique en raison de leurs performances supérieures par rapport aux LEDs [12].



*Figure I.11: La structure d'un Laser*

### V.1.5 Comparaison entre LEDs et lasers

Le principal avantage des lasers par rapport aux LEDs réside dans la vitesse de fonctionnement. Sous conditions d'émission stimulée, la constante de temps de recombinaison est d'environ un à deux ordres de grandeur plus courte que lors d'une recombinaison spontanée. Cela permet aux LDs de fonctionner à des fréquences d'impulsions de l'ordre du gigahertz, tandis que les LEDs sont limitées à un fonctionnement en megahertz [13].

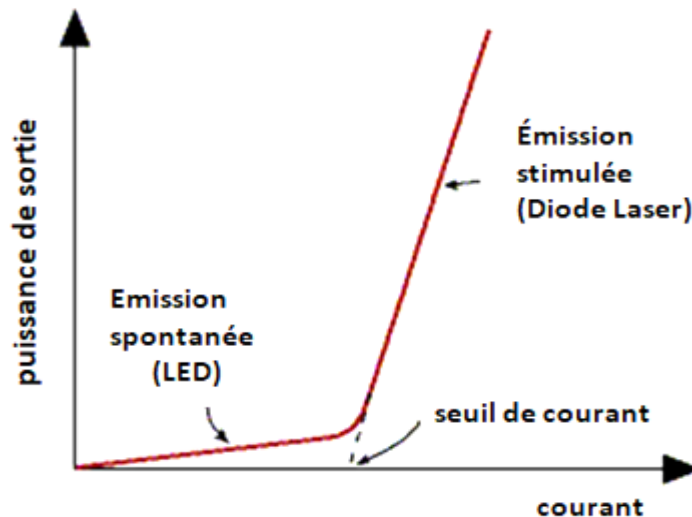


Figure I.12: Courbe de sortie de la LED et du Laser en fonction du courant d'entrée

Le tableau suivant compare les LEDs et les lasers en fonction de divers facteurs de comparaison / specifications [13]:

Spécification	LED	Laser
Largeur spectrale	Plus large (25-100 nm)	Plus étroite (0.1-5 nm)
Bande passante de modulation	Modéré, des dizaines de KHz à des dizaines de MHz	Elevé, dizaines de MHz à des dizaines de GHz
La vitesse	Ralentissez	Plus rapide
Type de fibre	Multimode	Multimode et monomode
Facilité d'utilisation	Plus facile	Plus fort
Cout	Faible	Modéré à élevé
Efficacité de conversion E/O	10 à 20%	30 à 70%

Tableau I.1: Une comparaison entre la LED et le Laser

## V.2 Modulation optique

Dans le domaine optique, nous avons un laser comme source de signal. En fonctionnement normal, ce laser émet de la lumière tout le temps. Ce qu'il faut, c'est une sorte de capacité de commutation afin de modifier ce flux constant en un flux de niveaux de puissance élevés et faibles pour représenter les informations numériques. C'est le rôle de la modulation, et on dit que la lumière doit être modulée. Il existe deux méthodes différentes de modulation du signal

optique. Ces deux méthodes sont classées comme suit: modulation directe et modulation externe.

- **Modulation directe**

Comme son nom l'indique, il s'agit d'une technique de modulation dans laquelle l'information à transmettre est directement placée sur un flux lumineux émis par la source. Dans cette méthode, il suffit de modifier le courant d'attaque de la source lumineuse, c'est-à-dire le laser, directement avec le signal d'information électrique pour générer un signal de puissance optique variable. Elle ne nécessite donc pas de modulateurs optiques individuels pour la modulation du signal optique.

- **Modulation externe**

Dans la modulation externe, on utilise des modulateurs optiques séparés qui modifient les signaux optiques afin de changer les caractéristiques du signal. Cette méthode est essentiellement utilisée pour moduler les signaux ayant des débits de données supérieurs à 10 Gbps. Cependant, il n'y a aucune obligation d'utiliser cette méthode uniquement pour les signaux à haut débit de données [14].



Figure I.13: Les deux méthodes de la modulation optique

### V.3 Amplificateurs optiques

L'amplificateur optique peut amplifier les signaux optiques dans le domaine optique sans avoir à les reconvertir dans le domaine électrique. Le signal optique est atténué lors de son parcours dans la fibre optique, en particulier sur de longues distances. Dans ce cas, on utilise un amplificateur en ligne pour rétablir (régénérer) le signal optique à son niveau de puissance d'origine [2].

## V.4 Filtres optiques

Les filtres optiques sont des dispositifs passifs qui laissent passer une partie ou un ensemble spécifique de longueurs d'onde de la lumière. Il existe deux classes de filtres optiques avec des mécanismes de fonctionnement différents: les filtres absorbants et les filtres dichroïques [2].

- **Filtres absorbants**

Les filtres absorbants sont essentiellement des filtres en verre qui sont teintés ou pigmentés en gélatine. Comme tout autre filtre, les filtres absorbants laissent passer la lumière de certaines longueurs d'onde. Ils sont utilisés pour filtrer les longueurs d'onde indésirables [15].

- **Filtres dichroïques**

Sont des filtres de couleur très précis utilisés pour laisser passer sélectivement la lumière d'une petite gamme de couleurs tout en reflétant les autres couleurs. Ils sont très compliqués dans leur fonctionnement [16].

## V.5 Photodétecteurs

Les Photodétecteurs sont des dispositifs à semi-conducteurs qui effectuent le fonctionnement inverse des dispositifs émetteurs de lumière, c'est-à-dire qu'ils convertissent la lumière rayonnante en un courant électrique. Une photodiode est une diode à jonction PN qui consomme de l'énergie lumineuse pour produire un courant électrique. Ils sont également appelés photodétecteur, détecteur de lumière et photocapteur. Les photodiodes sont conçues pour fonctionner en condition de polarisation inverse. Les matériaux de photodiode typiques sont le silicium (Si), le germanium (Ge) et l'arséniure de gallium d'indium (InGaAs).

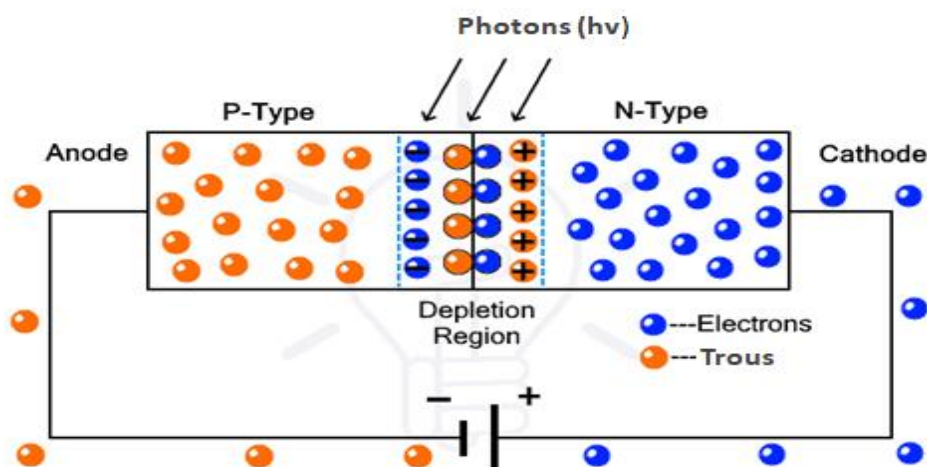
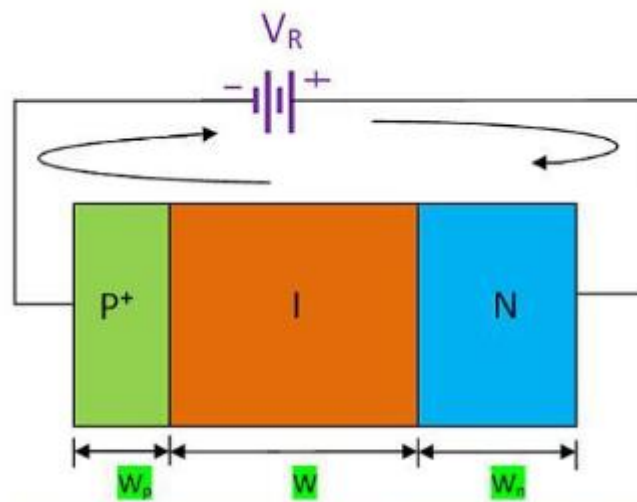


Figure I.14: La structure d'un Photodétecteur

La photodiode est soumise à des photons sous forme de lumière qui affectent la génération de paires électron-trou. Si l'énergie des photons qui tombent ( $h\nu$ ) est supérieure à la bande interdite ( $E_g$ ) du matériau semi-conducteur, il se crée des paires électron-trou près de la région de déplétion de la diode. Ces paires sont séparées les unes des autres avant de se recombiner sous l'effet du champ électrique de la jonction. La direction du champ électrique dans la diode force les électrons à se déplacer vers le côté n et, par conséquent, les trous à se déplacer vers le côté p. En raison de l'augmentation du nombre d'électrons sur le côté n et de trous sur le côté p, on observe une augmentation de la force électromotrice. Lorsque la charge externe est connectée au système, un flux de courant est observé à travers celle-ci. Voici deux exemples populaires de photodiodes qui sont actuellement utilisées : les photodiodes p-i-n et les photodiodes à avalanche [17].

- **Photodiodes PIN**

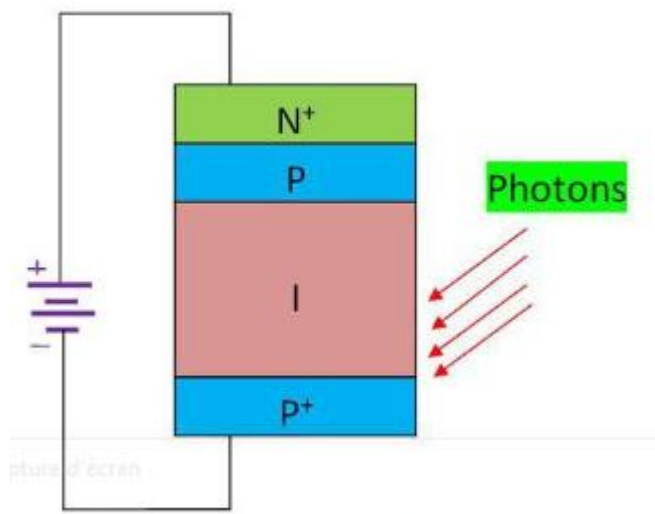
Comme leur nom l'indique, les photodiodes p-i-n sont construites en plaçant une région relativement importante du matériau semi-conducteur intrinsèque entre les régions dopées p+ et n+. Lorsque la polarisation inverse est appliquée à une diode PIN, la largeur de la région de déplétion commence à augmenter dans la région intrinsèque. Et avec l'augmentation de la tension inverse, la largeur augmente encore plus. L'étape est atteinte lorsque la largeur de la région d'appauvrissement devient équivalente à l'épaisseur de la couche intrinsèque. En ce point, la couche intrinsèque est balayée des porteurs de charge mobiles.



*Figure I.15: Photodiodes PIN*

- **Photodiodes à Avalanche (APD)**

Il se compose de quatre régions : la région N+, la région P, une couche intrinsèque et la région P+. Les régions N+ et P+ sont fortement dopées et la couche intrinsèque est légèrement dopée. Nous avons déjà discuté dans Photodiodes et PIN Photodiodes que les photons frappant la surface des diodes contribuent au photocourant. Mais dans le cas de la diode à avalanche, un facteur supplémentaire est introduit pour impacter l'ionisation qui augmente plusieurs fois le photocourant. Ce facteur supplémentaire est appelé facteur de multiplication d'avalanche [18].



*Figure I.16: Photodiodes à Avalanche*

## VI. Les critères de choix de la fibre optique par rapport au cuivre

Un câble à fibre optique est utilisé pour transmettre des données à travers des fibres (fils) ou du plastique (verre). Au cours de ce paquet de verre qui se trouve à l'intérieur de sortes de fils transmettent un message modulé le long de l'onde solaire. Il y a de nombreux avantages à utiliser ces câbles par rapport à d'autres types de câbles de communication comme la bande passante de ces câbles est élevée, moins vulnérable que les câbles métalliques aux interférences, moins mince, plus léger, et donc les informations sont souvent transmises dans le type de numériquement, il existe plusieurs critères qui nous permettent de choisir la fibre optique plutôt que le cuivre [19].

- **Meilleure bande passante**

Les câbles à fibres optiques ont une bande passante beaucoup plus grande que les câbles métalliques. Les informations peuvent être transmises par unité de temps de fibre sur d'autres supports de transmission, ce qui confère aux câbles à fibre optique un avantage significatif.

- **Distances de transmission plus longues**

Un câble à fibre optique est un support à faible perte de puissance, ce qui signifie que vous pouvez obtenir des bandes passantes plus élevées sur de plus grandes distances de transmission. Les câbles à fibre optique peuvent atteindre des dizaines de kilomètres de distance par rapport à la distance maximale de 100 mètres qui est la limite des câbles en cuivre.

- **Une bande passante plus élevée signifie une vitesse plus rapide**

Dans un réseau, la largeur de bande fixe la vitesse à laquelle les données circulent. En d'autres termes, plus la bande passante est élevée, plus la connexion sera rapide, car plus de données y transiteront en même temps.

- **Grande flexibilité**

Une connectivité plus fiable peut augmenter les coûts réels pour les entreprises. Tout le temps d'arrêt imprévu peut entraîner un arrêt complet de la productivité de l'entreprise. La fiabilité des communications et de la connectivité est une nécessité absolue pour toute entreprise. Par rapport aux câbles en cuivre, les câbles à fibre optique sont plus fins et plus légers. La fibre peut résister à une pression de traction plus importante que le cuivre et elle est moins sujette aux dégradations et aux ruptures. La fibre est flexible, elle peut se plier facilement et résiste à la plupart des éléments agressifs qui attaquent souvent les câbles en cuivre [20].

- **Sécurité renforcée**

Les câbles à fibre optique protègent les données. Ils ont une sécurité physique plus élevée car tous les matériaux électroniques peuvent être installés dans un emplacement central, contrairement aux systèmes en cuivre, où l'équipement doit être installé dans des emplacements de distribution dans une installation.

- **Le coût**

Pour toute comparaison d'achat, le prix est bien évidemment un facteur qui entre toujours en jeu. C'est le cas également pour les offres disponibles en matière de fibre optique. À cet effet, presque tous les opérateurs mettent toujours en avant cet argument. Le câble en cuivre n'est pas toujours l'option la moins chère par rapport au prix du câble à fibre optique. Lors de la construction d'un nouveau réseau, il ne faut pas négliger les coûts d'installation et de support de ces différentes solutions de câblage [21].

Ci-dessous un tableau qui donne un aperçu rapide de la différence entre un câble en cuivre et un câble à fibre optique [22]:

<b>Paramètre</b>	<b>La fibre optique</b>	<b>Cuivre</b>
Bande passante	60 Tbit/s et plus	10 Gbit/s
Distance	10 000 Mbps	1 000 Mbps
Bruit	Immunitaire	Sensible aux interférences EM/RFI
Sécurité	Presque impossible à exploiter	Sensible au tapotement
Structure	Léger, diamètre fin, forte force de traction	Diamètre lourd et plus épais, spécifications de tirage strictes
Cycle de vie	30-50 ans	5 ans
Énergie consommée	2W par utilisateur	>10W par Utilisateur
Vitesse de transmission	Plus rapide	Plus lent
Matériaux fabriqués avec	Fibres de verre	Fil de cuivre
Comment ça fonctionne	Transmission du signal obtenue via des impulsions lumineuses	Transmission de données via des impulsions électriques
Le Coût	Plus cher	Moins cher

*Tableau I.2: La différence entre la fibre optique et le cuivre*

## **VII. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement le système de télécommunications par fibre optique. Tout d'abord, nous avons fait un rappel historique sur les premiers signaux optiques, puis nous avons expliqué le principe de l'émetteur et du récepteur optiques. Après, nous avons présenté les réseaux optiques (LAN, MAN et WAN). Ensuite, nous avons parlé des éléments de base d'un système de communication optique (la chaîne de transmission optique et le rôle de chaque élément). Enfin, nous avons discuté sur les critères de choix de la fibre optique par rapport au cuivre. Dans le prochain chapitre, nous discuterons sur les fibres optiques (structure, propagation de la lumière guidée, dispersion et atténuation...etc.) et sur les réseaux de Bragg.

# Chapitre 2

## *Fibre optique et Réseau de Bragg.*

## I. Introduction

La fibre optique est une technologie associée à la transmission de données utilisant des impulsions lumineuses se déplaçant le long d'une longue fibre qui est généralement en plastique ou en verre. Avec le développement rapide des nouvelles technologies de l'information, la fibre optique est capable de transmettre des informations, codées par des variations d'intensité du signal lumineux, entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors inexplorés, le développement des fibres optiques a constitué l'élément clef de la révolution des télécommunications optiques [23].

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter des rappels sur les propriétés des fibres optiques. Par la suite, nous présentons les types de multiplexage et leurs applications, ainsi que le principe de fonctionnement de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA), leur avantage et leur limitation. Enfin, nous présentons le principe de fonctionnement des réseaux de Bragg ainsi que les différents types de réseaux.

## II. La fibre optique

### II.1 les matériaux de fibre optique

Les câbles à fibres optiques sont constitués de matériaux qui permettent à la lumière de les traverser. Ils transportent beaucoup de données très rapidement sur des mèches de fibres qui ont la largeur d'un cheveu humain [24]. Les fibres optiques sont composées principalement de dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), bien que d'infimes quantités d'autres produits chimiques soient souvent ajoutées. Les matériaux les plus courants sont le verre et le plastique. La partie centrale du câble est en fibre optique en verre ou en plastique, tandis que la gaine est généralement en silice dopée au fluorure. En règle générale, le tampon est fabriqué à partir d'un matériau appelé acrylate, qui est un type de plastique [25].

### II.2 les composants de fibre optique

En règle générale, il existe trois composants principaux de la fibre optique : le cœur, qui transporte la lumière ; la gaine, qui entoure le cœur avec un indice de réfraction plus faible et contient la lumière ; et la couche protectrice, qui protège la fibre fragile à l'intérieur.

#### ✓ Cœur

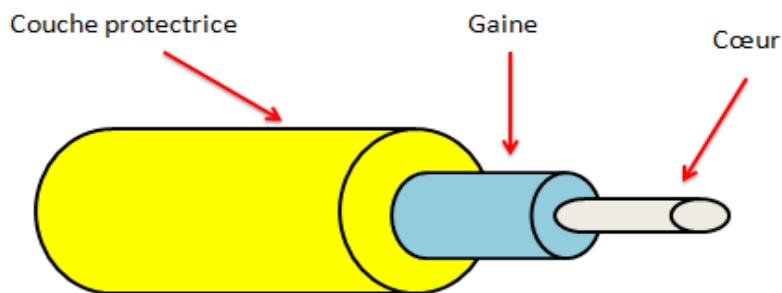
Est un fil continu de verre super fin. C'est le centre du câble à fibre optique et le support par lequel les impulsions lumineuses sont transmises.

**✓ Gaine**

Il s'agit d'une fine couche qui est appliquée sur le noyau et sert de limite qui contient les ondes lumineuses, permettant aux données de voyager sur toute la longueur de la fibre.

**✓ Couche protectrice**

C'est une couche de plastique sur la gaine pour renforcer le noyau de la fibre, aidé à absorber les chocs et fournir une protection supplémentaire contre les courbures excessives du câble [24].



*Figure II.1: Structure d'une fibre optique*

### III. Types des fibres optiques

Les câbles à fibres optiques varient énormément, dans le type de fibre, la construction, les matériaux et le nombre de fibres présentes, Il existe deux principaux types de fibre :

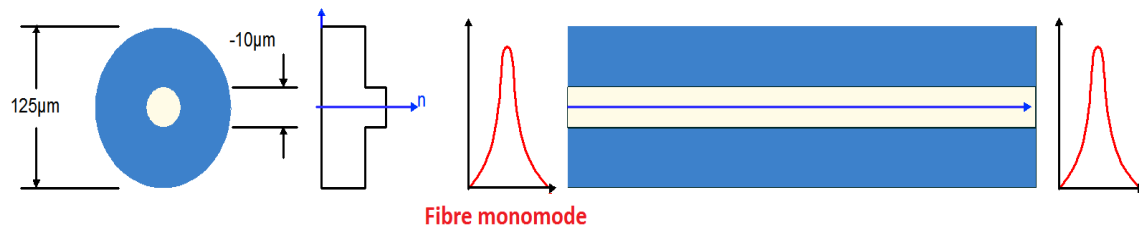
- ✓ Multimode.
- ✓ Monomode.

Chaque type ayant une application différente. La fibre multimode a un grand noyau et permet plusieurs chemins à travers la fibre, et de la fibre monomode n'a qu'un seul chemin, à travers un noyau beaucoup plus petit.

#### III.1 fibre optique monomode

Une fibre optique monomode a un cœur plus petit qu'une fibre multimode et ne laisse passer qu'un seul mode de lumière. Parce qu'il y a moins de réflexions lumineuses, ce type de fibre présente l'atténuation de signal la plus faible et la lumière peut se déplacer plus loin. Elle s'interface avec l'optique monomode, qui utilise des lasers comme source de lumière, envoyant une seule longueur d'onde en ligne droite le long de la fibre. Elle possède toujours la même gaine de 125  $\mu\text{m}$  que la fibre multimode, mais le cœur est généralement de 9  $\mu\text{m}$ , au

lieu de 50  $\mu\text{m}$  ou plus. La fibre monomode a une largeur de bande plus élevée et est le type de fibre le plus approprié pour les réseaux longs distance.



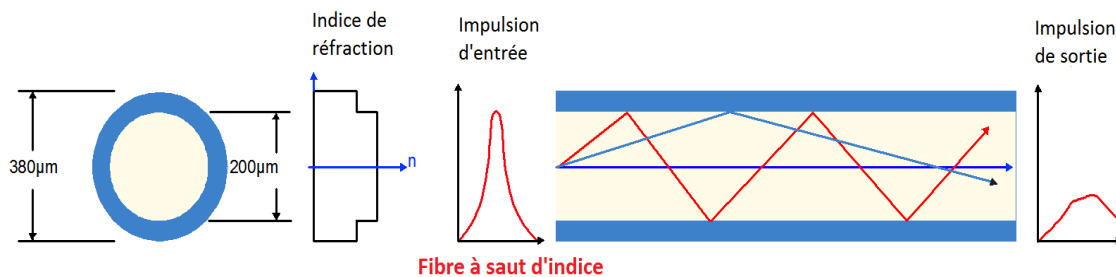
*Figure II.2 : fibre optique monomode*

### III.2 Fibre optique multimode

Le câble à fibre optique multimode permet à plusieurs modes de lumière de passer à travers un grand cœur, ce qui augmente le nombre de réflexions lors du passage de la lumière. L'avantage de ce type de fibre est qu'il permet d'utiliser des émetteurs-récepteurs moins coûteux, mais il introduit également beaucoup de dispersion et d'atténuation. En bref, cela signifie que la taille du cœur laisse tellement de place à la lumière pour rebondir lorsqu'elle est envoyée dans la fibre que la qualité du signal se dégrade rapidement. La fibre ne peut pas non plus être amplifiée, ce qui signifie qu'elle ne convient que pour les courtes distances où des émetteurs-récepteurs plus simples et moins chers peuvent être utilisés. En d'autres termes, il s'agit d'une solution peu coûteuse. Parmi les fibres multimodes, on distingue les fibres à saut d'indice (débit limité à 50 Mb/s) et les fibres à gradient d'indice (débit limité à 1 Gb/s).

#### III.2.1 Fibres multimodes à saut d'indice

Dans ce type de fibre multimode, la lumière prend différents chemins en zigzag et directs, en passant par la gaine. Il en résulte que différents "modes" de lumière arrivent à différents moments à l'autre extrémité de la fibre. Lorsque les différents modes commencent à se disperser, le signal perd une partie de sa forme.



*Figure II.3 : fibre optique multimode à saut d'indice*

### III.2.2 Fibres multimodes à gradient d'indice

Dans la fibre multimode à gradient d'indice, la lumière passant près de l'axe se déplace plus lentement que la lumière passant près de la gaine, ce qui permet de mieux regrouper les rayons lumineux. L'indice de réfraction diminue donc progressivement de l'axe central vers la gaine [25].

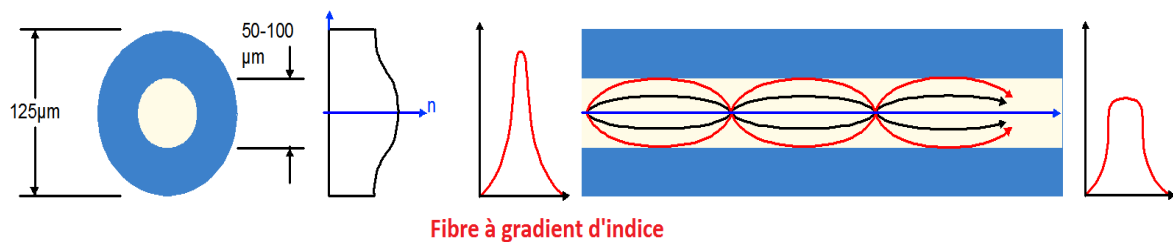


Figure II.4 fibre optique multimode gradient d'indice

## IV. Propagation guidée de la lumière

Intuitivement, nous pensons que la lumière est des rayons qui se propagent en ligne droite, mais en réalité, la lumière ne se propage pas en ligne droite. Elle se propage comme une onde. Cependant, comme la longueur d'onde est très petite, on dirait qu'elle se déplace en ligne droite. De plus, lorsque la lumière passe d'un milieu à un autre, elle se courbe [26]. Les guides d'ondes optiques tels que les fibres optiques captent et guident généralement la lumière dans des limites rectangulaires ou cylindriques sur des distances utiles. Les formes rectangulaires sont plus faciles à mettre en œuvre sur les circuits intégrés, tandis que les formes cylindriques sont utilisées pour des distances plus longues, jusqu'à 100 km ou plus [27].

### IV.1 Description du rayon guidé

Les fibres optiques aient un profil circulaire, par simplicité on ne considère que la section d'une fibre qui contient l'axe de symétrie de la fibre. Les rayons lumineux ayant un petit angle par rapport à l'axe de la fibre restent contenus dans le cœur de la fibre en raison de la réflexion interne totale. Les indices de réfraction de la gaine et du cœur sont donnés par  $n_1$  et  $n_2$ , respectivement ( $n_1 < n_2$ ). L'angle d'incidence de la lumière provenant du milieu environnant. Une partie de l'énergie lumineuse est réfléchi avec le même angle, et une partie de la lumière pénètre dans le cœur. Le fait qu'une partie de la lumière soit réfléchi montre qu'il est normalement impossible de coupler 100 % de la lumière dans la fibre, car il y a toujours une certaine perte associée au transport d'un signal optique entre deux milieux ayant des indices de réfraction différents. La figure (II.5) illustre la situation pour un tel rayon [28].

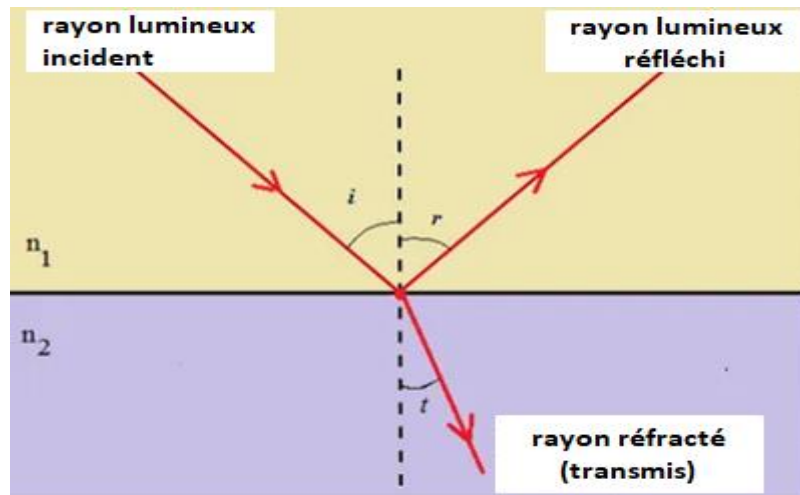


Figure II.5 : Parcours des rayons à l'intérieur d'une fibre

- **L'indice de réfraction**

C'est une mesure de la courbure d'un rayon lumineux lorsqu'il passe d'un milieu à un autre. L'indice de réfraction est égal à la vitesse de la lumière  $c$  pour une longueur d'onde donnée dans le vide divisée par sa vitesse  $v$  dans un matériau, c'est-à-dire :

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{II. 1})$$

Et si  $i$  est l'angle d'incidence d'un rayon dans le vide (angle entre le rayon entrant et la perpendiculaire à la surface d'un milieu, appelé la normale) et  $t$  est l'angle de réfraction (angle entre le rayon dans le milieu et la normale), l'indice de réfraction  $n$  est défini comme le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction [29] ; c'est-à-dire :

$$n = \frac{\sin(i)}{\sin(t)} \quad (\text{II. 2})$$

- **Réflexion**

La lumière change de direction et reste dans le même milieu. Lorsque les ondes frappent une frontière et sont réfléchies, l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. L'angle d'incidence est l'angle entre la direction du mouvement de l'onde et une ligne tracée perpendiculairement à la frontière réfléchissante [30].

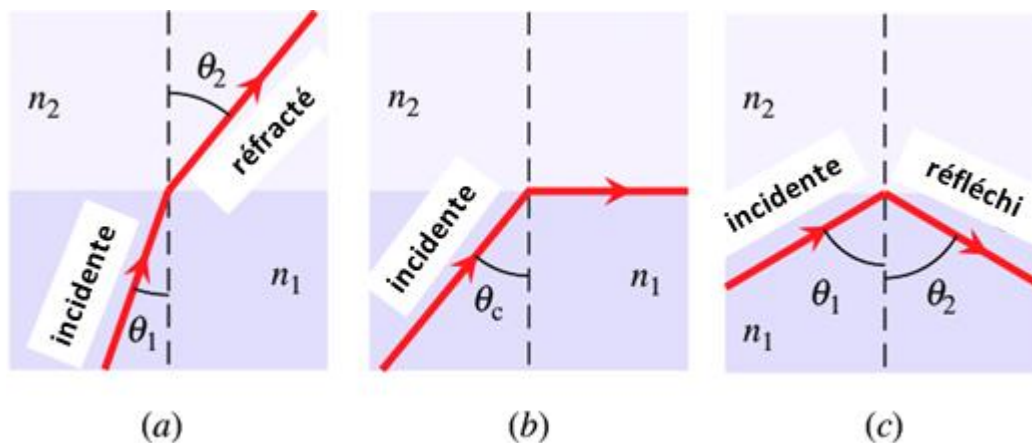
$$i = r \quad (\text{II. 3})$$

- Réfraction

La lumière change de direction et traverse la surface séparant les deux milieux. Le rayon lumineux réfracté forme un angle différent de la normale par rapport à l'angle d'incidence. La réfraction suit la loi de Snell, ou la loi de la réfraction [3] :

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(t) \quad (\text{II.4})$$

- Réflexion interne totale



**Figure II.6 : Lumière à une interface d'indice de réfraction avec  $n_1 > n_2$  : (a) réfraction, (b) réfraction critique et (c) réflexion interne totale**

Contrairement à la figure (II.6) la figure 6(a) montre la lumière voyageant d'un supérieur à un indice de réfraction inférieur, avec  $\theta_1 < \theta_2$  puisque la lumière voyage plus vite dans  $n_2$ . Lorsque  $\theta_1$  augmente, il en sera de même pour  $\theta_2$  jusqu'à ce qu'il soit perpendiculaire à la normale, comme sur la figure 6(b). Ici, l'incidence angle est appelé angle critique  $\theta_c$ . Si  $\theta_1$  est augmenté au-delà de  $\theta_c$  comme sur la figure 6(c), alors pas de la lumière est réfractée et toute la lumière est à la place interne réfléchi. L'interface ressemble à un miroir et l'angle de réflexion  $\theta_2$  est égal à  $\theta_1$ . C'est réflexion interne totale [31].

## IV.2 Ouverture numérique et l'angle d'acceptation

Dans le modèle de rayon de lumière, l'angle d'incidence d'un rayon détermine s'il sera ou non couplé au cœur de la fibre. L'angle de coupure est l'angle d'acceptation maximal  $\theta_{\max}$ , qui est lié à la ON. Les rayons ayant un angle d'incidence  $\leq \theta_{\max}$  sont totalement réfléchis en interne à la frontière entre le cœur et la gaine de la fibre. Lorsque ces rayons se propagent dans la fibre, ils restent piégés dans le cœur. Les rayons avec des angles d'incidence supérieurs à  $\theta_{\max}$  se réfractent et traversent l'interface entre le cœur et la gaine. Cette lumière

peut voyager dans la gaine pendant un certain temps mais finit par disparaître de la fibre. L'ouverture numérique ON et l'angle d'acceptation sont définies par :

$$ON = n_0 \sin \theta_{max} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} = n_c \sqrt{2\Delta} \quad (\text{II. 5})$$

$$\Delta = \frac{n_c^2 - n_g^2}{2n_c^2} \quad (\text{II. 6})$$

$$\theta_{max} = \arcsin \left( \frac{ON}{n_0} \right) \quad (\text{II. 7})$$

$n_0$  : est l'indice de réfraction du milieu extérieure  $n_{ext}$  (généralement dans l'air et égal à 1).

$\Delta$  : est la différence relative d'indice [32].

- **Fréquence normalisée**

Est proportionnelle au rayon de la fibre divisé par la longueur d'onde multipliée par la racine carrée de la différence des carrés de l'indice de réfraction maximal du cœur et de l'indice de réfraction de la gaine (ON). La formule s'écrit comme suit :

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda} ON = k \cdot a \cdot ON \quad (\text{II. 8})$$

D'où :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{II. 9})$$

$a$  : est le rayon du cœur de la FO [ $\mu\text{m}$ ].

$ON$  : est l'ouverture numérique.

$\lambda$  : est la longueur d'onde [ $\mu\text{m}$ ].

$k$  : est la constante de propagation [33].

- **Longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$**

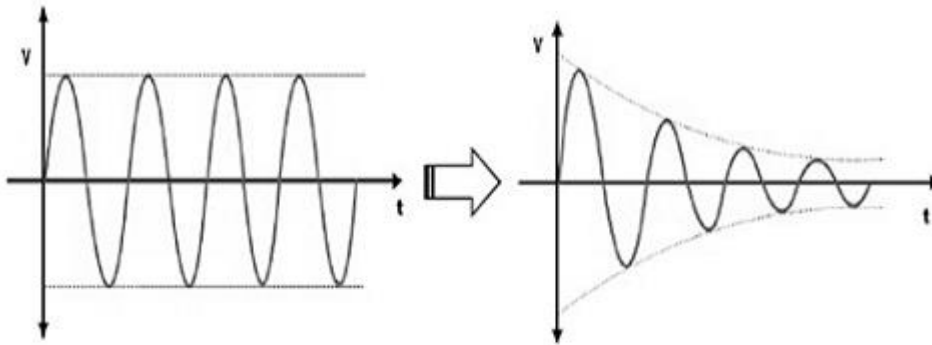
La longueur d'onde de coupure dans une fibre optique est la longueur d'onde la plus élevée qui peut se propager dans la fibre en mode de base, sans propager en mode supérieur. La formule pour calculer la longueur d'onde de coupure dans une fibre optique monomode est la suivante :

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{2.404} a \cdot ON \quad (\text{II. 10})$$

Cela signifie que les signaux lumineux ayant une longueur d'onde supérieure à la longueur d'onde de coupure ne peuvent pas se propager en mode de base et doivent être transportés en mode supérieure, ce qui peut entraîner une augmentation de la dispersion et des pertes de transmission [2].

## V. L'atténuation

L'atténuation est une notion de télécommunication qui fait référence à la réduction de la force du signal. Ce phénomène peut se produire lors de la transmission de signaux sur de longues distances. Elle peut être calculée en dB (décibels) en termes de tension [34]. L'atténuation, ou la perte de lumière ou de signal, est un facteur presque inévitable lors de l'installation de votre réseau de câbles à fibres optiques Elle limite la distance que le signal peut parcourir dans la fibre optique [35].

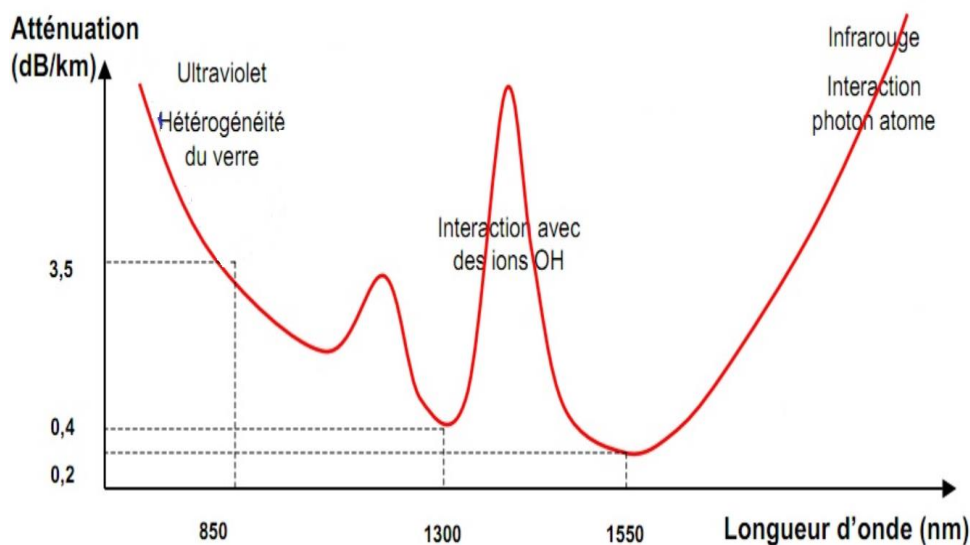


*Figure II.7 : Atténuation des signaux*

### V.1 L'atténuation de fibre optique

L'atténuation est la réduction ou la perte de puissance optique lorsque la lumière traverse une fibre optique. Plus la fibre est longue et plus la lumière doit parcourir de distance, plus le signal optique est atténué. Par conséquent, l'atténuation est mesurée et rapportée en décibels par kilomètre (dB/km), également connu sous le nom de coefficient d'atténuation ou taux d'atténuation. L'atténuation varie en fonction du type de fibre et de la longueur d'onde de fonctionnement. Pour les fibres optiques à base de silice, les fibres monomodes ont une atténuation plus faible que les fibres multimodes. Et d'une manière générale, plus la longueur d'onde est élevée (ou longue), plus l'atténuation est faible. Cela est vrai sur la plage de longueurs d'onde de fonctionnement typique de 800 à 1600 nm pour les fibres optiques conventionnelles de communication de données et de télécommunication. Les fibres

monomodes fonctionnent généralement dans les régions 1310 nm ou 1550 nm, où l'atténuation est la plus faible. Cela fait des fibres monomodes le meilleur choix pour les communications longues distance. Les fibres multimodes fonctionnent principalement à 850 nm et parfois à 1300 nm. Les fibres multimodes sont conçues pour une utilisation à courte distance ; l'atténuation plus élevée à 850 nm est compensée par l'utilisation de sources optiques plus abordables (plus la longueur d'onde est faible, moins l'optique est chère) [36]. La mesure d'atténuation spectrale consiste à mesurer l'affaiblissement de la fibre sur une plage de longueurs d'onde.



**Figure II.8 : Spectre d'atténuation de la fibre optique**

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes. D'abord, l'absorption intrinsèque du matériau constitutif provoque une augmentation très rapide des pertes aux basses longueurs d'onde. La présence d'impuretés peut aussi créer diverses bandes d'absorption. Dans le cas de la silice pure, le minimum théorique d'atténuation devrait descendre à 0,2 dB/km vers  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ .

De plus, les irrégularités involontaires de structure provoquent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh). Il y a ensuite les pertes dues aux conditions d'utilisation des fibres. Toute courbure trop serrée crée des pertes par rayonnement. Les micros courbures sont des courbures très faibles, mais répétées et pratiquement incontrôlables, dues au conditionnement des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent directement aux pertes intrinsèques. Elles sont toutefois négligeables pour la fibre standard des télécommunications dans des conditions d'emploi normales. Enfin, les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement. La figure

(II.8) montre l'atténuation spectrale d'une fibre en silice, pour les télécommunications. Au cours de la propagation dans la fibre, la puissance décroît selon la loi :

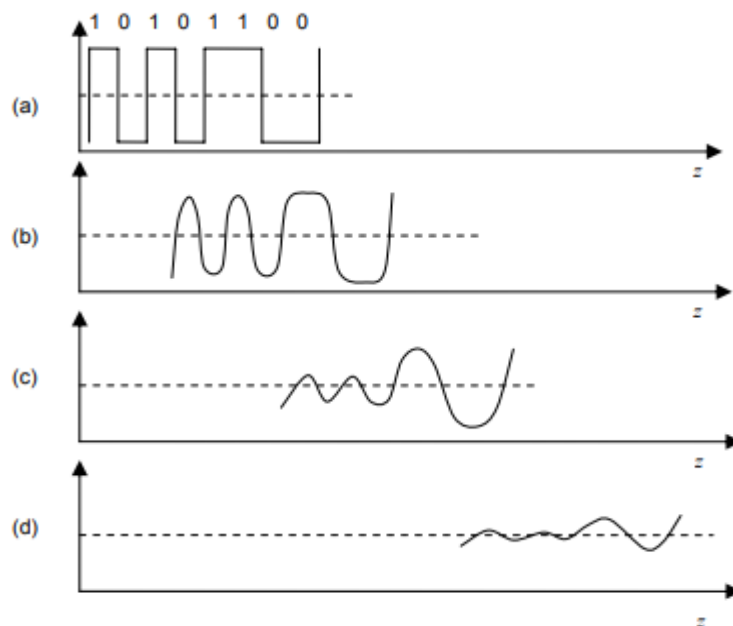
$$P(L) = P_{in} \cdot e^{-\alpha L / 10} \quad (\text{II.11})$$

$P_{in}$  : est la puissance qui a été couplée à l'entrée de la fibre.

$\alpha$  : est le coefficient d'atténuation en Neper/m, cette atténuation  $\alpha$  dépend du matériau et de la longueur d'onde  $\lambda$  [28].

## VI. Dispersion

La dispersion est un facteur important qui limite les performances des liaisons optiques, notamment à des débits de données plus élevés. En général, la dispersion fait référence à l'étalement des impulsions qui composent un signal lorsqu'il se déplace au long de la fibre. La figure (II.9) illustre l'étalement de l'impulsion dû à la dispersion pour un octet de données représentatif pendant qu'il se déplace au long de la fibre.



**Figure II.9 : Dispersion des impulsions en fonction de la distance parcourue dans la fibre**

Comme cet octet de données se déplace, les angles aigus commencent à s'arrondir. Au départ, tous les bits individuels sont encore clairement distinguables, comme le montre la figure (II.9) (b). Cependant, lorsque l'impulsion se propage plus loin, l'effet d'arrondi continu, et à un moment donné les quatre premiers bits, qui représentaient un taux de transition plus élevé, commencent à fusionner. Ce qui se passe sur la figure (II.9) (c). Finalement, après une

distance suffisante, les quatre derniers bits du paquet commencer à fusionner, ce qui signifie que peu de temps après ce point, tout cet octet de données sera complètement perdu. En général, la dispersion dans les câbles à fibres optiques comprend la dispersion intermodale, la dispersion chromatique et la dispersion du mode de polarisation(PMD) [28].

### VI.1 Dispersion intermodale

Comme la fibre multimode a un diamètre de cœur large, elle peut guider de nombreux modes spatiaux de lumière différents. Les différents modes pénètrent dans la fibre et se reflètent sur la gaine à des angles différents, ce qui signifie qu'ils parcourent des distances différentes et se propagent donc dans la fibre à des vitesses différentes. Comme ils sortent de la fibre à des moments différents, les impulsions optiques s'élargissent. C'est ce qu'on appelle la dispersion intermodale. La fibre monomode n'est pas affectée par la dispersion modale puisqu'elle ne supporte qu'un seul mode [36].

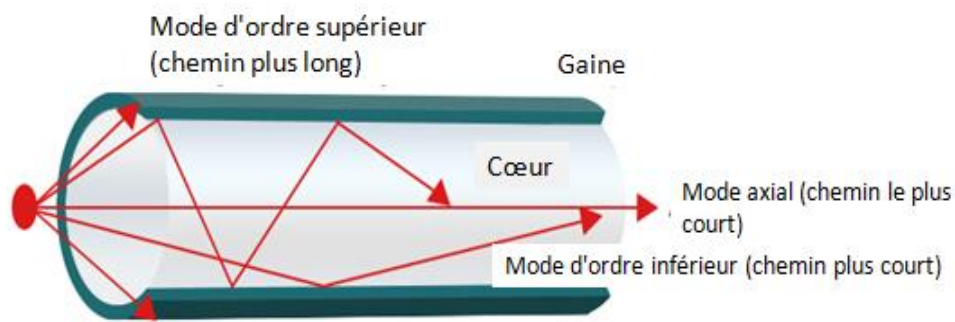


Figure II.10 : Le phénomène de dispersion intermodale

La dispersion intermodale est donnée par :

$$D_i = \frac{t_{max} - t_{min}}{L} = \frac{\tau}{L} \left[ \frac{ps}{Km} \right] \quad (II. 12)$$

Avec :

$$\tau = t_{max} - t_{min} = n_1 t_{min} \Delta \quad (II. 13)$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (II. 14)$$

Finalement on exprime la dispersion intermodale par :

$$D_i = \frac{n_1}{c} \Delta \quad (II. 15)$$

$L$  : est la longueur de la fibre.

$c$  : est la vitesse de la lumière.

$n_1$  : est l'indice de réfraction du cœur.

$n_2$  : est l'indice de réfraction de la gaine.

Avec  $t_{\max}$  et  $t_{\min}$  respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide. Dans une fibre à saut d'indice, le rayon le plus rapide est celui dont le trajet est parallèle à l'axe de la fibre. Ce rayon est associé à l'angle  $\theta$  égal à 0 et au mode appelé (mode fondamental). De même, le rayon le plus lent fait un angle  $\theta_{\max}$  par rapport à l'axe de la fibre avec  $\theta_{\max}$  défini par :

$$\theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}\right) \quad (\text{II. 16})$$

L'obtention d'une dispersion intermodale réduite se fait en minimisant  $\Delta$  ou en utilisant une fibre à gradient d'indice. En effet, dans ce cas-là, l'indice de réfraction  $n_1$  du cœur décroît avec le rayon de celui-ci de sorte que les rayons axiaux (à trajet court) voient un indice élevé (leur vitesse  $c/n$  est alors réduite) tandis que les rayons périphériques (à trajet long) voient un indice plus bas [2].

## VI.2 Dispersion chromatique

Même si la dispersion intermodale est complètement éliminée en permettant uniquement au mode fondamental de se propager dans la fibre monomode, il y aura toujours une dispersion de ce mode également. Une distorsion de ce type est appelée dispersion chromatique et dispersion modale de polarisation. La dispersion chromatique dans une fibre monomode est constituée de la dispersion du matériau et de la dispersion du guide d'onde [3].

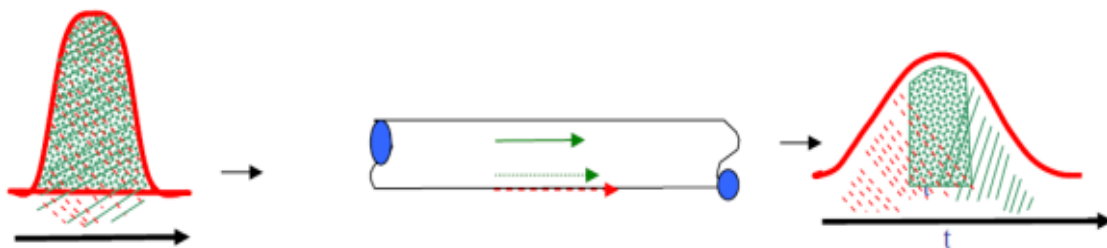


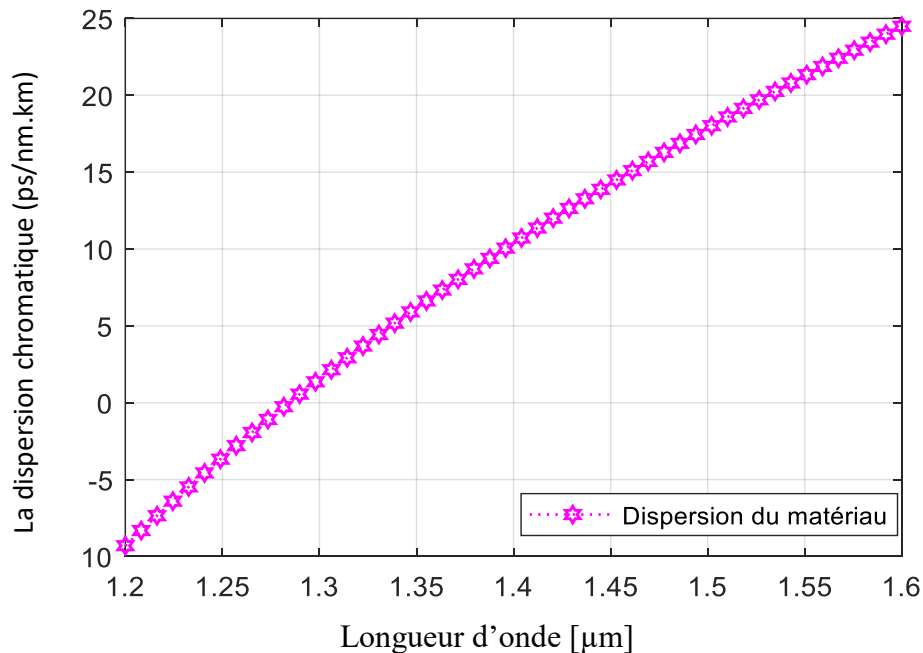
Figure II.11. Dispersion chromatique dans une fibre optique

### VI.2.1 Dispersion du matériau

C'est causé par le fait que l'indice de réfraction du verre utilisé varie (légèrement) en fonction de la longueur d'onde. Certaines longueurs d'onde possèdent des vitesses de groupe plus élevées et se déplacent donc plus rapidement que d'autres. Étant donné que chaque impulsion est constituée d'une gamme de longueurs d'onde, elle se dispersera dans une certaine mesure au cours de son trajet. Certaines longueurs d'ondes arrivent donc avant d'autres et l'impulsion s'étale (s'élargit) [37].

La dispersion du matériau peut être exprimée comme suite :

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_g}{d\lambda^2} \quad (\text{II. 17})$$



*Figure II.12 : dispersion du matériau en fonction de la longueur d'onde*

Nous intéressons à la dispersion de la silice qui est le matériau utilisé pour fabriquer les fibres optiques. La dispersion de la silice est une fonction continûment croissante. Elle est fortement négative aux courtes longueurs d'onde car la courbure de l'indice est significative dans cette zone spectrale.

### VI.2.2 Dispersion du guide d'onde

La forme (profil) de la fibre a un effet très important sur la vitesse de groupe. Ceci est dû au fait que les champs électriques et magnétiques qui constituent l'impulsion de lumière s'étendent à

l'extérieur du cœur dans la gaine. Le montant des champs qui se chevauchent entre le cœur et la gaine dépend fortement de la longueur d'onde. La plus grande longueur d'onde étend l'onde électromagnétique dans la gaine. La dispersion du guide d'onde peut être exprimée comme

$$D_g = -\frac{\Delta n}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad (\text{II. 18})$$

$b$  : la constante de propagation normalisée.

$V$  : la fréquence normalisée.

$\Delta$  : la différence d'indice relative.

Dans le domaine monomode ( $V < 2,405$ ), la quantité  $V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}$  est toujours positive ce qui implique que la dispersion du guide est toujours négative Figure (II.13) [37].

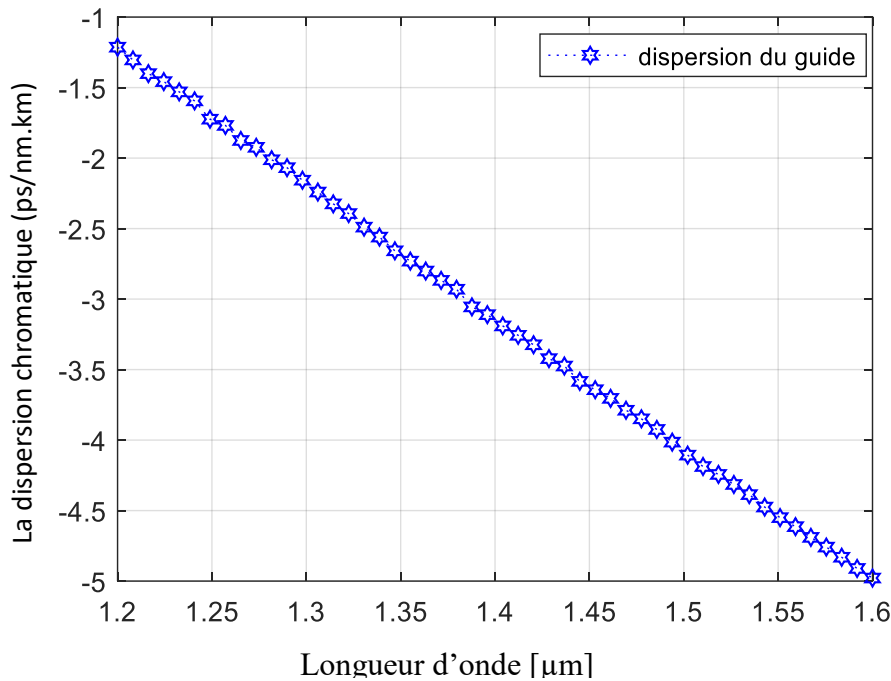
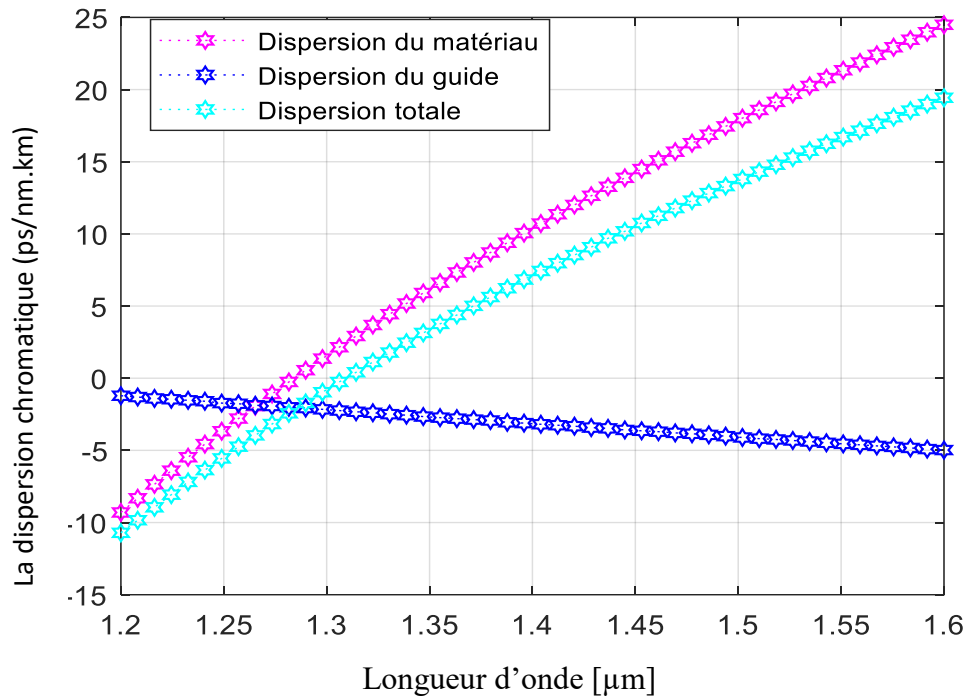


Figure II.13 : dispersion du guide d'onde en fonction de la longueur d'onde

Donc l'équation totale qui décrit la dispersion chromatique dans les fibres optiques est celle-ci :

$$D_T = D_M + D_G \quad (\text{II. 19})$$



**Figure II.14 : dispersion totale (chromatique) en fonction de la longueur d'onde**

Les deux types de dispersion, guide et matériau, se compensent ainsi exactement à la longueur d'onde de 1310nm donnant ainsi une dispersion chromatique nulle pour cette longueur d'onde, ce qui est le principal avantage à travailler dans la seconde fenêtre de transmission Figure (II.14).

### VI.2.3 Effets de La dispersion chromatique sur la transmission

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne donc différents temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émises si celles-ci ne sont pas parfaitement monochromatiques. Au bout d'une certaine distance, si cet étalement devient relativement important, un recouvrement générateur d'interférences entre symboles est possible. Cet élargissement  $\tau$  se calcule ainsi :

$$\tau = D \left( \frac{ps}{nm} \cdot km \right) * L(km) * \Delta\lambda(nm) \quad (II.20)$$

Avec  $D$  le coefficient de dispersion chromatique de la fibre,  $L$  la longueur de la fibre et  $\Delta\lambda$  la largeur spectrale de la source. Sur la figure (II.15) nous vérifions que plus la longueur de la fibre et long plus l'atténuation et l'étalement subi lors de la propagation est important [28].

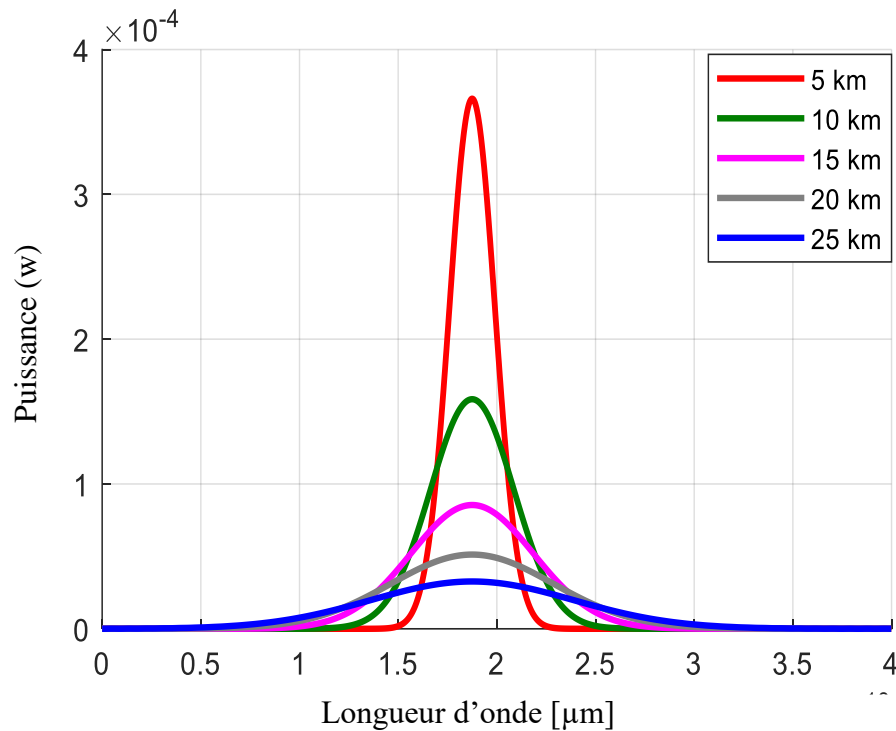


Figure II.15 : L'effet de l'atténuation et la dispersion chromatique Sur la transmission

### VI.3 Dispersion du mode de polarisation (PMD)

PMD (Polarization Mode Dispersion) est le temps d'arrivée différentiel des différentes composantes de polarisation d'une impulsion lumineuse transmise par une fibre optique. Cette impulsion lumineuse peut toujours être décomposée en paires de modes de polarisation orthogonaux [38]. Ces modes de polarisation d'un signal optique subissent des indices de réfraction différents, ils se propagent à des vitesses différentes, ce qui entraîne un élargissement et une dispersion des impulsions. Ce phénomène est connu sous le nom de dispersion modale de polarisation (PMD). L'un des paramètres couramment utilisés pour caractériser le retard PMD est la moyenne  $\Delta\tau$  (temps différentiel dépendant de la polarisation), aussi appelée le DGD (retard de groupe différentiel).

$$\Delta\tau = D_{PMD}\sqrt{L} [ps] \quad (II.21)$$

$L$  : est la longueur de la fibre.

$D_{PMD}$  : est le coefficient PMD qui représente les caractéristiques PMD d'une longueur particulière de fibre. Dans une liaison par fibre optique qui consiste de plusieurs longueurs concaténées successives de fibre, chaque longueur aura un coefficient PMD réel différent, généralement mesuré en  $\left[\frac{ps}{\sqrt{km}}\right]$  [28].

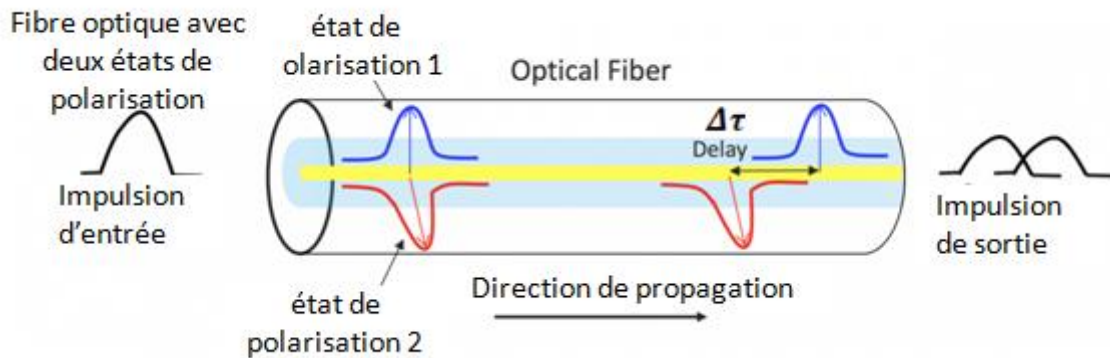


Figure II.16 : Effet de la PMD sur le mode

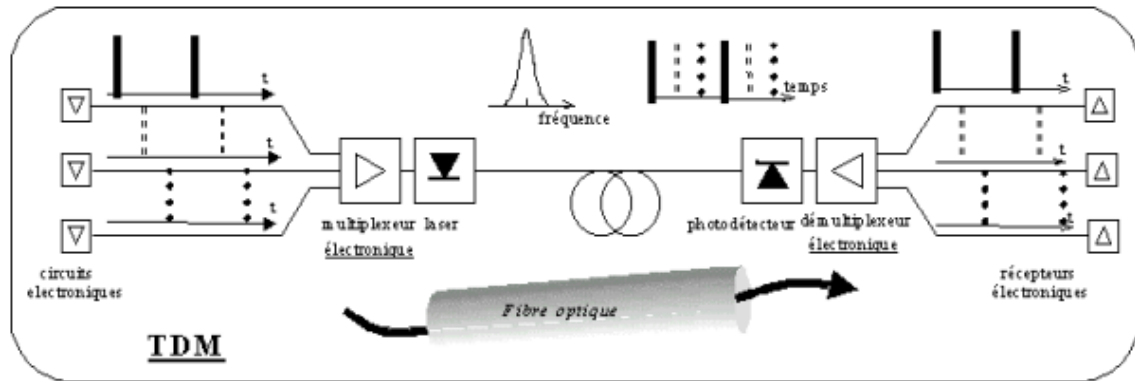
## VII. Les techniques de transmission dans Les fibres optiques

Les fibres optiques possèdent, dans la fenêtre spectrale généralement utilisée, une bande utilisable très importante (environ 15 THz autour de la longueur d'onde 1,55  $\mu\text{m}$ ). Théoriquement, les débits qui peuvent être transmis sont donc extrêmement élevés. C'est d'autant plus intéressant qu'aujourd'hui le nombre et la taille des informations échangées sont de plus en plus importants. Néanmoins, actuellement, le traitement électronique des signaux électriques avant modulation et après détection n'atteint pas de telles fréquences. C'est pourquoi diverses solutions ont été imaginées pour profiter des capacités de la fibre optique et donc augmenter le transfert d'informations sur un même canal. Dans la plupart des cas, le principe reste identique : utiliser  $N$  signaux au débit  $D$  équivalent en termes de capacité à un signal au débit ( $N * D$ ), irréalisable à l'heure actuelle. C'est ce qu'on appelle le multiplexage, et les débits transportés seraient désormais plus importants. Le signal concentré des flux d'origines diverses est appelé signal multiplex. Pour conserver l'intégrité de chaque signal sur le canal, le multiplexage introduit, entre les signaux, une séparation temporelle, spatiale ou fréquentielle.

### VII.1 Le multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing, multiplexage à répartition temporelle (MRT)) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant, ceci à tour de rôle pour chaque utilisateur. L'allocation de cette bande passante se fait en divisant l'axe du temps en périodes de durée fixe, et chaque utilisateur ne va transmettre que pendant une de ces périodes déterminées. Un intervalle de temps fixe (IT) est successivement assigné à une source.

Le multiplexage TDM permet alors de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé (par exemple, conception d'un débit 40 Gbits/s, à partir de 4 séquences à 10 Gbits/s) [12].



*Figure II.17 : Schéma de principe du multiplexage ETDM dans les communications par fibre optique*

## VII.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Les besoins croissants en débit ont amené à rechercher une technique pour augmenter les capacités de transmission des réseaux optiques. 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 meilleure est de multiplier le débit par câble (sur une seule fibre) ; ce procédé est obtenu par la technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) qui consiste en un multiplexage en longueur d'onde. A l'inverse de la technologie TDM qui n'utilise qu'une seule longueur d'onde par fibre optique. L'idée est d'injecter simultanément dans une fibre optique plusieurs trains de signaux numériques sur longueurs d'ondes distinctes.

La fibre optique se prête bien à ce type d'usage car sa bande passante est très élevée : de l'ordre de 25000 Ghz. Elle présente donc un fort potentiel au multiplexage de très nombreux canaux sur de longues distances.

La norme internationale G692 définit la plage de longueurs d'ondes dans la fenêtre de transmission de 1530 à 1565 nm. L'espacement normalisé entre deux longueurs d'ondes est de 1.6 nm. La fibre optique utilisée est de type monomode.

La technologie WDM est dite DWDM (Dense Division Multiplexing) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 0.8 nm ou lorsque plus de 16 canaux sont utilisés.

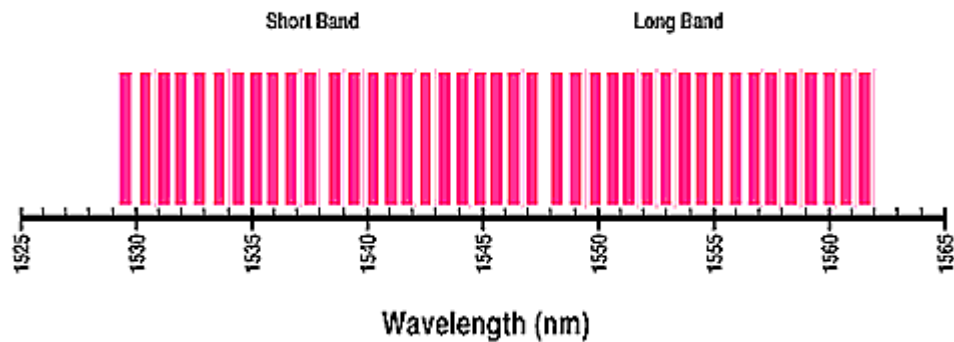


Figure II.18 : Peigne des fréquences en DWDM

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 [2].

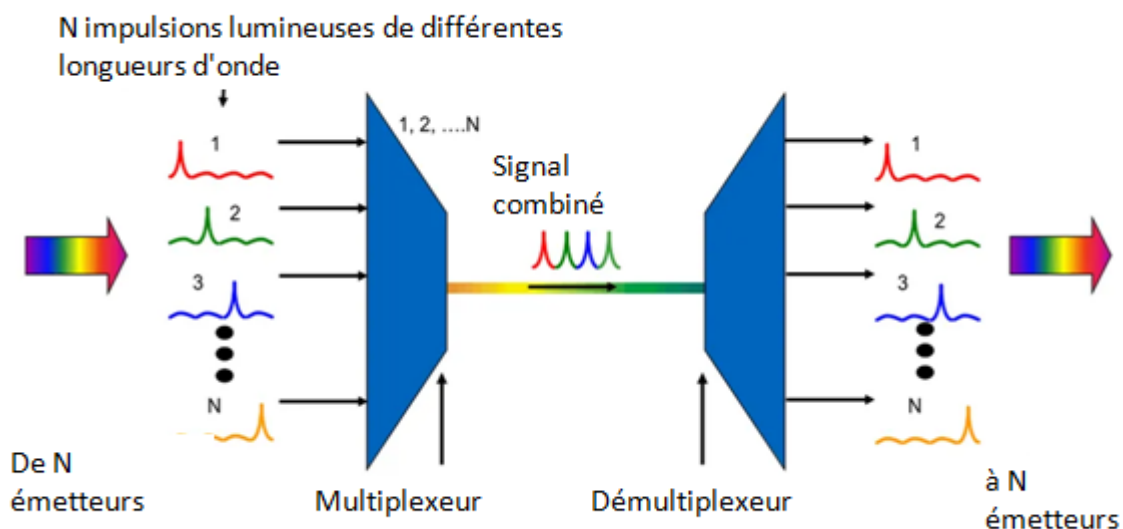


Figure II.19 : Schéma de principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre optique

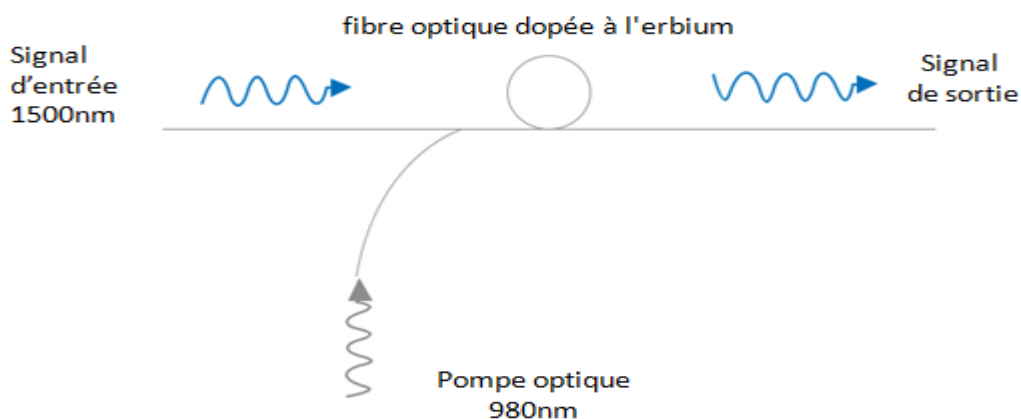
### VIII. Amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA)

Est un dispositif qui permet d'amplifier un signal à fibre optique. Il est utilisé dans le domaine des télécommunications et dans divers types de domaines de recherche. Un EDFA est "dopé" avec un matériau appelé erbium. Le terme "dopage" désigne le processus d'utilisation d'éléments chimiques pour faciliter les résultats par la manipulation d'électrons [39]. Il existe plusieurs types d'amplificateurs à fibre optique : l'amplificateur optique à semi-conducteur (SOA), l'amplificateur à fibre Raman et Brillouin, et l'amplificateur à fibre dopée

à l'erbium (EDFA). Parmi ces types d'amplificateurs optiques, l'EDFA est le plus largement déployé dans le système WDM. Il utilise la fibre dopée à l'erbium comme support d'amplification optique pour améliorer directement les signaux. Actuellement, l'EDFA est couramment utilisé pour compenser la perte de fibre dans les communications optiques longue distance. La caractéristique la plus importante est qu'il peut amplifier plusieurs signaux optiques simultanément et facilement combiné avec la technologie WDM. Généralement, il est utilisé dans la bande C et la bande L, presque dans la plage de 1530 à 1565 nm. Mais il convient également de noter que les EDFA ne peuvent pas amplifier les longueurs d'onde inférieures à 1525 nm [40].

### VIII.1 Principe de fonctionnement de l'EDFA

En général, l'EDFA fonctionne sur le principe de l'émission stimulée de photons. Avec EDFA, une fibre optique dopée à l'erbium au cœur est pompée avec de la lumière provenant de diodes laser [39]. C'est à dire que le signal optique, tel qu'un signal de 1550 nm, entre dans un amplificateur EDFA à partir de l'entrée. Le signal de 1550 nm est combiné à un laser de pompe de 980 nm avec un dispositif WDM. Le signal et le laser de pompe traversent une longueur de fibre dopée avec des ions Erbium. Comme nous l'avons vu précédemment, l'EDFA utilise la fibre dopée à l'erbium comme support d'amplification optique. Le signal à 1550 nm est amplifié par interaction avec les ions dopants Erbium. Cette action amplifie un signal optique faible à une puissance plus élevée, ce qui augmente la puissance du signal [40].



**Figure II.20 : un schéma détaillé sur le fonctionnement de l'EDFA**

La principale limitation pratique d'un EDFA provient de la non-uniformité spectrale du gain de l'amplificateur (figure II.21). Même si le spectre de gain d'un EDFA est relativement large, le gain est loin d'être uniforme (ou plat) sur une large gamme de longueurs d'onde. En

conséquence, différents canaux d'un signal WDM sont amplifiés de différentes quantités. Ce problème devient assez grave dans les systèmes long-courriers utilisant une chaîne en cascade d'EDFA. La raison en est que de petites variations du gain de l'amplificateur pour les canaux individuels croissent de manière exponentielle sur une chaîne d'amplificateurs en ligne. Même une différence de gain de 0,2 dBm augmente jusqu'à 20 dBm sur une chaîne de 100 amplificateurs en ligne, ce qui fait varier les puissances des canaux jusqu'à un facteur 100, une plage de variation inacceptable en pratique. Pour amplifier tous les canaux à peu près de la même quantité, la largeur de bande entière d'environ 40 nm peut être utilisée si le spectre de gain est aplati en introduisant des pertes sélectives en longueur d'onde. L'idée de base de l'aplatissement du gain est assez simple [2].

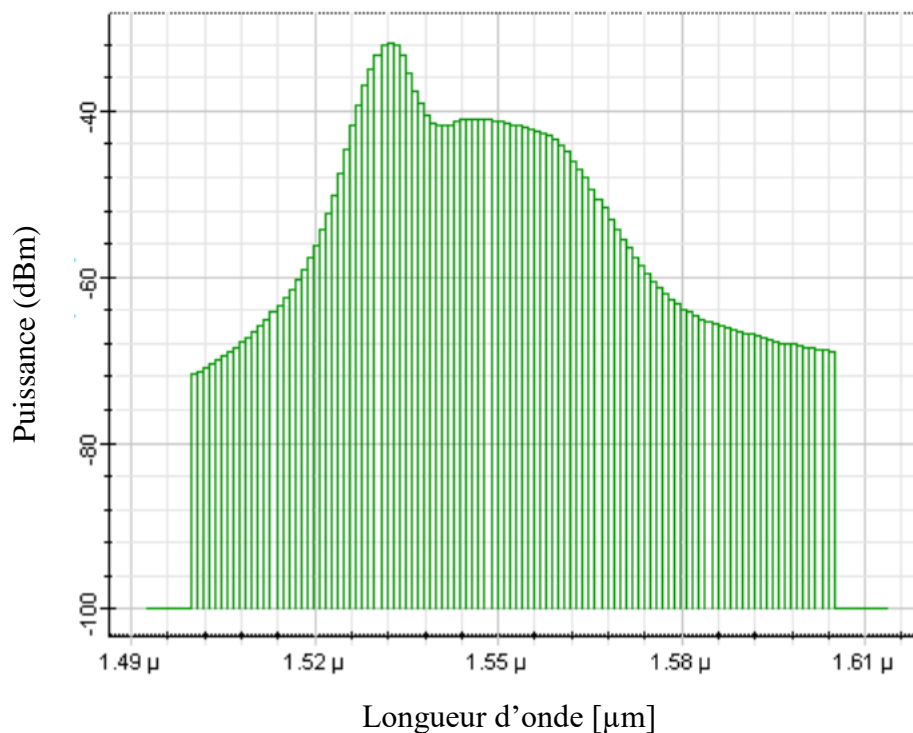


Figure II.21 : Spectre d'un EDFA

## IX. Fibre à réseaux de Bragg (FBG)

### IX.1 Historique

Un réseau de Bragg est formé par un changement périodique de l'indice de réfraction du cœur d'une fibre optique. La formation de réseaux permanents dans une fibre optique a été démontrée pour la première fois par Hill et des autres. En 1978 au centre canadien des recherches sur les communications(CRC), Ottawa, Ontario, Canada. Ils ont lancé d'intenses rayonnements laser argon-ion dans une fibre dopée au Germanium et ont observé qu'après

plusieurs minutes, une augmentation de la réflexion, l'intensité lumineuse s'est produite qui a augmenté jusqu'à ce que presque toute la lumière ait été réfléchi par la fibre. Les mesures spectrales, faites indirectement par l'ajustement de la déformation et de la température du réseau de fibres, ont confirmé qu'un filtre à réseau de Bragg à bande très étroite avait été formé sur toute la longueur de la fibre (1 m). Cette réalisation, appelée par la suite "grilles Hill", était le résultat de recherche sur les propriétés non linéaires de la fibre de silice dopée au Germanium [41].

### IX.2 Principe d'une fibre à réseaux de Bragg

Un réseau de Bragg (FBG), en termes simples, est un miroir pour une bande étroite de couleurs (longueurs d'onde) passant à travers une fibre optique. Il est transparent pour les autres longueurs d'onde, qui traversent la fibre sans modification. Cet effet miroir spécifique à la longueur d'onde est obtenu en créant un changement périodique de l'indice de réfraction effectif du cœur de la fibre [42]. C'est-à-dire en fonction de la période du réseau, la lumière d'une longueur d'onde spécifique, appelée longueur d'onde de Bragg  $\lambda_B$  est réfléchi, et les autres longueurs d'onde sont transmises. La longueur d'onde de Bragg est donnée par :

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (\text{II. 22})$$

Où  $n_{eff}$  est l'indice de réfraction effectif du cœur de la fibre optique et  $\Lambda$  est le changement périodique de l'indice de réfraction (le pas du réseau). A partir de l'équation (II.22), on remarque que la longueur d'onde de Bragg dépend de l'indice de réfraction et de la période de réseau. Une petite quantité de lumière incidente est réfléchi à chaque changement périodique de l'indice de réfraction. La totalité des ondes lumineuses réfléchies sont combinées dans une à une longueur d'onde particulière. La longueur d'onde à laquelle la réflexion a lieu est appelée 'la longueur d'onde de Bragg [43].

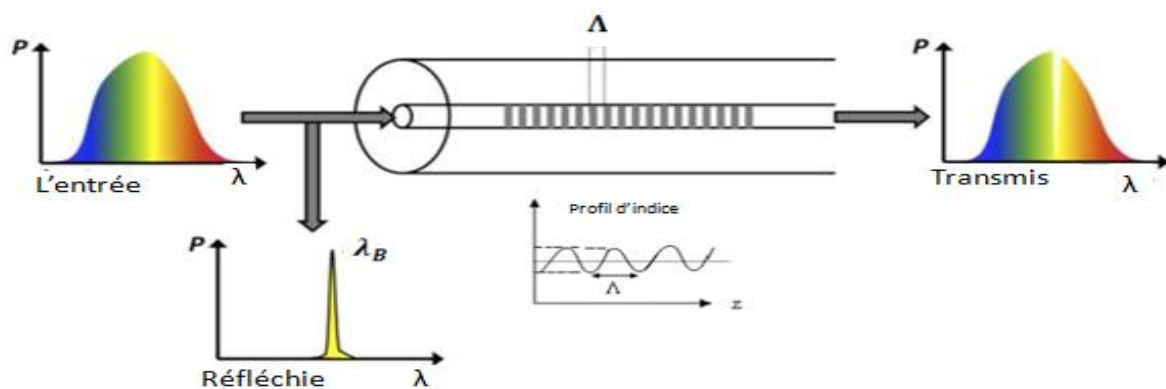


Figure II.22 : Schéma d'un réseau de Bragg et leurs spectres

### IX.3 Technique de fabrication des fibres à réseaux de Bragg

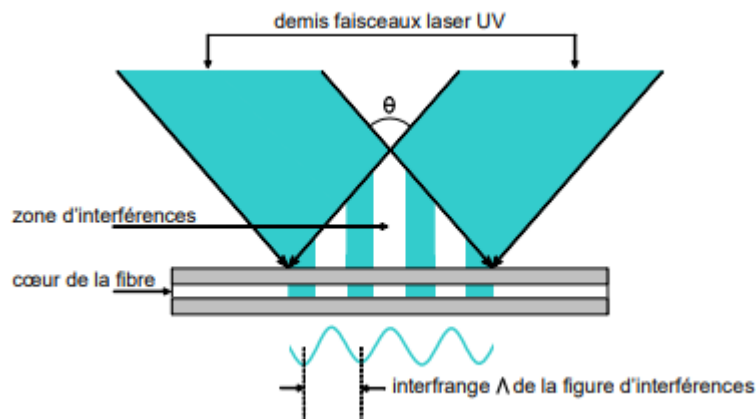
Il existe plusieurs techniques de fabrication des FBG, mais la plus répandue est décrite ci-dessous :

- **Technique interférométrique**

La méthode d'inscription interférométrique, dite encore « holographique » consiste à utiliser un interféromètre à deux ondes. On place la fibre dans la zone d'interférence des deux faisceaux cohérents issus de la source laser UV (de longueur d'onde  $\lambda_0$ ) fonctionnant en régime soit continu soit impulsionnel. La figure d'interférence est une modulation d'intensité sinusoïdale, périodique de pas  $\Lambda$ . Cette modulation est alors convertie, grâce à la photosensibilité du cœur de la fibre, en une modulation d'indice proportionnelle. De cette manière, on inscrit un réseau de phase de pas :

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 \sin\theta} \quad (\text{II.23})$$

Cette technique très souple d'emploi est largement utilisée, car elle permet d'inscrire, en n'importe quel point de la fibre, un réseau de pas donné (et donc de longueur d'onde de Bragg choisie), simplement en ajustant l'angle d'incidence  $\theta$  des deux faisceaux UV [44].



*Figure II.23 : Inscription d'un réseau par la technique interférométrique*

### IX.4 Types de réseaux de Bragg

Il existe plusieurs types différents de réseaux de Bragg à fibres optiques, tels que le réseau de Bragg uniforme, le réseau de Bragg à pas variable (chirpé).

### IX.4.1 Réseau de Bragg uniforme

Dans ces réseaux standards, la modulation d'indice de réfraction varie suivant une fonction quasi-sinusoïdale sur une section de longueur  $L$  du cœur de la fibre optique. Dans cette section du réseau, le profil de l'indice de réfraction s'écrit de la forme générale suivante :

$$n(z) = n_0 + \frac{\delta(z)}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_0} z\right) \quad (\text{II. 24})$$

Où  $z$  est l'abscisse le long de la fibre optique. En dehors de segment  $L$  du réseau, l'indice vaut l'indice moyen  $n_0$  de la fibre optique,  $\Lambda_0$  est la période de modulation. Pour un réseau uniforme l'amplitude de modulation  $\delta n(z)$  est constante. Il est possible de paramétrer cette amplitude avec une fonction d'enveloppe de type gaussien ou Sinc.....etc. Il également possible de paramétrer la période en fonction de la longueur. La période est constante dans le cas d'un réseau uniforme [2].

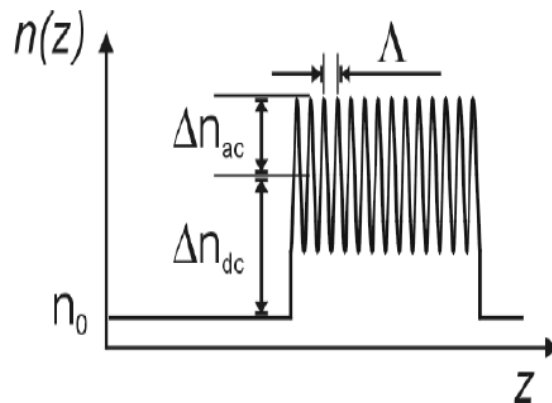


Figure II.24 : Profil de l'indice de réfraction de réseau uniforme

Il existe deux types de réseaux de Bragg uniformes :

#### IX.4.1.1 Réseau de Bragg à pas long

Les réseaux de Bragg à pas long ont des périodes beaucoup plus longues que les réseaux à pas court. Elles sont généralement de l'ordre de  $100 \mu\text{m}$  à  $1\text{mm}$ . Ils couplent le mode qui se propage dans le cœur aux modes de gaine co-propagatifs, par conséquent le spectre en transmission donne plusieurs bandes d'atténuations qui correspondent à chaque couplage avec un mode de gaine différent.

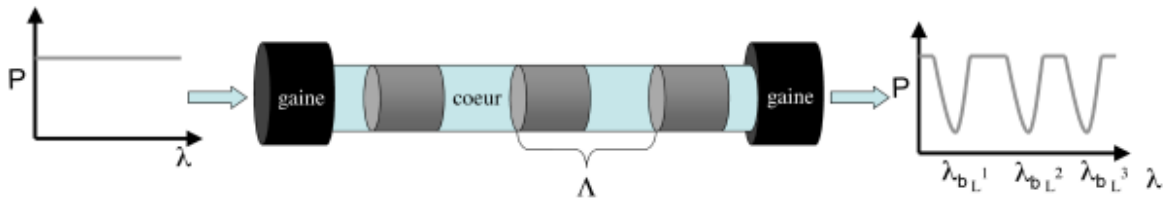


Figure II.25 : Réponse d'un réseau de Bragg à pas long

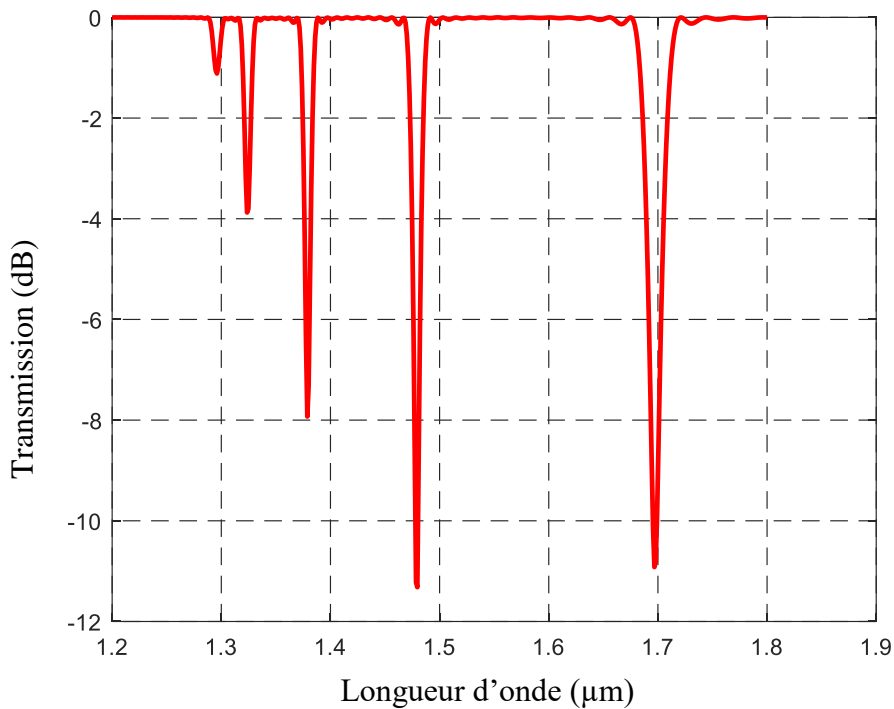


Figure II.26 : réponse spectrale en transmission d'un réseau de Bragg droit à pas long inscrit dans une fibre monomode conventionnelle

#### IX.4.1.2 Réseau de Bragg à pas courts

Les réseaux de Bragg consistent dans ce cas en une variation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre le long de son axe avec une période généralement plus courte que celle de l'indice de réfraction de la fibre. L'indice de réfraction du cœur de la fibre le long de son axe avec une période généralement inférieure au micromètre sur une longueur L. Dans le cas d'une fibre monomode, de tels réseaux entraînent un couplage du mode guidé fondamental avec le mode guidé contre-propagatif à une longueur d'onde donnée. Les réseaux de Bragg à pas courts sa période est inférieure à la longueur d'onde optique, qui est de l'ordre de 1,3-1,6 μm. Pour un réseau de Bragg à pas court typique, la période du réseau est de  $\Lambda = 0,5 \mu\text{m}$  [45].

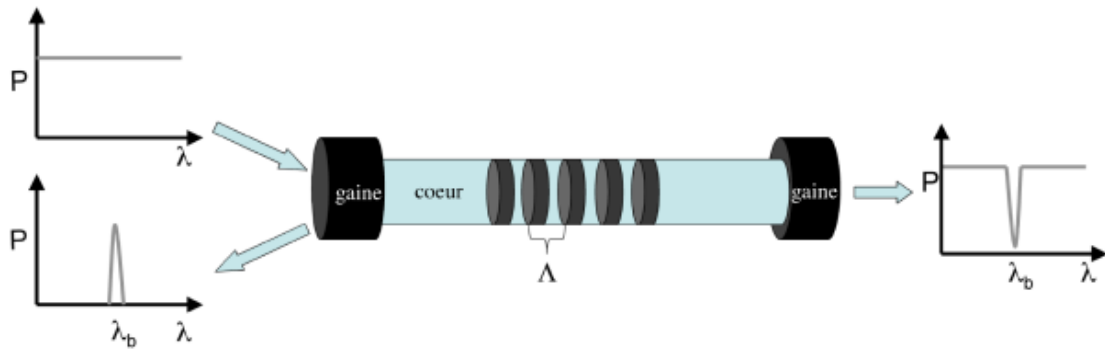


Figure II.27 : Réponse d'un réseau de Bragg à pas court

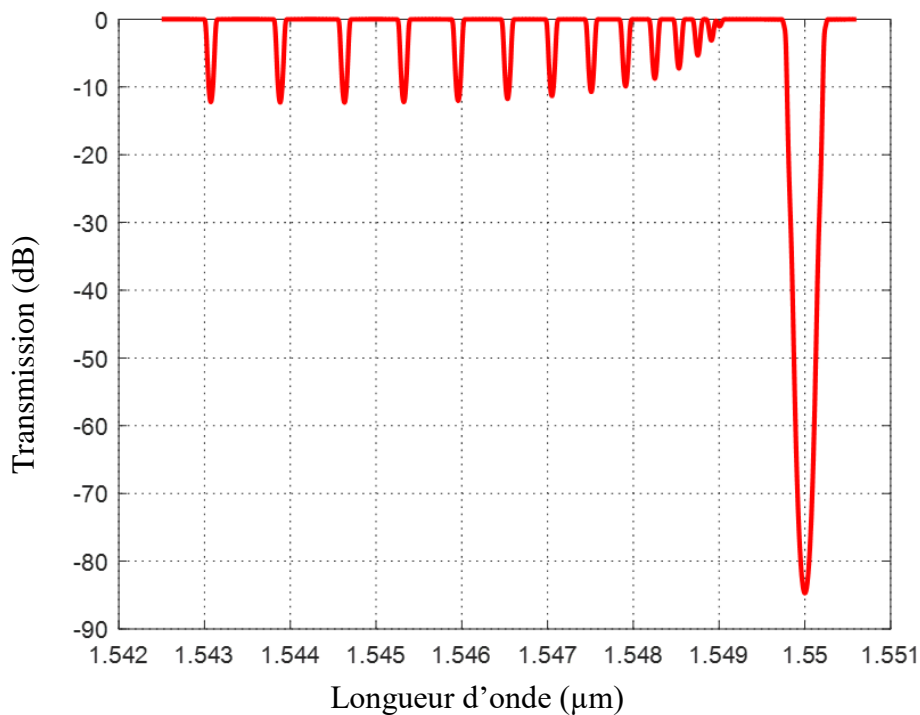


Figure II.28 : réponse spectrale en transmission d'un réseau de Bragg droit à pas courts inscrit dans une fibre monomode conventionnelle

#### IX.4.2 Réseau de Bragg à pas variable (chirpé)

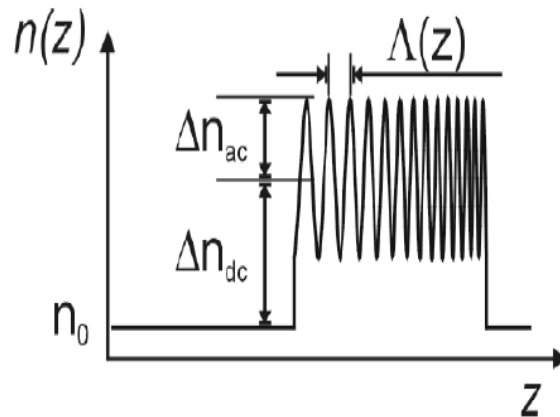
Le réseau de Bragg à pas variable (chirpé) est un réseau dont la période varie le long de la fibre. Il ya deux quantités variables qui peuvent être changées pour obtenir un réseau à pas variable : l'une est de changer la période de Bragg, et l'autre est de varier l'indice de réfraction le long de la direction de propagation dans la fibre. La figure (II.29) montre un réseau de Bragg linéaire et à pas variable. Dans ce cas, la période du réseau varie linéairement avec la longueur tout le long du réseau de Bragg. Le réseau réfléchit des longueurs d'onde variables le long de la longueur du réseau avec une dépendance entre la valeur de la longueur

d'onde réfléchi et la position dans le réseau. Cela veut dire que la longueur d'onde de Bragg varie en fonction de la longueur de réseau de Bragg.

La variation d'indice effective d'un réseau chirpé s'exprime de la manière suivante :

$$n(z) = n_0 + \frac{\delta n(z)}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_0 + C_\Lambda z} z\right) \quad (\text{II. 25})$$

$C_\Lambda$  : est le coefficient de chirp [2].



**Figure II.29: Profil de l'indice de réfraction d'un réseau de Bragg linéaire à pas variable**

### IX.5 L'apodisation des réseaux de Bragg

L'apodisation des réseaux peut considérablement améliorer le rapport de suppression des lobes latéraux non seulement pour le réseau uniforme mais aussi pour le réseau non uniforme. L'apodisation dans un réseau indique que la modification de l'indice de réfraction est modulée à chaque période le long de la direction de propagation du réseau, de ce fait elle réduit les réflexions du réseau induites par les modes latéraux. Du point de vue mathématique, la fonction de modulation de l'indice de réfraction du réseau est multipliée par une fonction d'apodisation. Il est très important de minimiser et, si possible, éliminer la réflexion des lobes secondaires. L'effet de l'apodisation dans les modèles du réseau de Bragg peut être représenté par une fonction de  $g(z)$ . L'indice de réfraction d'un réseau de Bragg apodisé peut être écrit par l'équation suivante :

$$n(z) = n_0 + \delta n_{dc}(z) + \delta n_{ac}(z) \cdot g(z) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_z} z\right) \quad (\text{II. 26})$$

Où  $n_0$  est l'indice de réfraction du cœur de fibre sans perturbation,  $\delta n_{dc}(z)$  est la valeur moyenne de la modulation de l'indice.  $\delta n_{ac}(z)$  est l'amplitude de modulation de l'indice le long de la fibre,  $g(z)$  est la fonction d'apodisation et  $\Lambda$  est la période du réseau de Bragg. Plusieurs fonctions d'apodisation qui peuvent être utilisées dans le programme de simulation. On peut également définir quelques profils dans la liste suivante :

- Réseau non-apodisé :

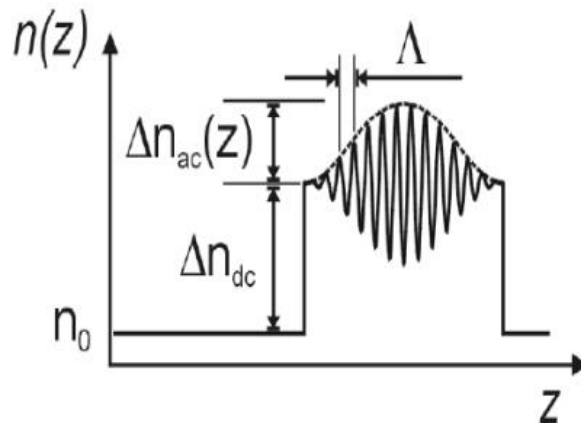
$$g(z) = 1$$

- Profil de fonction de Gaussien :

$$g(z) = \exp\left[-4\ln(2)\left[\frac{z-\frac{L}{2}}{L}\right]^2\right], \quad 0 \leq z \leq L \quad (\text{II. 27})$$

- Profile de la fonction Sinc [2]:

$$g(z) = \frac{\sin\left[\frac{2\pi}{L}\left(z-\frac{L}{2}\right)\right]}{\frac{2\pi}{L}\left(z-\frac{L}{2}\right)}, \quad 0 \leq z \leq L \quad (\text{II. 28})$$



**Figure II.30: Profil de l'indice de réfraction réseau de Bragg apodisé (enveloppe gaussienne)**

## **X. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit le principe de fonctionnement de la fibre optique, le système WDM, ainsi les EDFA et le réseau de Bragg. Dans la première partie, nous avons présenté les propriétés des différents types des fibres optiques et les principaux effets qu'une onde optique peut subir lorsqu'elle se propage le long de la fibre. Ensuite, nous avons établi la relation entre le système WDM et l'EDFA et leur limitation. Dans la dernière partie, nous avons présenté une étude sur les réseaux de Bragg et décrit les paramètres caractéristiques de ces réseaux. De plus, leur grande flexibilité et leur conception les rendent très intéressants pour des applications adaptées aux besoins de l'utilisateur, telles que l'égalisation du gain ou la compensation de la dispersion.

# Chapitre 3

*Optimisation des FBG pour  
l'aplatissement du gain de l'EDFA.*

## I. Introduction

Les fibres optiques, bien qu'étant l'objet optique le plus transparent, possède une perte de 0.2 dB/km. Lors de la propagation sur de longues distances, il devient alors nécessaire d'amplifier le signal optique. L'amplificateur EDFA présente l'avantage d'amplifier la totalité du peigne des longueurs d'onde des télécommunications simultanément. Toutefois, la courbe de gain d'un tel amplificateur n'est pas uniforme. Les différentes longueurs d'onde du peigne WDM sont alors amplifiées de manière inégale. Cette différence est d'autant plus critique que le nombre d'amplificateurs est élevé. Un réseau de Bragg présente une micro structuration à une dimension. Ce type de micro structuration est utilisé comme un filtre spectral dans les réseaux de télécommunication. Dans ce chapitre, on s'intéresse dans un premier temps à l'étude et l'optimisation des réponses spectrales des réseaux de Bragg. Ensuite et pour corriger et aplatir le gain de l'EDFA dans les systèmes de communication à long distance, on va optimiser les performances des différents réseaux de Bragg.

La conception des systèmes associés est un problème de plus en plus complexe, tant le nombre de paramètres influant sur les performances de la liaison est important. De plus, il est demandé à ces derniers à la fois de transporter des capacités d'informations de plus en plus importantes, et de se renouveler très rapidement. La méthode expérimentale, qui consiste en des mesures itératives sur un banc de test, est très coûteuse en temps et en argent. Aussi, les outils de simulation constituent une assistance intéressante pour trouver des solutions, aussi bien au niveau du composant que du système. Les logiciels peuvent être une aide à la conception et à la prise de décision, tout en évitant la multiplication d'essais compliqués et onéreux

Il existe certains logiciels particuliers qui permettent la simulation des circuits optiques et optoélectroniques comme Linksim, Comsis et Lumerical

Dans ce chapitre nous allons étudier comment optimiser le gain des amplificateurs EDFA pour avoir un gain uniforme en utilisant les logiciels OptiGrating et OptiSystem de Optiwave Systems.

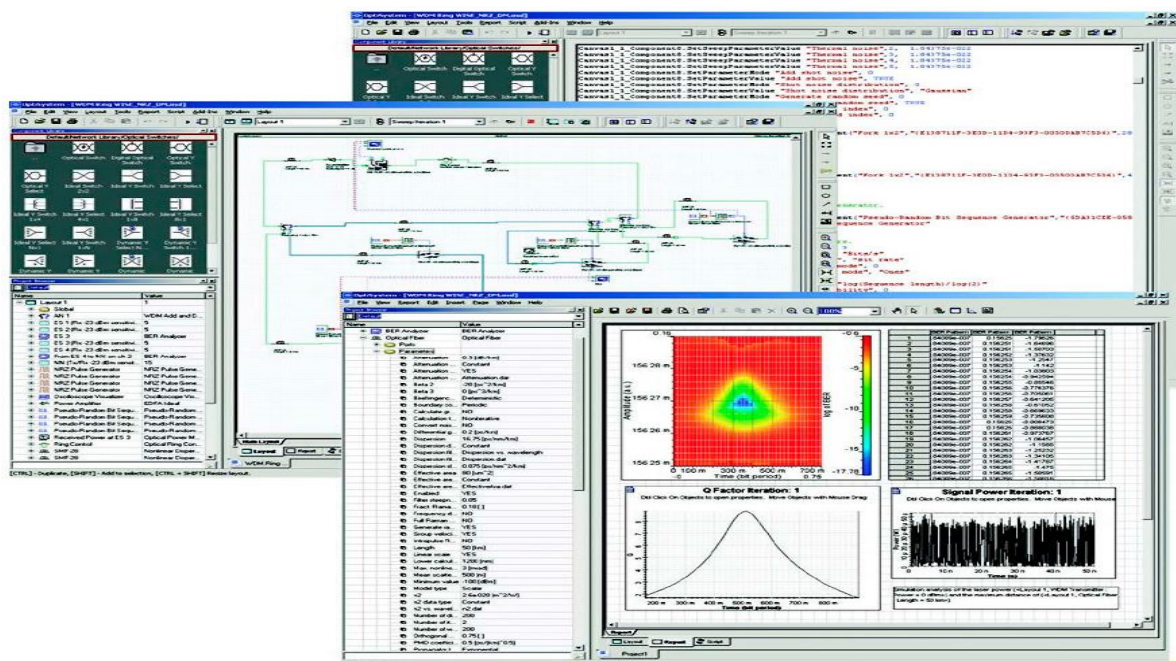
## II. Présentation des logiciels de simulation

Optiwave est le principal développeur d'outils logiciels pour la conception, la simulation et l'optimisation de composants, de liaisons, de systèmes et de réseaux dans les domaines en évolution dynamique de la nanotechnologie photonique, de l'optoélectronique, des réseaux optiques et d'autres applications photoniques. La mission de l'entreprise est de fournir des

logiciels d'automatisation de la conception de haute qualité et à la pointe de la technologie. Parmi les logiciels de cette société sur lesquels nous avons travaillé, on cite : l'OptiSystem et l'OptiGrating [46].

## II.1 OptiSystem

Le logiciel OptiSystem a été créé pour répondre aux besoins des chercheurs, des ingénieurs en télécommunications optiques, des intégrateurs de systèmes, des étudiants et d'une grande variété d'autres utilisateurs.



*Figure III.1 : Capture d'écran sur la fenêtre principale de logiciel OptiSystem*

Il répond à l'évolution du marché de la photonique, qui demande un outil de conception de systèmes optiques à la fois puissant et simple d'utilisation. OptiSystem permet aux utilisateurs de planifier, tester et simuler (dans le domaine temporel et fréquentiel) :

- Conceptions de réseaux optiques, y compris OTDM, anneaux SONET/SDH, CWDM, DWDM, PON, câble, OCDMA.
- Transmission monomode/multimode.
- Optique en espace libre (FSO), radio sur fibre (ROF), OFDM (direct, cohérent). Amplificateurs et lasers (EDFA, SOA, Raman, Hybride, optimisation GFF, Lasers à fibre).
- Traitement du signal (Electrique, Numérique, Tout-Optique)

- Conception de sous-systèmes émetteur et récepteur (direct/cohérent)
- Formats de modulation (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64).
- Analyse des performances du système (diagramme de l'œil/facteur Q/BER, puissance du signal/OSNR, états de polarisation, diagrammes de constellation, pénalités linéaires et non linéaires) [47].

## II.2 OptiGrating

Un réseau complexe est approximé par une séquence de segments uniformes et analysé en connectant les segments avec la méthode de matrice de transfert bien connue. Cela donne au concepteur les informations nécessaires pour tester et optimiser les conceptions de réseaux. Il permet de :

- Réflecteurs de Bragg en fibre.
- Suppression de la bande latérale à l'aide de l'apodisation du réseau.
- Capteurs à fibre et à guide d'ondes.
- Réseaux à longue période avec couplage aux modes de gaine [48].

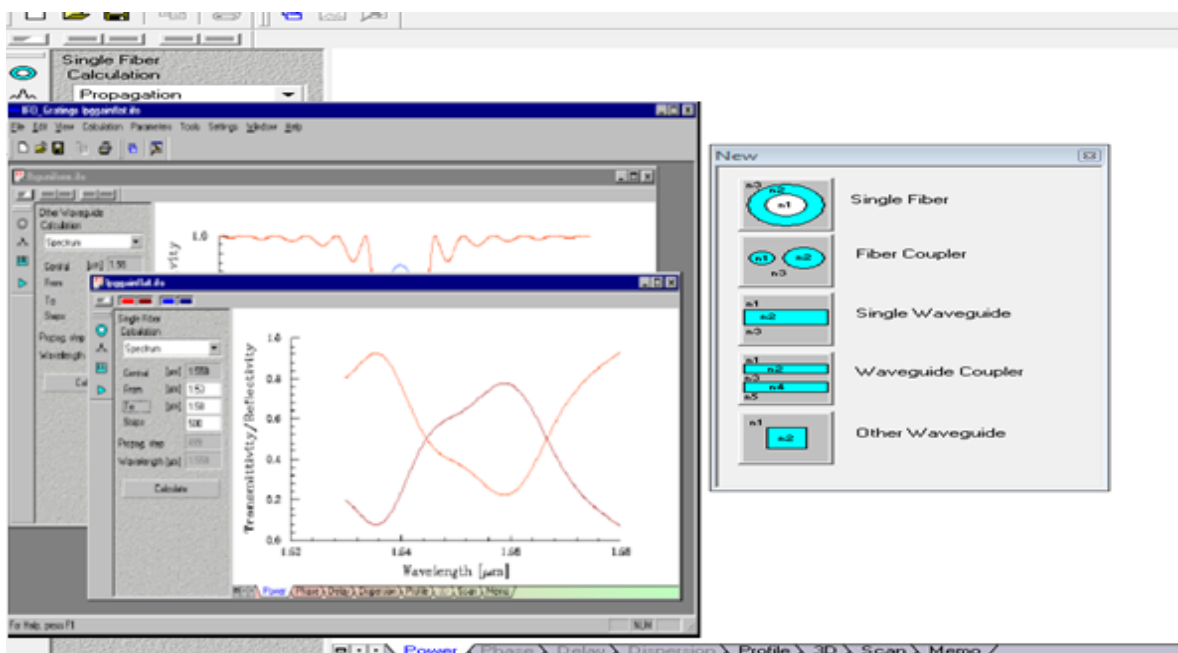


Figure III.2 : Capture d'écran sur la fenêtre principale de logiciel OptiGrating

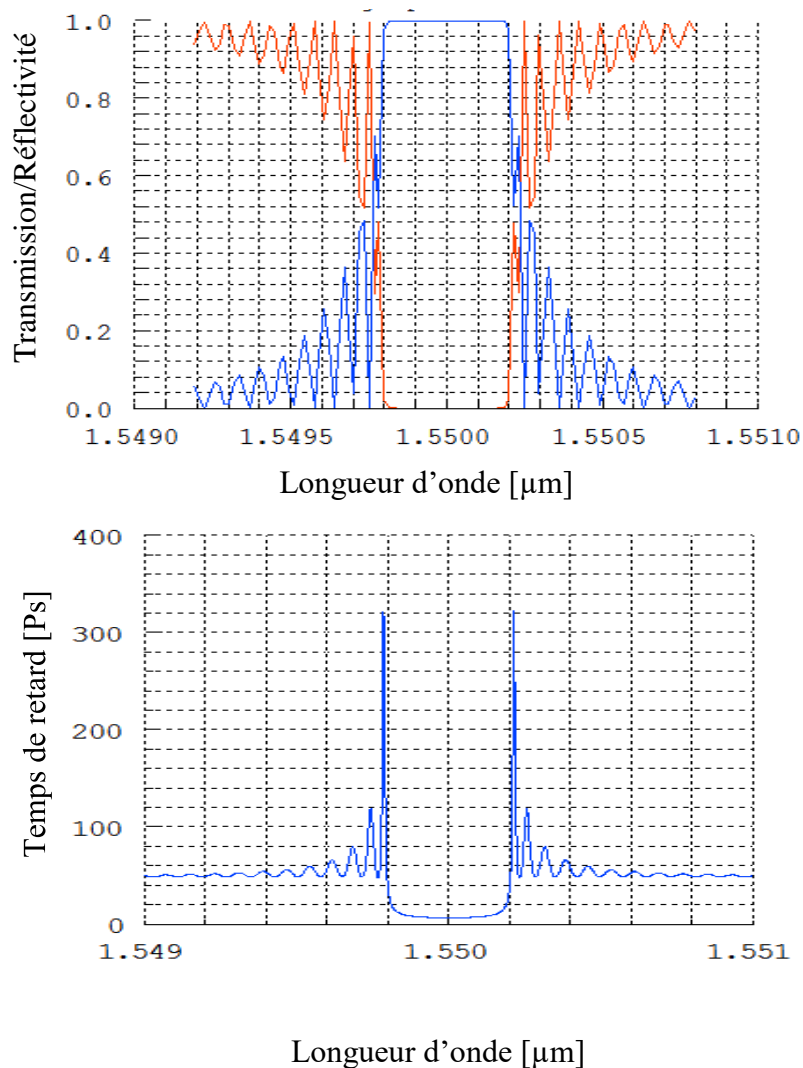
## III. Simulation et caractéristiques

Notre objectif est de concevoir un filtre optique qui permet d'aplatir le gain de l'EDFA. Donc on doit connaître les caractéristiques du réseau de Bragg, comme par exemple, la transmission, la réflectivité et le temps de retard. Notons que plusieurs paramètres physiques

peuvent être ajustés pour atteindre la flexibilité de réflectivité et un temps de retard fixe avec un minimum de bandes latérales. Nous allons utiliser le logiciel OptiGrating est les relations mentionnées dans le chapitre II dans la simulation du spectre du réseau de Bragg.

### III. 1 Modélisation du réseau de Bragg uniforme

Les réseaux de Bragg uniformes forment une classe particulière de réseaux ayant une période de Bragg  $\Lambda$  constante. La réflectivité ainsi que le temps de retard d'un réseau de Bragg uniforme sont représentées à la figure (III.3) en utilisant les paramètres suivants :  $\Lambda = 0.533815 \mu m$ ,  $L = 10000 \mu m$ ,  $n_{eff} = 1.447$  et  $\delta n = 0.0007$ .



**Figure III.3 : Spectre de réflectivité(a) et de temps de retard(b) d'un réseau de Bragg uniforme**

D'après la figure (III.3), nous voyons que les spectres de la réflectivité, la transmission, et le temps de retard sont symétriques par rapport à la longueur d'onde de Bragg. La réponse spectrale en réflexion du réseau de Bragg uniforme présente un profil proche de celui du carré

de la fonction sinus cardinal centré sur la longueur  $\lambda=1550$  nm. Le pic du coefficient de réflexion qui est près de 100% atteint la saturation. Dans ce cas, le réseau présente une très forte réflectivité. Il apparaît également une bande de longueur d'onde, appelée bande interdite, pour laquelle la lumière est considérée comme totalement réfléchi. Celle-ci est centrée sur la longueur d'onde de Bragg. En dehors de cette bande, la réponse spectrale présente des oscillations qui s'amortissent au fur et à mesure qu'elles s'éloignent de la longueur d'onde de Bragg. Notons que le temps de retard (Time Delay) qui est un facteur important, est proportionnel à la longueur du réseau. On remarque aussi que le temps de retard est constant à l'intérieur de la bande du spectre de réflexion. Ce dernier n'introduit pas des délais différents pour les différentes fréquences. Cependant, Les FBG uniformes peuvent être utilisés pour l'aplatissement du gain de l'EDFA.

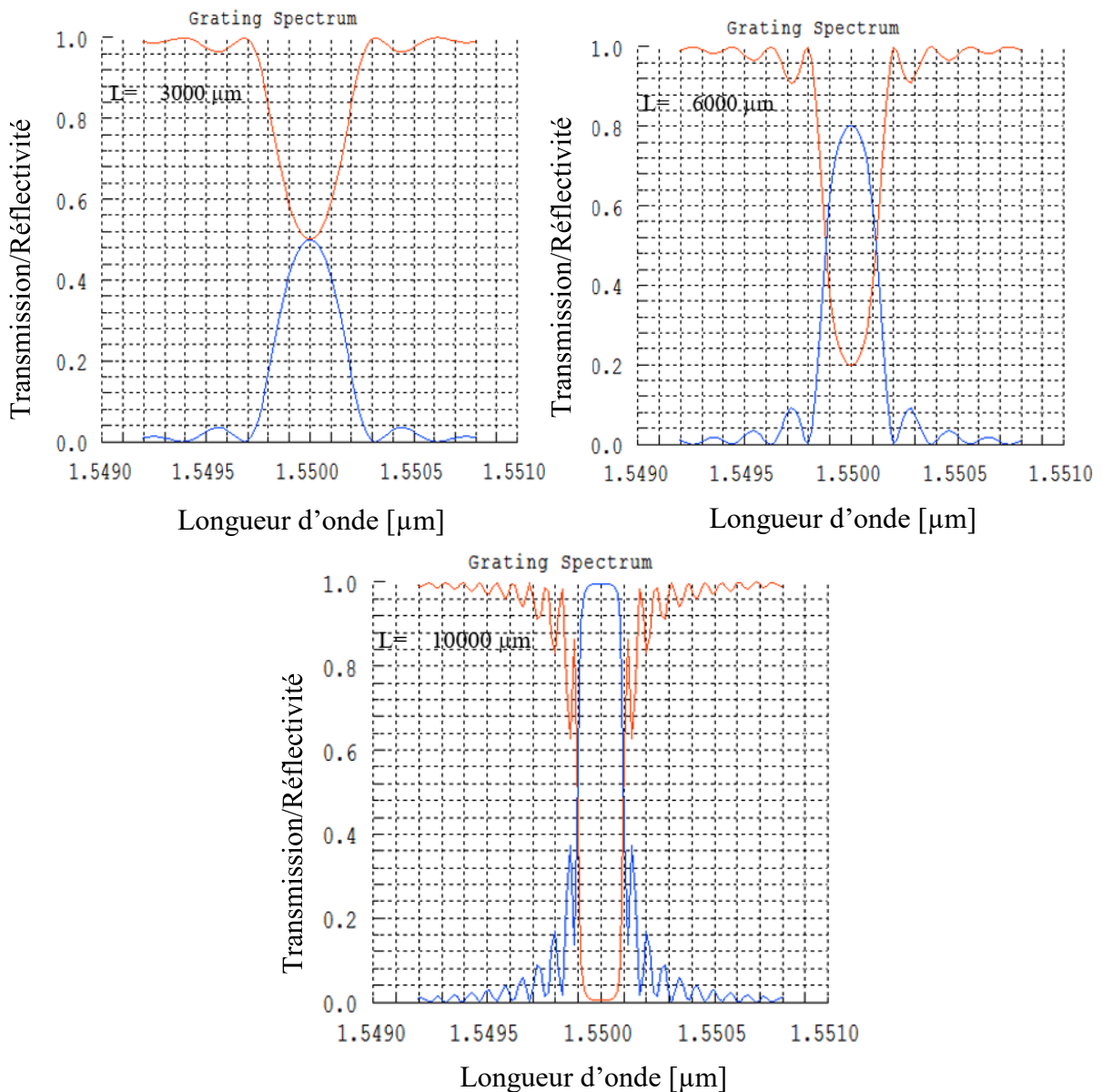
### III.2 Influence des paramètres physiques sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme

Dans cette partie nous allons voir l'influence des paramètres physique de réseau de Bragg sur la réponse spectrale.

#### III.2.1 Influence de la longueur du réseau sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme

On considère un réseau de Bragg uniforme avec les paramètres suivants :  $\Lambda = 0.533815\mu\text{m}$ ,  $n_{eff} = 1.447$  et  $\delta n = 0.0003$  et on fait varier la valeur de la longueur du réseau. La figure (III.4) montre la réponse spectrale de réseau de Bragg pour l'onde réfléchi et le temps de retard compte tenu trois différents réseaux de Bragg avec des longueurs de plus en plus (1)  $L= 3000 \mu\text{m}$ , (2)  $L = 6000\mu\text{m}$  et (3)  $L = 10000\mu\text{m}$ .

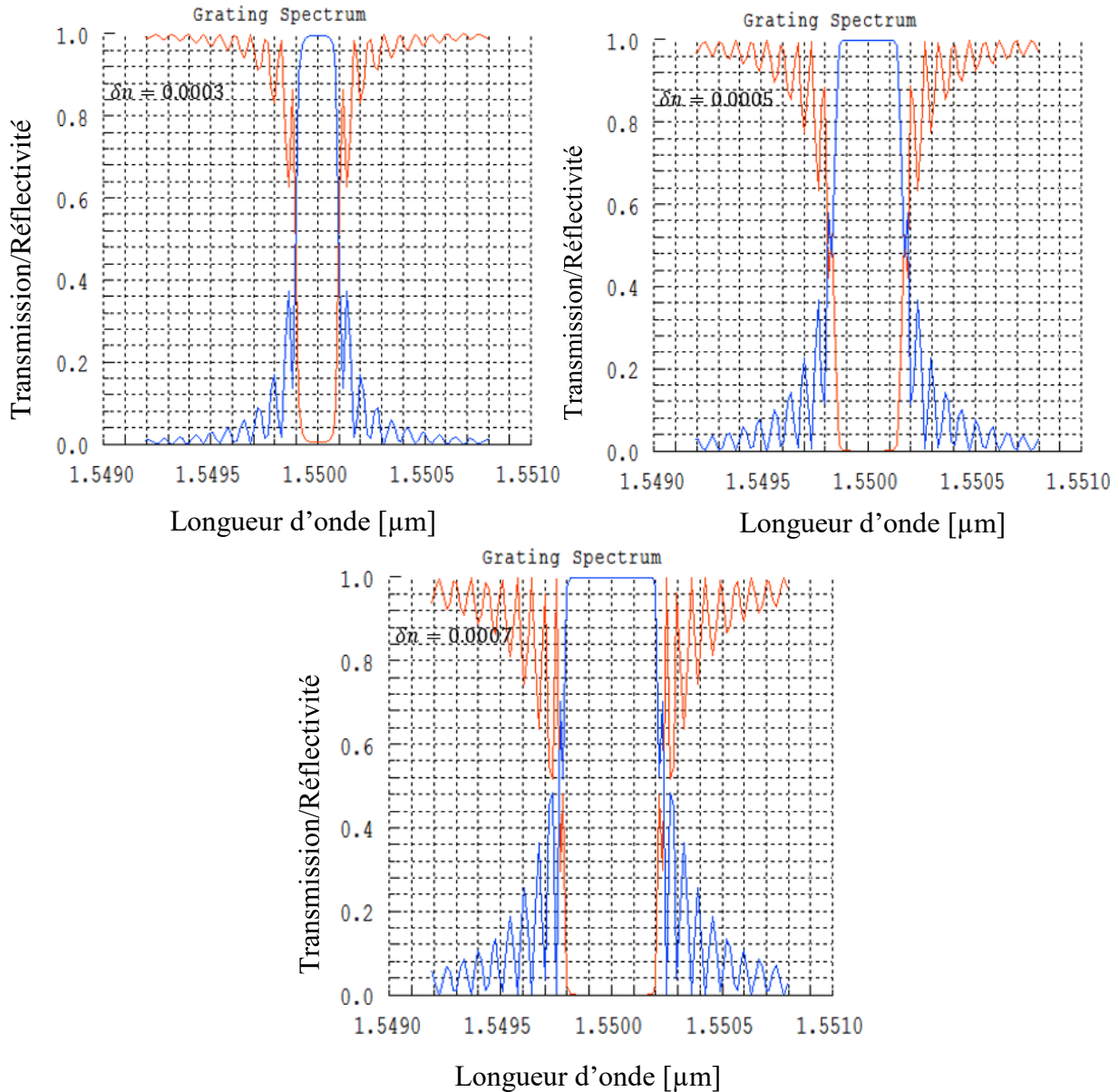
D'après la figure (III.4) on remarque que plus la longueur du réseau de Bragg augmente plus le coefficient de réflexion s'approche de 1, et plus la largeur à mi-hauteur (FWHM) diminue ce qui veut dire que le filtre deviendra de plus en plus sélectif. Pour un réseau de longueur  $L=3000\mu\text{m}$ , le facteur de réflexion atteint la valeur de 0.5 et il ne réfléchit la moitié de la lumière incidente tandis que le réseau de longueur  $L=10000\mu\text{m}$  son facteur de réflexion atteint la valeur de 1. Ici le spectre devient carré et les lobes latéraux se rapprochent.



**Figure III.4 : Effet de la variation de la longueur du réseau sur la réponse spectrale d'un FBG uniforme**

### III.2.2 Influence de l'indice de modulation sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme

Pour étudier l'effet de l'indice de modulation sur la réflectivité d'un réseau de Bragg uniforme, on utilise les mêmes paramètres utilisés précédemment mais dans ce cas on fixe la longueur du réseau à la valeur  $L=10000\mu\text{m}$  pour laquelle la réflectivité atteint la valeur 100%, et on varie la valeur de l'indice de modulation de  $\delta n=0.0003$  jusqu'à 0.0007.

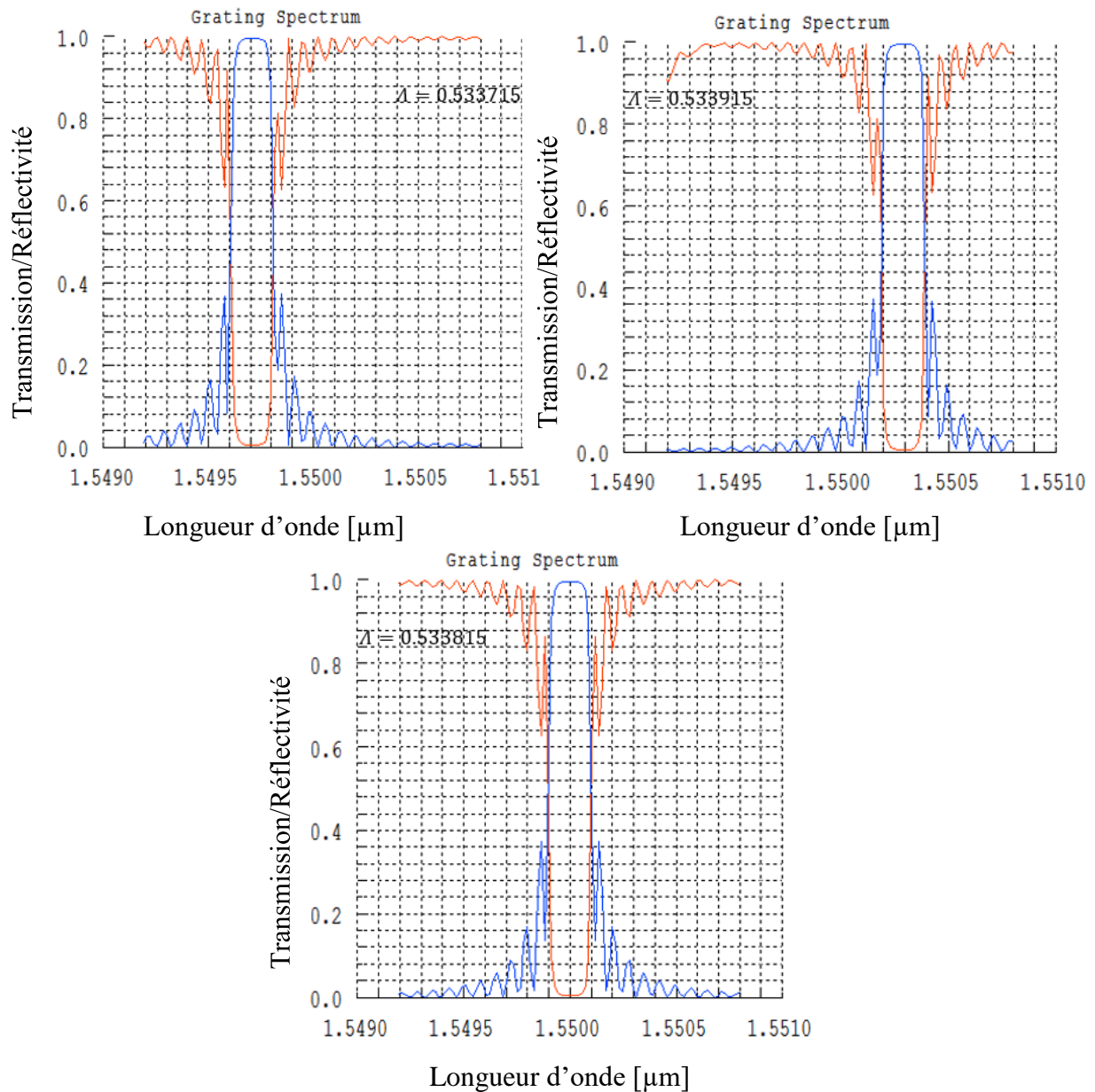


**Figure III.5 : Effet de la variation de l'indice de modulation du réseau sur la réponse spectrale d'un FBG uniforme**

Les réponses spectrales d'un nombre de trois réseaux qui ont été calculées pour  $\delta n$  égal à 0.0003, 0.0005 et 0.0007 respectivement sont présentées dans la figure (III.5). Comme nous pouvons le voir clairement, les résultats montrent que la variation de l'indice de la modulation affecte la largeur de bande spectrale. On peut conclure que l'augmentation de  $\delta n$  provoque l'augmentation de la largeur de la FWHM.

### III.2.3 Influence de la période du réseau sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme

Nous étudions dans ce qui suit l'effet de la variation de la période du réseau sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme. On prend pour cette simulation les paramètres de réseau suivants :  $L = 10000\mu\text{m}$ ,  $n_{eff} = 1.447$  et  $\delta n = 0.0003$  et on fait varier la période du réseau de  $\Lambda = 0.533715$  jusqu'à  $\Lambda = 0.533915$ .



**Figure III.6 : Effet de la variation de la période du réseau sur la réponse spectrale d'un FBG uniforme**

D'après la figure (III. 6), nous pouvons voir clairement que les positions de la longueur de Bragg (réflectivité maximale) sont déplacées. Donc on peut conclure que le période du réseau affecte le centre de la réponse spectral (longueur de Bragg).

### III.2.4 Influence de l'apodisation sur la réponse spectrale du réseau de Bragg uniforme

Nous avons simulé le réseau de Bragg uniforme avec un profil d'apodisation Gaussien. Nous avons utilisé un réseau de Bragg uniforme de longueur  $L = 10000\mu\text{m}$ , de période  $\Lambda = 0.533815\mu\text{m}$ ,  $n_{eff} = 1.447$  et d'indice de modulation  $\delta n = 0.0003$ .

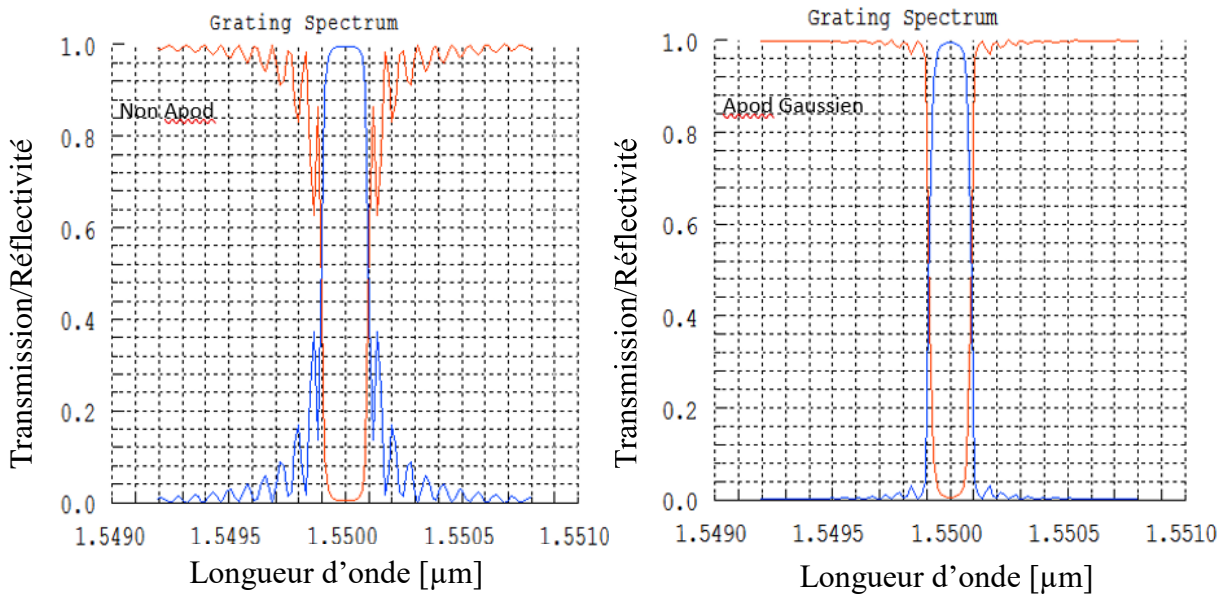


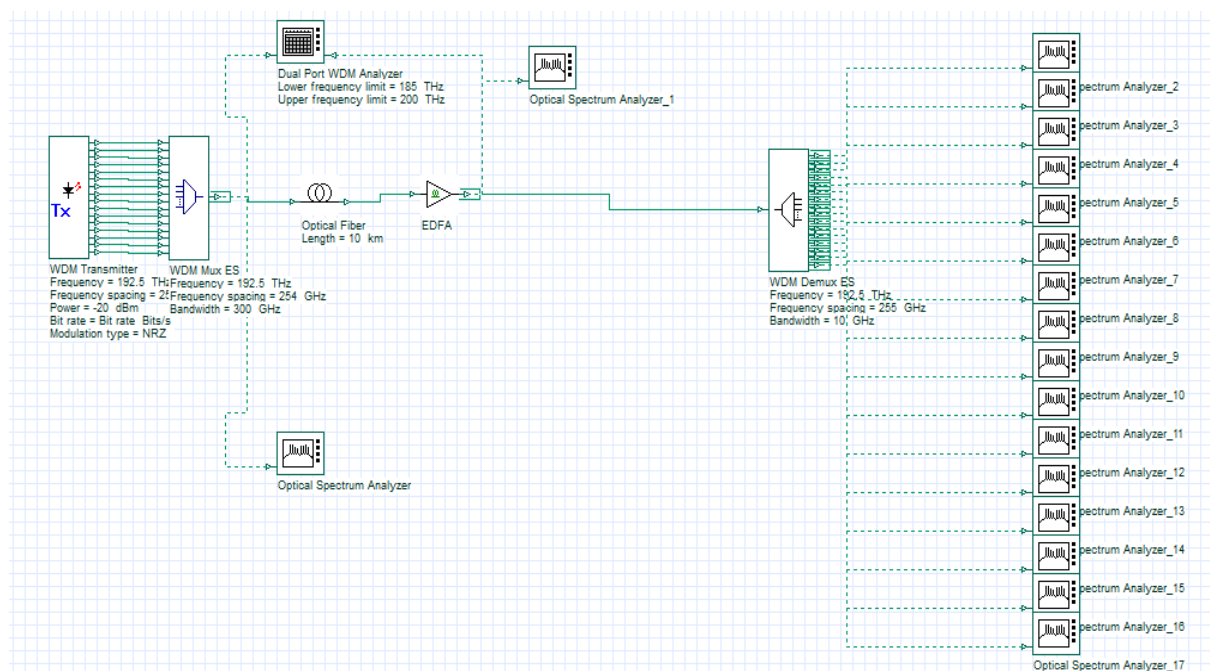
Figure III.7 : Effet de l'apodisation du réseau sur la réponse spectrale d'un FBG uniforme

D'après la figure (III.7), on voit clairement que les lobes de la réponse spectrale du réseau apodisé par le profil Gaussien sont presque éliminés par rapport au spectre non apodisé. Il est à noter que les lobes secondaires peuvent entraîner un phénomène de superposition avec les lobes secondaires des canaux adjacents, la sélectivité d'un tel filtre peut alors être qualifiée de mauvaise. Donc on peut conclure, que l'apodisation permet d'éliminer les lobes secondaires.

### III. 3. L'aplatissement du gain d'un amplificateur EDFA en utilisant des réseaux de Bragg

L'évolution des systèmes de transmission optique a connu une révolution avec la mise au point et le développement industriel des amplificateurs optiques à la fin des années 80. Les premiers systèmes de communication optique utilisaient des fibres multimodes. Pour des débits numériques supérieurs à quelques centaines de Mbits/s, leur portée était limitée à quelques kilomètres du fait de la forte dispersion modale. Il était alors nécessaire de régénérer complètement le signal bien avant que l'atténuation ne soit gênante. Mais quand apparurent les fibres monomodes, présentant une dispersion chromatique beaucoup plus faible, ce fut

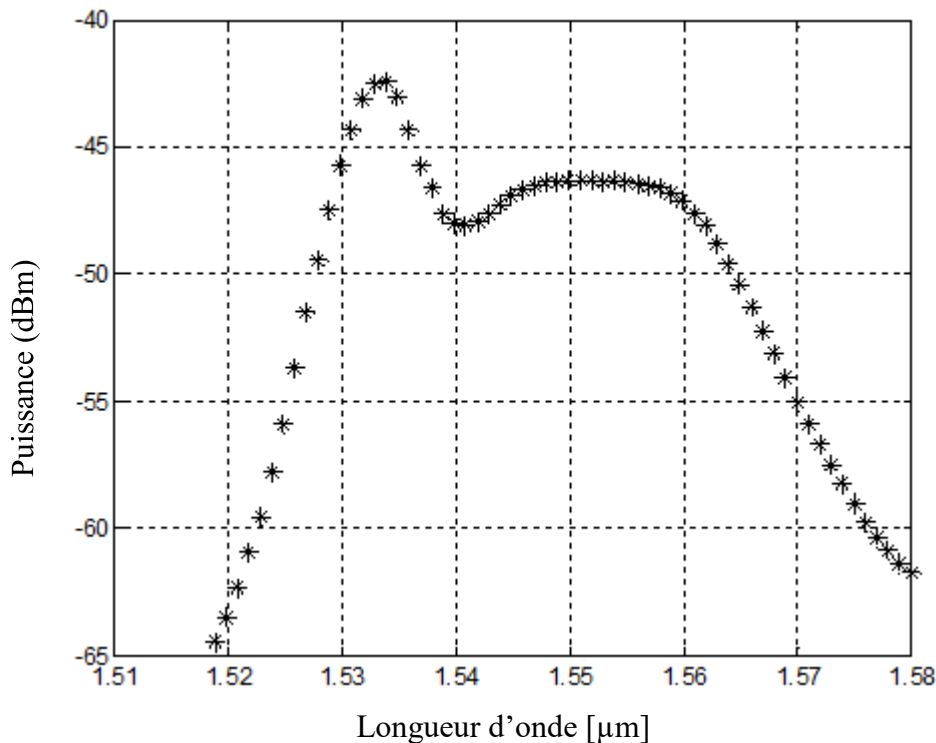
exactement l'inverse : l'atténuation devint le facteur essentiel à combattre pour allonger la portée des liaisons interurbaines ou sous-marines. Or le photo-détecteur émettra un courant de qualité, codant correctement l'information à transmettre, seulement si le photocourant n'est pas noyé dans le bruit, et donc si la puissance optique reçue est suffisamment importante. L'amplificateur optique devient alors une alternative aux complexes répéteurs-régénérateur optoélectroniques. Elle permet de compenser ces pertes et de contrôler régulièrement la puissance optique des signaux. Il est désormais possible de transmettre le signal optique sans conversion sur une distance beaucoup plus importante.



**Figure III.8 : Capture d'écran sur le schéma d'optimisation du gain EDFA pour une transmission WDM sous logiciel OptiSystem**

L'amplificateur optique est à l'origine d'une véritable révolution dans le domaine des télécommunications, vu les avantages que cette technologie procure en association avec le multiplexage en longueur d'onde (WDM). En effet, cette amplification peut intervenir sur l'ensemble des N longueurs d'onde d'un multiplex, sans distorsion du signal utile. Il évite donc une conversion optoélectronique et une amplification électrique sur chaque canal figure (III.8), donc N amplificateur électriques. Cependant un problème se pose lorsque l'on désire multiplexer des signaux en longueur d'ondes. L'amplificateur doit être capable de fournir un gain constant sur une large bande spectrale. Dans le cas des amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA), le signal peut être amplifié sur une plage spectrale de plusieurs dizaines de

nanomètres. Toutefois, la courbe de gain d'un tel amplificateur n'est pas uniforme Figure (III.9). Les différentes longueurs d'onde du peigne WDM sont alors amplifiées de manière inégale. Cette différence est d'autant plus critique que le nombre d'amplificateurs est élevé. Pour aplatir le gain d'EDFA plusieurs méthodes peuvent être employées, mais l'utilisation des filtres à base de réseaux de Bragg s'avère être la plus simple. Dans ce travail nous présenterons deux méthodes pour égaliser le gain des amplificateurs EDFA, l'une en réflexion et l'autre méthode en transmission. Pour ce faire, nous avons utilisé deux types de simulateurs en l'occurrence "optisystem" et "optigrating"[49].



**Figure III.9 : Spectre en transmission d'un amplificateur à fibre dopé Erbium (EDFA)**

Pour observer l'influence des réseaux de Bragg sur le gain de l'EDFA, nous avons inséré 16 canaux à l'entrée de l'EDFA Figure (III.10), qui sont inégalement amplifiés à la sortie Figure (III.11) à cause de la non uniformité du gain Figure (III.9).

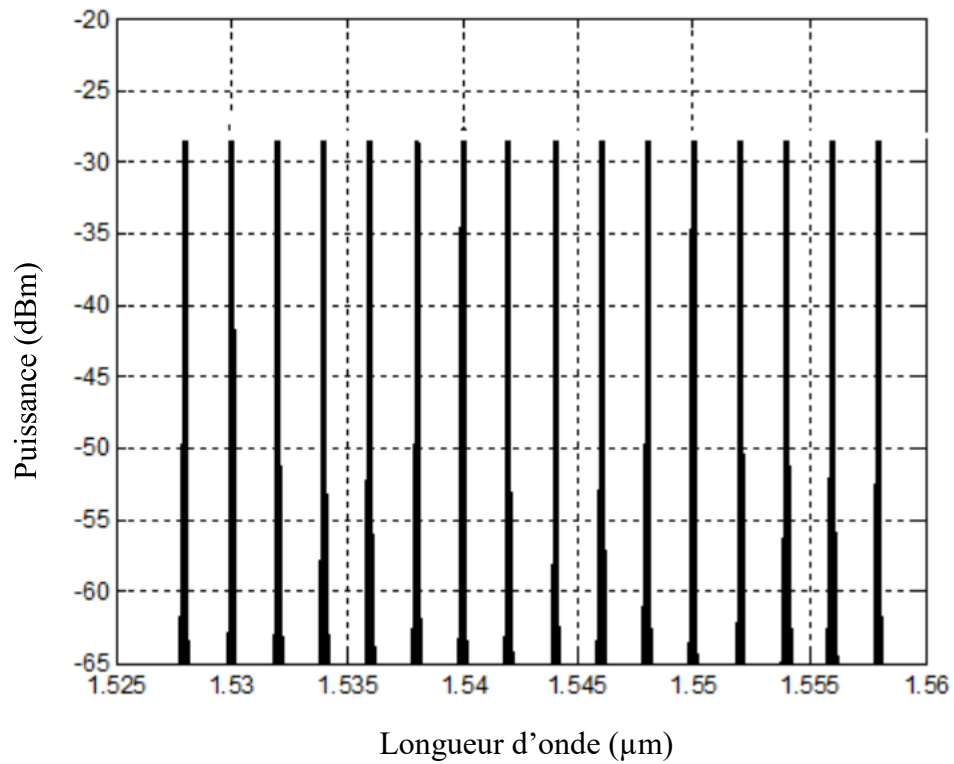


Figure III.10 : Les 16 WDM canaux à l'entrée de l'EDFA

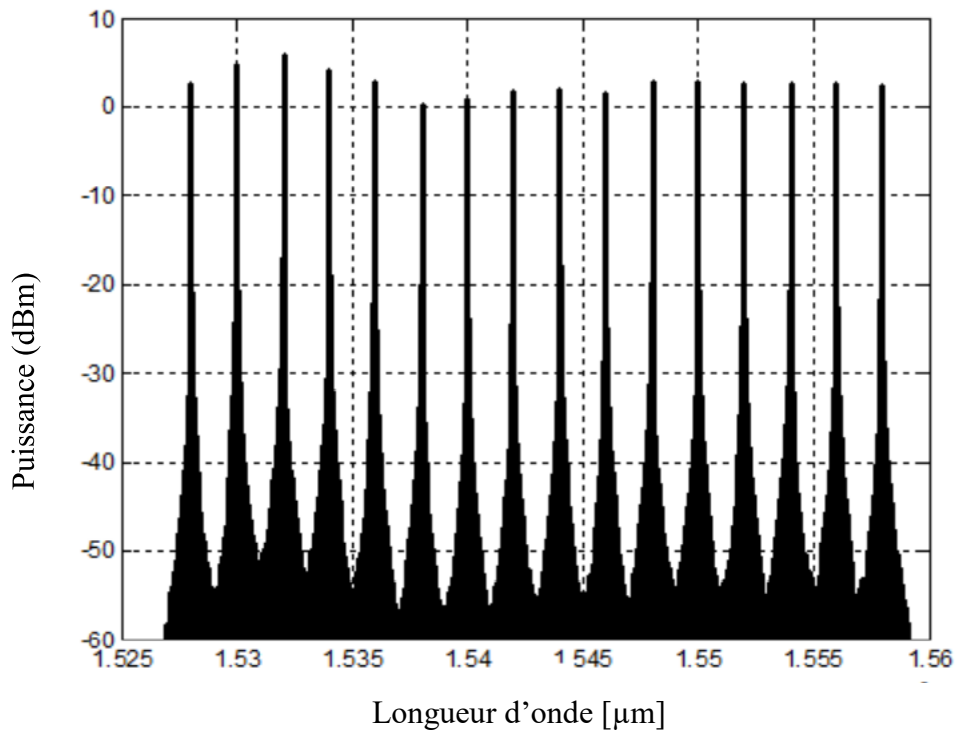


Figure III.11 : Les 16 WDM canaux à la sortie de l'EDFA

Le principe est celui présenté sur la figure (III.12). Une fibre dans laquelle a été photoinscrit une cascade de réseaux de Bragg uniforme à pas courts réflecteurs à différentes longueurs d'onde est insérée dans la ligne juste après l'amplificateur via un circulateur.

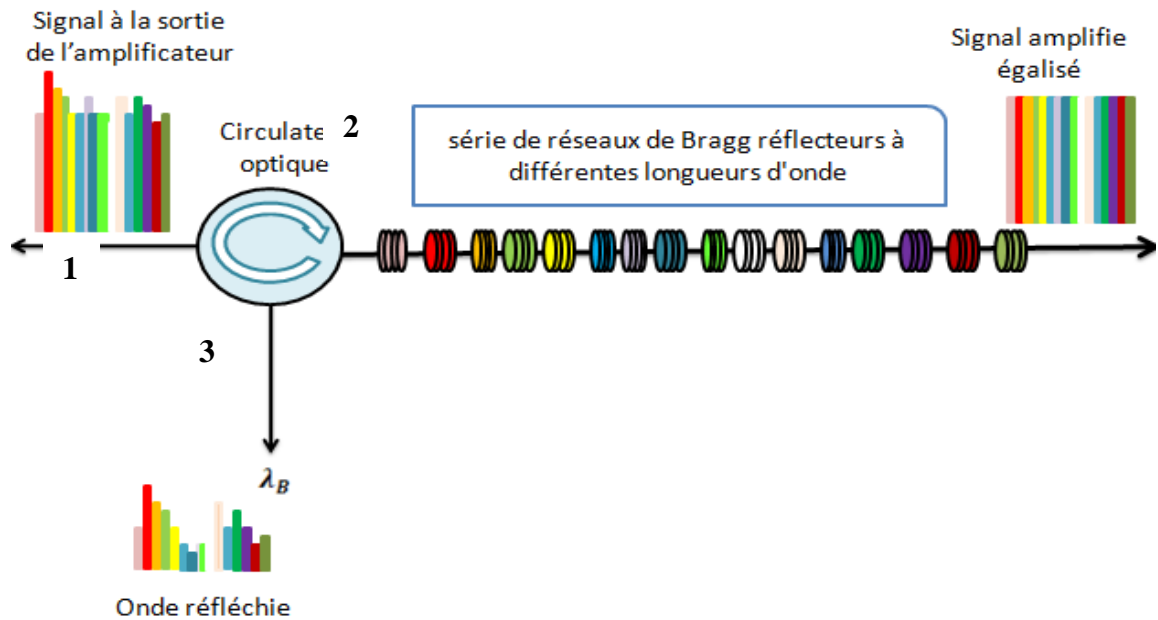


Figure III.12 : principe de l'égalisation du gain des EDFA en utilisant une série de 16 réseaux de Bragg uniformes à pas court

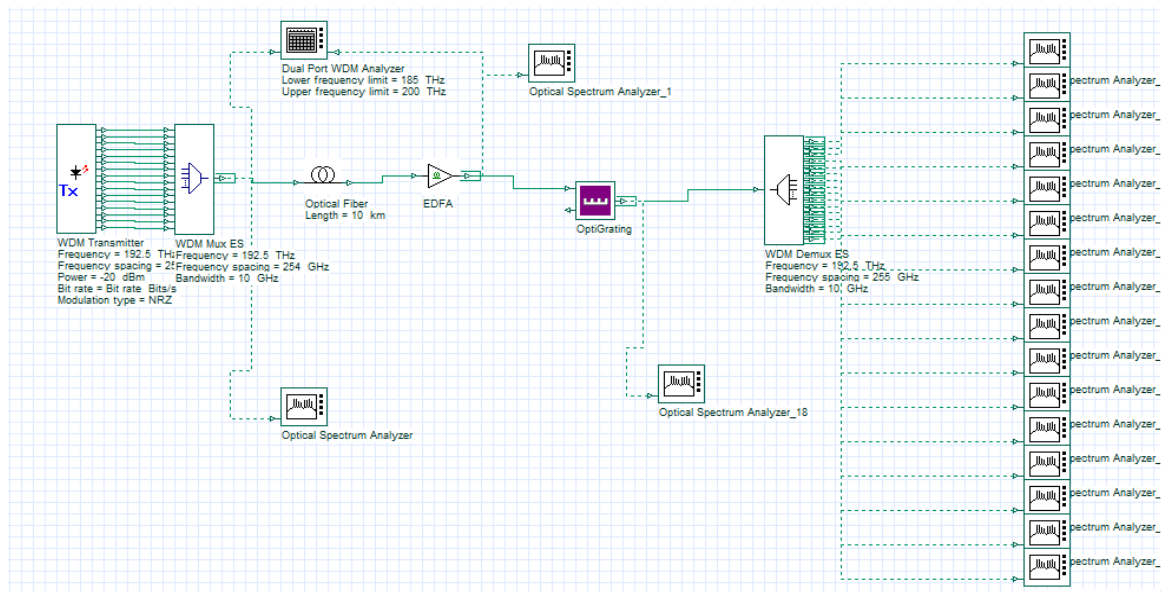
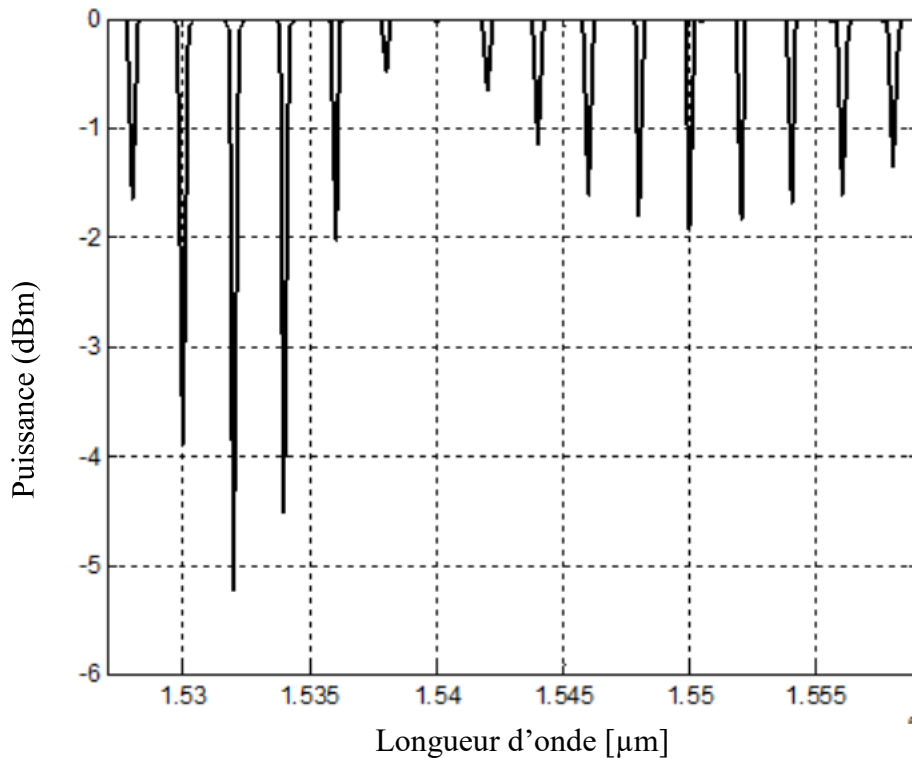


Figure III.13 : Capture d'écran sur le schéma d'optimisation du gain EDFA pour avoir le résultat du gain aplati à l'aide du bloc OptiGrating

Le signal se propage de la branche 1 vers la branche 2. L'onde se réfléchit sur les différents réseaux de Bragg inscrits dans la branche 2. Les pouvoirs de réflexion des différents réseaux sont ajustés de façon à compenser les différences de gain des amplificateurs figure (III.14). Les ondes réfléchies sont ensuite récupérées sur la branche3.



**Figure III.14 : Spectre en transmission d'un réseau de Bragg en cascade**

D'après les résultats obtenus dans la première partie, on peut donc optimiser les paramètres des réseaux de Bragg en cascade qui permet d'obtenir un spectre qui présente des pic très étroit et donc très sélectif qui sont centrée sur les différentes longueurs d'onde (différents canaux de système (WDM)). La figure (III.14) montre la réponse spectrale du cascade des réseaux de Bragg

Dans ce travail nous avons présenté une méthode intéressante pour remédier aux problèmes du non uniformité du gain de l'amplificateur EDFA. L'originalité de la méthode proposée consiste en l'utilisation des réseaux de Bragg. Les résultats figure (III.15) obtenus nous montrent que l'objectif a été atteint.

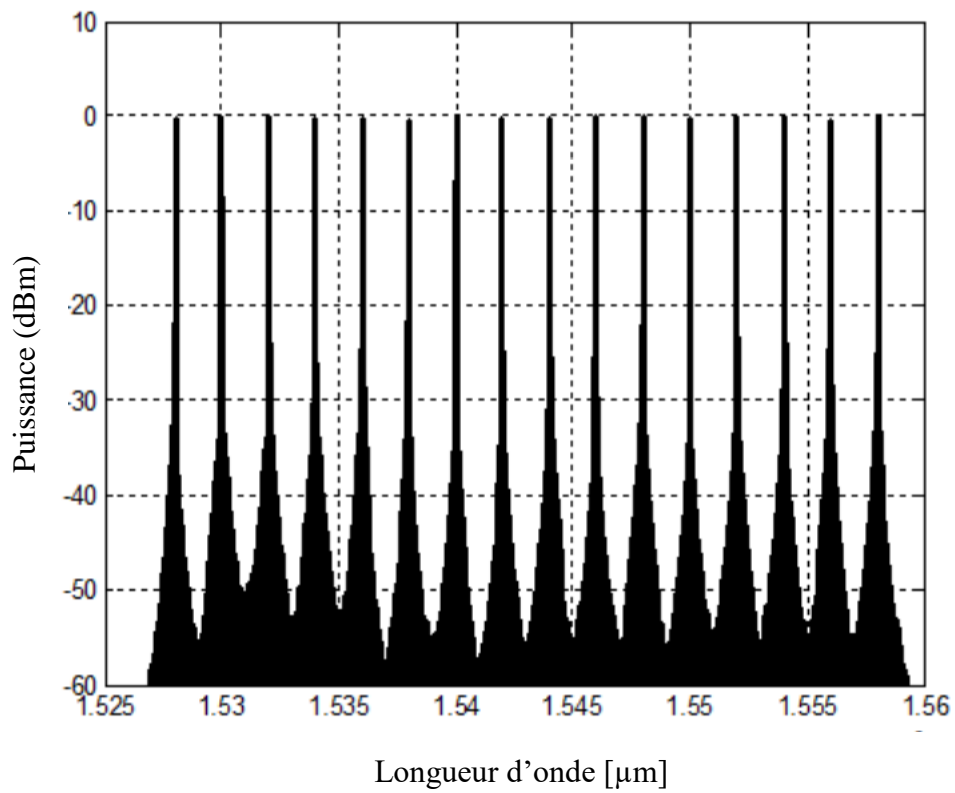


Figure III.15 : Les 16 WDM canaux après uniformisation du gain

#### **IV. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus pour différents types de réseaux de Bragg à profils uniforme. On a étudié l'influence de la longueur du réseau de Bragg, le pas du réseau et l'indice de modulation sur les réponses spectrales de FBG. Les résultats obtenus montrent que ces trois facteurs représentent les paramètres les plus importants pour l'optimisation des performances des différents réseaux de Bragg. Nous avons présenté un profil d'apodisation qui joue un rôle fondamental pour minimiser les fluctuations présentes sur la réponse spectrale. Cependant, les amplificateurs couramment utilisés tels que les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) et les amplificateurs Raman fournissent une amplification optique qui varie avec la longueur d'onde. Une solution consiste à aplanir les puissances sur la fenêtre de transmission en atténuant les canaux de puissance supérieure par rapport aux canaux de puissance inférieure. C'est ce qu'on appelle plus généralement l'aplatissement du gain. Dans la dernière partie de simulation, nous avons présenté l'aplatissement du gain d'un EDFA en utilisant une cascade des réseaux de Bragg uniforme.

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

Notre objectif dans ce travail est d'optimiser les réseaux de Bragg uniforme à pas courts pour résoudre le problème d'un gain non-uniforme des amplificateurs EDFA. C'est pourquoi il nous a paru important de commencer ce mémoire par une recherche théorique sur la fibre optique et ses propriétés comme l'atténuation, la dispersion et la Propagation guidée de la lumière...etc.

Le travail réalisé dans ce mémoire est la réalisation des réseaux de Bragg à pas courts sur une fibre optique pour l'aplatissement du gain de l'amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA) dans la transmission WDM en utilisant les logiciels OptiGrating et OptiSystem.

Dans cette simulation, nous avons présenté une technique intéressante pour résoudre le problème du gain non aplati dans les amplificateurs EDFA. Le principe original de la méthode proposée réside dans l'utilisation de réseaux de Bragg.

On a pu avec les logiciels développé et faciliter beaucoup les calculs sur la fibre optique comme les calculs sur les réseaux de Bragg à petit pas.

# *Bibliographie*

## Références

- [1] Jean-Michel MUR. (2011). *Les fibres optiques Notions Fondamentales. de la bibliothèque de l'université ammar thelidji.*
- [2] Agrawal, G. P. (Govind P.). (2002). *Fiber-optic communication systems.* Wiley-Interscience.
- [3] Stefan Nilsson-Gistvik. (2002). In *Optical Fiber Theory for Communication Networks. de la bibliothèque : - Théorie de la fibre optique pour les réseaux de communication.* (n.d.).
- [4] Margaret Rouse. (2011). *What is Optical Communication? - Definition from Techopedia.* Communications Optiques.
- [5] Jeef Hecht. (2002). *Présentation des réseaux optiques / Examen de la technologie MIT.*
- [6] Chan, V. W. S. (2012). Optical flow switching networks. *Proceedings of the IEEE*, 100(5), 1079–1091.
- [7] Gavin Wright. (n.d.). *Qu'est-ce qu'un réseau métropolitain ? 2021.*
- [8] Chiradeep BasuMallick. (2022). *Qu'est-ce qu'un réseau étendu (WAN) ? Définition, types, architecture et bonnes pratiques - Spiceworks.*
- [9] Anna-University-EEE. (n.d.). *Le système de communication par fibre optique : principe, fonctionnement et avantages.*
- [10] François BALEMBOIS. (2007). *Le laser : Fondamentaux - Description des mécanismes d'émission-absorption.*
- [11] Toshiba. (2022). *Principe d'émission de lumière des LED / Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation / Asie-anglais.*
- [12] Hranilovic, & Steve. (n.d.). *Wireless Optical Communication Systems.*
- [13] Laserpuissant. (2020). *LED VS diode laser / Différence entre LED et diode laser.*
- [14] Circuit Globe. (n.d.). *Qu'est-ce que la modulation optique ? Définition, modulation directe et externe - Circuit Globe. 2023.*
- [15] Michael W. Davidson. (2018). *Introduction à la microscopie des expressions moléculaires : Lumière et couleur - Filtres d'absorption : Tutoriel interactif.*
- [16] Abrisa Industrial Glass. (n.d.). *Coatings Corner Your Total Solution Partner.*
- [17] Byjus. (n.d.). *Applications de la photodiode - Définition, principe de fonctionnement.*
- [18] Coach Electronique. (n.d.). *What are the types of Photodiode ? - PIN Photodiode & Avalanche Photodiode - Electronics Coach.*

- [19] Elprocus. (n.d.). *Fibre Optique : Principe de Fonctionnement, Types, Avantages et Inconvénients*.
- [20] Futura-SCIENCES. (n.d.). *Définition / Bande passante - Largeur de bande / Futura Tech*.
- [21] OSA. (n.d.). *Fibre Optic Network Advantages / Optical Solutions Australia | Optical Solutions Australia OSA*.
- [22] All-techcommunications.ca. (2021). *What's the Difference Between Copper Cable and Fiber Optic Cable?*
- [23] Jennifer English. (2021). *What Is Fiber Optics? Definition from SearchNetworking*.
- [24] Rebecca Nouri. (2022). *Un guide des matériaux utilisés dans la fabrication de câbles à fibres optiques*.
- [25] Abbaye de Nitin. (n.d.). *Single & Multimode Fiber Optic Cable: What's the difference -STL Tech*. 2023.
- [26] Karthik. (n.d.). *Why does light travel in a straight line?*
- [27] David H. Staelin. (n.d.). *12.2: Guides d'ondes optiques - Physique LibreTexts*.
- [28] Mohammad Azadeh. (2009). *Fiber Optics Engineering*.
- [29] Adam Augustyn. (2018). *Indice de réfraction | Définition et équation | britannique*.
- [30] Erik Gregersen. (2016). *Vague | Comportement, définition et types | Britannique*.
- [31] Nicholas H L Wong et al. (2019). *Physics Education Modular and extensible lesson on optical fibre communication for youths*.
- [32] Thorlabs. (2020). *Ouverture numérique et angle d'acceptation de la fibre multimode*.
- [33] Wolfram. (n.d.). *Fréquence normalisée | Référentiel de formules Wolfram*.
- [34] Elprocus. (n.d.). *Qu'est-ce que l'atténuation dans la fibre optique et ses causes*.
- [35] Patrick Dobbins. (n.d.). *Intrinsic and Extrinsic Attenuation in Fiber Optic Cables*.
- [36] Pat Chou. (n.d.). *Fibre optique, partie 3 : la dispersion des fibres va changer la façon dont vous voyez vos liens - Blogs Cisco*. 2020.
- [37] Maan M. Shaker, Mahmood Sh. Majid., & Raid Daoud. (2009). (PDF) *Fonctionnement de la programmation intelligente pour trouver les longueurs d'onde de dispersion minimales*.
- [38] VIAVI Solutions Inc. (2020). *Testing Polarization Mode Dispersion in the Field*.

- [39] Margaret Rousseau. (2015). *Qu'est-ce qu'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) ? - Définition de Techopedia.*
- [40] Sheldon. (2021). *Optical Amplifier—EDFA (Erbium-doped Fiber Amplifier) for WDM System / FS Community.*
- [41] Hill, K. O., & Meltz, G. (1997). Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 15(8), 1263.
- [42] Bundalo, Ivan-Lazar. (2017). *Fibre Bragg Grating and Long Period Grating Sensors in Polymer Optical Fibres- Définition de DTU Library.*
- [43] Fajkus, M., Navruz, I., Kepak, S., Davidson, A., Siska, P., Cubik, J., & Vasinek, V. (2015). Capacity of wavelength and time division multiplexing for quasi-distributed measurement using fiber bragg gratings. *Advances in Electrical and Electronic Engineering.*
- [44] Pierre FERDINAND. (1999). *Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg.*
- [45] Sébastien Triollet. (2010). *these\_triollet.*
- [46] *Optiwave.* (n.d.).from <https://optiwave.com/>
- [47] *Optiwave.* (n.d.).from <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- [48] *Optiwave.* (n.d.).from <https://optiwave.com/optigrating-overview/>
- [49] Abdelkader SONNE. (2011). *Dispersion chromatique de fibre microstructurée à l'aide d'un réseau de neurones.*