



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Télécommunication  
Réseaux et Télécommunication

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**Gaouat Ibtissem**

Le : mercredi 30 septembre 2020

## Conception et analyse d'un système de communication optique WDM

---

### Jury :

Mme	Ouarhlent Saloua	MAA	Université de Biskra	Président
Mr	Guesbaya Tahar	MCA	Université de Biskra	Examineur
Mme	Tobbeche Souad	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Télécommunication  
Option : Réseaux et Télécommunication

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

**Thème**

**Conception et analyse d'un système de  
communication optique WDM**

**Présenté par :**

*Gaouat Ibtissem*

**Avis favorable de l'encadreur :**

*Tobbeche Souad*

*Signature*

**Avis favorable du Président du Jury**

*Ouarhlent Saloua*

**Cachet et signature**

## Résumé

La technologie WDM est connue comme une technologie de multiplexage et de transmission de signaux optiques de différentes fréquences (longueurs d'ondes) par une fibre optique.

Le but de ce projet est de concevoir un système de communication optique capable de transporter des données à une vitesse allant jusqu'à 40 Gbits/s pour une distance de 900 km en utilisant la technique de multiplexage en longueur d'onde WDM.

Le système prototype utilise 8 canaux WDM chacun fonctionnant à 5 Gbits/s. La conception a été simulée à l'aide du logiciel de communications optiques OptiSystem pour vérifier le fonctionnement du système conçu, les facteurs de limitation des performances du système tels que l'atténuation et la dispersion sont prouvés lors de l'étude de l'influence de la distance de la liaison et le débit de l'information. La qualité de la transmission de l'information est évaluée par les indicateurs suivants : le taux d'erreur binaire (BER), le facteur de qualité Q et le diagramme de l'oeil.

Le facteur de qualité de 16,0235 et le taux d'erreur des bits (BER) de  $2,80266e^{-58}$  sont obtenus pour d'une distance de 936 km et un débit de 40 G bits/s.

**Mots-clés :** Simulation numérique, Transmission optique, OPTISYSTEM, DWDM

تُعرف الـ WDM بأنها تقنية تعدد إرسال الإشارات الضوئية بترددات مختلفة (أطوال موجية) عبر الألياف الضوئية. الهدف من هذا المشروع هو تصميم نظام اتصال بصري قادر على نقل البيانات بسرعة تصل إلى 40 جيجابت / ثانية لمسافة 900 كم باستخدام تقنية تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي. WDM يستخدم 8 قنوات تعمل كل منها بسرعة 5 جيجابت / ثانية. تمت محاكاة التصميم باستخدام برنامج الاتصالات الضوئية OptiSystem للتحقق من تشغيل النظام المصمم ، وتم إثبات العوامل المقيدة في أداء النظام مثل التوهين والتشتت عند دراسة التأثير من مسافة الارتباط ومعدل المعلومات. يتم تقييم جودة نقل المعلومات من خلال المؤشرات التالية: معدل خطأ البتات (BER) ، عامل الجودة Q ومخطط العين.

تم الحصول على عامل الجودة 16.0235 ومعدل الخطأ في البتات (BER) البالغ  $2,80266e^{-58}$  لمسافة 936 كلم ومعدل بيانات 40 جيجابت في الثانية.

**كلمات مفتاحية :** محاكاة عددية, إرسال ضوئي, DWDM ,OPTISYSTEM.

---



---

## *Sommaire*

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Liste des tableaux.....	IV
Liste des figures.....	VI
Liste des abréviations.....	X
Introduction générale.....	2

### **Chapitre I**

#### **La fibre optique**

<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2 Onde électromagnétique (OEM) .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3 Notions sur l'optique géométrique.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4 Réseaux de télécoms par fibres optiques .....</b>	<b>6</b>
I.4.1 Réseau étendu ou longue distance (WAN, Wide Area Network).....	6
I.4.2 Réseau métropolitain (MAN, Metropolitan Area Network).....	7
I.4.3 Réseau local (LAN, Local Area Network) .....	7
<b>I.5 Fibre optique.....</b>	<b>8</b>
I.5. 1 Présentation de la fibre optique.....	8
I.5.2 Différents types de fibres optiques .....	9
I.5. 2 .1 Les fibres optiques à saut d'indice multi-modes .....	10
I.5. 2. 2 Les fibres optiques à saut d'indice monomodes.....	10
I.5 .2 . 3 Fibres optiques à gradient d'indice .....	11
<b>I.6 Propagation dans la fibre optique.....</b>	<b>11</b>

I.6.1 Ouverture numérique .....	11
I.6.2 Longueur d'onde de coupure .....	12
<b>I.7 Effets linéaires et non linéaires dans la fibre optique .....</b>	<b>12</b>
I.7.1 Effets linéaires .....	12
I.7.1.1 Atténuation dans la fibre optique .....	12
I.7.1.2 Dispersion dans la fibre optique.....	14
I.7.1.3 Pertes dans la fibre optique .....	18
I.7.2 Effets non linéaires .....	19
I.7.2.1 Effet Kerr optique.....	19
I.7.2.2 Effet Brillouin (SBS Stimulated Brillouin Scattering).....	19
I.7.2.3 Effet Raman (SRS Simulated Raman Scattering).....	20
<b>I.8 Avantages et inconvénients.....</b>	<b>20</b>
I.8.1 Avantage .....	20
I.8.2 Inconvénients .....	21
<b>I.9 Conclusion.....</b>	<b>21</b>

## Chapitre II

### Eude d'une liaison par fibre optique

<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>23</b>
<b>II.2 Définition d'une liaison par fibre optique.....</b>	<b>23</b>
<b>II.3 Composant d'émission.....</b>	<b>23</b>
II.3.1 Sources optiques .....	24
II.3.1.1 Diodes électroluminescentes LED .....	24
II.3.1.2 Source laser.....	27

---

---

II.3.1.3	Déférence entre la diode DL et la diode LED.....	31
II.3.2	Modulation.....	32
II.3.2.1	Modulation par la technique du ‘OOK’ (On-Off-Keying) .....	32
II.3.2.2	modulations directes .....	32
II.3.2.3	modulations externe .....	33
II.3.2.4	Comparaison entre modulation directe et modulation externe .....	35
II.3.3.5	Format de Modulation.....	36
II.3.3	Multiplexage.....	38
II.3.3.1	Multiplexages temporels la TDMA .....	39
II.3.3.2	Multiplexages en longueur d’onde WDM .....	39
II.3.3.3	Multiplexages mode spatial SDM.....	40
II.3.3.4	Multiplexage par répartition de codes CDMA.....	40
<b>II.4</b>	<b>Composant de la ligne de transmission.....</b>	<b>41</b>
II.4.1	Amplificateur.....	41
II.4.1.1	EDFA .....	41
II.4.1.2	RAMAN.....	42
II.4.1.3	Amplificateurs à semi-conducteur (SOA) .....	42
<b>II.5</b>	<b>Composant de réception.....</b>	<b>42</b>
II.5.1	Bloc de premier étage .....	43
II.5.1.1	Photo-détecteur .....	43
II.5.1.1.1	Principe de la photo détection.....	43
II.5.2	Bloc linéaire.....	47
II.5.2.1	Amplification électrique .....	47
II.5.2.2	Circuit de filtrage .....	47
II.5.3	Circuit de Décision .....	47
<b>II.6</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>48</b>

## Chapitre III

### Etude des techniques de Multiplexage

<b>III.1 Introduction</b> .....	50
<b>III.2 Multiplexage des signaux optiques</b> .....	50
<b>III.3 Principe de WDM</b> .....	51
<b>III.4 Fonctionnement général de WDM</b> .....	52
<b>III.5 Application de WDM</b> .....	53
<b>III.6 Principales composantes d'un réseau WDM</b> .....	53
<b>III.7 Les différentes technologies WDM</b> .....	54
III.7.1 Multiplexage DWDM (Dense WDM).....	55
III.7.2 Multiplexage U-DWDM (Ultra DWDM) .....	56
III.7.3 Multiplexage CWDM.....	57
III.7.4 Comparaison entre les techniques de multiplexage .....	57
<b>III.8 Les systèmes WDM / DWDM</b> .....	58
<b>III.9 Conclusion</b> .....	61

## Chapitre IV

### Résultats et Discussions

<b>IV.1 Introduction</b> .....	63
<b>IV.2 Présentation du logiciel OPTISYSTEM</b> .....	63
IV.2.1 Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem .....	63

---

---

IV.2.2 Interface de l'OptiSystem .....	64
IV.2.3 Affichage des résultats à partir d'un appareil .....	68
IV.2.4 Représentation des Signaux dans Optisystem.....	68
IV.2.5 Applications du logiciel OptiSystem .....	70
IV.2.6 Avantages du logiciel OptiSystem .....	70
IV.2.7 Modes de simulation .....	71
<b>IV.3 Critères de qualité d'une transmission .....</b>	<b>71</b>
<b>IV.4 Conception d'une chaine de transmission optique sous OptiSystem.....</b>	<b>73</b>
<b>IV.5 Spécification des objectifs du système .....</b>	<b>75</b>
IV.5.1 Détermination de la longueur maximale de la fibre due à la dispersion.....	76
<b>IV.6 Détermination de la limite du système due à l'atténuation .....</b>	<b>78</b>
<b>IV.7 Paramètres de simulation de la liaison optique d'un système à DWDM .....</b>	<b>79</b>
IV.7.1 Partie émission .....	80
IV.7.2 Effets des amplificateurs optiques sur le bruit du système .....	85
IV.7.3 Partie réception .....	86
IV.7.4 Effets de non-linéarité des fibres .....	91
IV.7.5 La dispersion .....	92
IV.7.6 Influence du débit binaire .....	93
IV.7.7Influence de la longueur de la fibre optique .....	93
<b>IV.8 Conclusion .....</b>	<b>94</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>97</b>
<b>Références.....</b>	<b>98</b>



## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents. Pour leur soutien, leurs sacrifices  
et tous ses efforts qu'ils ont fait pour mon éducation*

*Mes sœurs. Tous mes amis.*

*Tous ceux qui m'ont aidé pour accomplir ce mémoire.*

*Tous les professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté  
d'un savoir bien acquis, donc un grand merci pour vous.*

*Abtissem Gaouat*

## *Remerciements*

*Il est particulièrement agréable, avant de présenter mon travail, d'exprimer mes gratitudees envers les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Je remercie tout d'abord les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont accordé pour avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Qu'il me soit permis d'adresser mes remerciements et mes sentiments de reconnaissance à mon encadrant, Mme Tobbeche Souad, pour la qualité de son encadrement et pour tous les conseils précieux qu'il nous a prodigués.*

*Abtissem Gaouat*

# Liste des tableaux

---

---

## Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Caractéristiques générales des fibres monomode et multimode.....	10
Tableau I. 2 : Les différentes causes d'atténuation.....	14
Tableau II. 1 : Caractéristiques des LED.....	26
Tableau II. 2 : Comparaison entre les diodes (DEL et DL).....	31
Tableau II. 3 : Différence de valeur entre les diodes DL et DEL.....	35
Tableau II. 4 : Formats de modulation de transmission.....	38
Tableau II. 5 : Comparaison des caractéristiques des photodiodes PIN et APD.....	46
Tableau III. 1 : Comparaison entre les techniques de multiplexage.....	58
Tableau IV. 1: Spécification des objectifs du système.....	76
Tableau IV. 2: Canaux du DWDM utilisés dans le système.....	76
Tableau IV. 3: Caractéristiques du SMF.....	77
Tableau IV. 4: Caractéristiques de la photodiode à Avalanche.....	78
Tableau IV. 5: Paramètre de la simulation pour 8 utilisateurs.....	80
Tableau IV. 6: Niveau de puissance optique de chaque canal injecté dans la fibre optique. ..	82
Tableau IV. 7: Niveaux de puissance de chaque canal à la fin de la première tranche de la fibre optique.....	84
Tableau IV. 8: Puissance à la fin de la distance de transmission.....	86
Tableau IV. 9 : Influence du débit binaire.....	93
Tableau IV. 10 : Influence de la longueur de la fibre optique.....	94

# List des figures

## Liste des figures

### Chapitre I

#### La fibre optique

Figure I. 1 : L'onde électromagnétique.....	5
Figure I. 2 : Schéma montrant le réseau étendu (WAN).....	6
Figure I. 3 : Schéma montrant le réseau métropolitain (MAN).....	7
Figure I. 4 : Schéma montrant le réseau local (LAN).....	8
Figure I. 5 : Structure d'une fibre optique .....	9
Figure I. 6 : Fibre optique multimode à saut d'indice et son profile d'indice .....	10
Figure I. 7 : Fibre optique monomode à saut d'indice et son profile d'indice.....	10
Figure I. 8 : Fibre optique à gradient d'indice et son profile d'indice .....	11
Figure I. 9 : Lois de propagation du signal dans une fibre optique .....	11
Figure I. 10 : Pertes optique dans une fibre standard.....	13
Figure I. 11 : Les différents types de la dispersion .....	15
Figure I. 12 : Différents représentations des dispersions dans la fibre .....	16
Figure I. 13 : Effets de dispersion modale et chromatique .....	17
Figure I. 14 : Schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre optique.....	18

### Chapitre II

#### Eude d'une liaison par fibre optique

Figure II. 1 : Schéma synoptique d'une liaison optique .....	23
Figure II. 2 : Diode électroluminescente LED .....	24
Figure II. 3 : Fonctionnement d'une LED .....	25
Figure II. 4 : Symboles schématiques de LED et les différentes couleurs disponibles .....	27
Figure II. 5 : Exemple de diodes laser en boitier .....	28
Figure II. 6 : Caractéristique puissance-courant d'u laser .....	29
Figure II. 7 : Schéma des processus d'absorbation, d'émission spontanée et stimulée.....	30
Figure II. 8 : Oscillateur laser .....	31
Figure II. 9 : Synoptique de la modulation directe .....	32
Figure II. 10 : Synoptique de la modulation externe .....	33
Figure II. 11 : Structure d'u guide d'onde contenant un matériau électro-absorbant .....	34

Figure II. 12 : Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder .....	35
Figure II. 13 : Format de modulation de type RZ-OOK .....	37
Figure II. 14: Format de modulation de type NRZ-OOK .....	38
Figure II. 15 : Schéma d'un multiplexeur .....	39
Figure II. 16 : Schéma du découpage en temps TDMA .....	39
Figure II. 17 : Schéma de découpage en longueur d'onde WDM .....	40
Figure II. 18 : Accès multiples par répartition en code.....	41
Figure II. 19 : Schéma d'un récepteur de données à détection directe .....	43
Figure II. 20 : Structure d'une photodiode PIN .....	45
Figure II. 21 : Structure d'une photodiode APD.....	46
Figure II. 22 : Principe de la décision basé sur le diagramme de l'œil.....	48

### Chapitre III

#### Etude des techniques de multiplexage

Figure III. 1 : Principe d'une liaison WDM.....	51
Figure III. 2 : Principes d'un system WDM .....	52
Figure III. 3 : Principales composantes d'un réseau WDM.....	54
Figure III. 4 : Exemple d'un lien DWDM .....	55
Figure III. 5 : Peigne des fréquences en DWDM.....	56
Figure III. 6 : Technique de multiplexage Ultra DWDM .....	56
Figure III. 7 : Multiplexage CWDM.....	57
Figure III. 8 : Déférence entre la bande des techniques multiplexages DWDM et CWDM ...	58
Figure III. 9 : Opportunité d'utilisation du multiplexage couplée à l'amplification optique ..	59

### Chapitre IV

#### Simulation numérique et résultats

Figure IV. 1 :L'interface de travail sur optisystem .....	64
Figure IV. 2 : La bibliothèque du logiciel optisystem .....	65
Figure IV. 3: Navigateur du projet.....	65
Figure IV. 4: Editeur du layout .....	66
Figure IV. 5: Fenêtre de description .....	66

---

---

Figure IV. 6: Fenêtre montre le lancement de la simulation.....	67
Figure IV. 7: Outils de visualisations .....	67
Figure IV. 8: Types de signaux.....	69
Figure IV. 9: Exemple d'un diagramme de l'œil .....	72
Figure IV. 10: Synoptique d'une chaine de transmission optique.....	73
Figure IV. 11: Partie d'émission de la liaison optique. ....	80
Figure IV. 12: Spectre d'un canal individuel. ....	81
Figure IV. 13: Spectre d'un canal multiplexé. ....	81
Figure IV. 14 : Schéma du système de communication à DWDM.....	83
Figure IV. 15: Partie de transmission de la liaison optique .....	84
Figure IV. 16: Spectre optique apres SMF. ....	85
Figure IV. 17: Spectre optique avant et après l'amplification par un EDFA. ....	85
Figure IV. 18: Partie de réception de la liaison optique. ....	87
Figure IV. 19: Puissances de deux canaux au niveau du détecteur APD. ....	88
Figure IV. 20: Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 1 .....	88
Figure IV. 21 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 2.....	88
Figure IV. 22 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 3.....	89
Figure IV. 23 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 4.....	89
Figure IV. 24 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 5.....	89
Figure IV. 25 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 6.....	90
Figure IV. 26 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 7.....	90
Figure IV. 27 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 8.....	90
Figure IV. 28: Spectres sans et avec effets non linéaires.....	91
Figure IV. 29: Diagramme de l'œil sans et avec effets non linéaires.....	91
Figure IV. 30:Schéma de simulation de la liaison DWDM avec EDFA et sans DCF.....	92
Figure IV. 31 : Diagramme de l'œil du canal 1 sans DCF .....	92



# Liste des Abréviations

## *Liste des Abréviations*

**BER:** Bit-Error-Rate.

**DBR:** Distributed Bragg Reflector.

**Dc :** Dispersion chromatique.

**DCF:** Dispersion-Compensating Fiber.

**DEMUX :** Demultiplexer.

**DFB :** Distributed Feedback.

**D<sub>g</sub> :** Dispersion de guide.

**DL :** Diode LASER.

**D<sub>m</sub> :** Dispersion de matériel.

**D<sub>mod</sub> :** Dispersion modale.

**EDFA:** Erbium Doped Fiber Amplifier.

**FBG:** Fiber Bragg Grating.

**FO :** Fibre optique.

**FPB :** Filtre Passe Bas.

**LASER :** Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

**LED :** Light Emetting Diode (Diode Électroluminescente).

**LPF:** Low Pass Filter.

**MMF:** Multimode Fiber.

**MMZ:** Modulator Mach-Zehnder.

**MUX :** Multiplexer.

**NRZ:** Non-return to Zero.

**ON** : Ouverture Numérique.

**PE** : Puissance d'entrée.

**PIN**: Positive Intrinsic Negative.

**PMD**: Polarization Mode Dispersion.

**PRBS**: Pseudo Random Binary Sequence.

**Ps** : Puissance de sortie.

**SI** : Saut d'indice.

**SMF**: Single-Mode Fiber.

**WDM** : Wave Length Division Multiplying (Multiplexage en Longueur D'onde).

# Introduction générale

## Introduction générale

La grande quantité d'information véhiculées a travers le monde a donné naissance depuis quelques années, a un besoin croissant en débit de transmission dans les systèmes de télécommunication. de nombreux services et application multimédia se sont développées ,et nécessitent aujourd'hui d'importantes capacité de transmission .un besoin d'autant plus important que les informations échangées grâce a ces applications (donnée, téléphonie sur voix IP, vidéo). [1]

L'idée d'utiliser de la lumière comme support véhiculant de l'information n'est pas récente. Dès la plus haute antiquité, les hommes ont utilisé des sources optiques (soleil, feux, nuages de fumées) pour transmettre des messages. Les débits d'informations transmis étaient faibles, et les portées sont courtes [2]

La fibre optique est donc une innovation relativement récente qui a rapidement pris un rôle prépondérant dans le monde des télécommunications pour sa capacité à véhiculer un grand nombre d'informations sur de longues distances comparativement aux autres supports (câble coaxial, radio etc.) [2]

Le déploiement du réseau futur de télécommunications à haut débit (40 Gb/s et au-delà) nécessite le développement de nouveaux composants et architectures optoélectroniques adaptés à ces vitesses de transmission. Les enjeux stratégiques et économiques de ces développements découlent notamment de la nécessité de disposer, à assez court terme, de composants et d'outils économiquement viables (en matière de bas coûts de production et d'utilisation). [3]

Le projet de ce mémoire consiste à comprendre le principe de fonctionnement d'une liaison optique, surtout Les effets dans la fibre optique car entre deux bouts de la fibre se passe des phénomènes aussi divers que complexes, où nous allons introduire les principaux problèmes qui se manifestent lors de la transmission de la lumière. Il faut que l'atténuation dans la fibre soit relativement faible pour que l'information soit détectée à la fin de la fibre. Mais en plus d'avoir une faible dispersion, En effet, la largeur temporelle des impulsions doit demeurer relativement acceptable, car cet élargissement limite le débit dans un système de télécommunication optique, car il force à augmenter le délai entre deux impulsions

Le présent travail de mémoire, décrira les différents éléments intervenant dans un système de transmission optique. Le travail est devisé en quatre parties :

Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique de la fibre optique qui se résume dans la présentation de la fibre optique, la transmission par la fibre et la présentation des défauts de transmission par fibre optique.

Dans le second chapitre, on va décrire la chaine de télécommunication optique et les différentes techniques utilisées pour compenser les défauts de transmission.

Au troisième chapitre on va définir la technique de multiplexage en longueur d'onde. Il existe principalement quatre types : WDM, DWDM, CWDM, UDWDM.

Le quatrième chapitre est consacré d'abord à la description du logiciel de simulation OptiSystem. Ensuite on va faire la simulation d'une chaine de télécommunication optique en tenant compte des différents paramètres à savoir : la longueur de la fibre, le débit binaire

Et on terminera par une conclusion.

**Bonne lecture**

# Chapitre I

## La fibre Optique

## I.1 Introduction

La fibre optique, mince cheveu de verre très transparent, a révolutionné les télécommunications depuis sa découverte dans les années soixante. L'information n'est plus transmise sous forme électrique mais sous forme lumineuse. En raison de sa faible atténuation, son faible poids, sa très petite taille et sa résistance mécanique, elle s'est imposée au fil des années comme le média par excellence pour la transmission des données sur des longues distances.

La conception des systèmes de transmission à très grande capacité était désormais possible, de plus les échanges à travers ces systèmes allaient être de plus en plus nombreux et la demande de services de plus en plus élevée. Son apparition a nécessité la conception et le développement de nouveaux composants optiques. [1]

## I.2 Onde électromagnétique (OEM)

Elle est constituée d'un champ électrique  $\mathbf{E}$  et d'un champ magnétique  $\mathbf{B}$  qui varient en même temps. Le vecteur du champ électrique  $\mathbf{E}$  et celui du champ magnétique  $\mathbf{B}$  se sont perpendiculaire entre eux et perpendiculaire à la direction de propagation. (Figure I.1)

### I. 2. 1. Propriétés d'une onde électromagnétique :

- a) **La fréquence** : la fréquence  $f$  d'une électromagnétique est la fréquence des champs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{B}$  qui la composent.
- b) **La vitesse de propagation dans le vide ou l'air** :  $c = 3.108 \text{ m/s}$ .
- c) **La longueur d'onde** : La longueur d'onde  $\lambda$  est le trajet parcouru par l'onde durant une période  $T$  :  $\lambda = c/f = c \cdot T$ .
- d) **La Polarisation** : l'OEM est polarisée dans la direction du champ électrique  $\mathbf{E}$  [2]

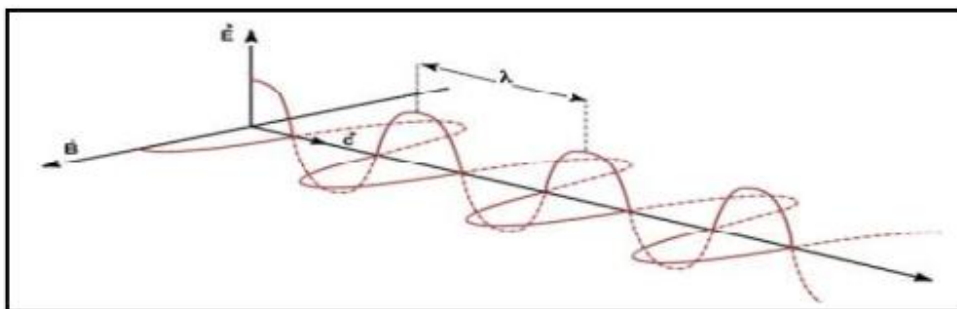


Figure I. 1 : L'onde électromagnétique



### I.3 Notions sur l'optique géométrique

- Un milieu de propagation est caractérisé par : la permittivité  $\epsilon$ , la perméabilité  $\mu$  et la conductivité  $\sigma$ .
- A partir des deux premiers paramètres ont défini l'indice de réfraction  $n$  du milieu de propagation  $n = \sqrt{\mu \epsilon}$ .
- L'indice de réfraction permet de déterminer la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu de propagation, cette vitesse est donnée par :  $v = c/n$  avec  $c$  : vitesse de la lumière. [2]

### I.4 Réseaux de télécoms par fibres optiques

#### I.4.1 Réseau étendu ou longue distance (WAN, Wide Area Network)

Il est déployé à l'échelle d'un pays ou d'un continent, et ses nœuds sont de très grands centres urbains (Figure I.2). Ce type de système :

- comprend des systèmes terrestres ou sous-marins.
- véhicule des données à grande vitesse sur des longues distances de plus de 100 km
- peut utiliser des répéteurs pouvant régénérer le signal optique. Ces répéteurs sont constitués par des régénérateurs optoélectroniques 3R (Retiming, Reshipping, Regenerating) et par des amplificateurs optiques.[3]

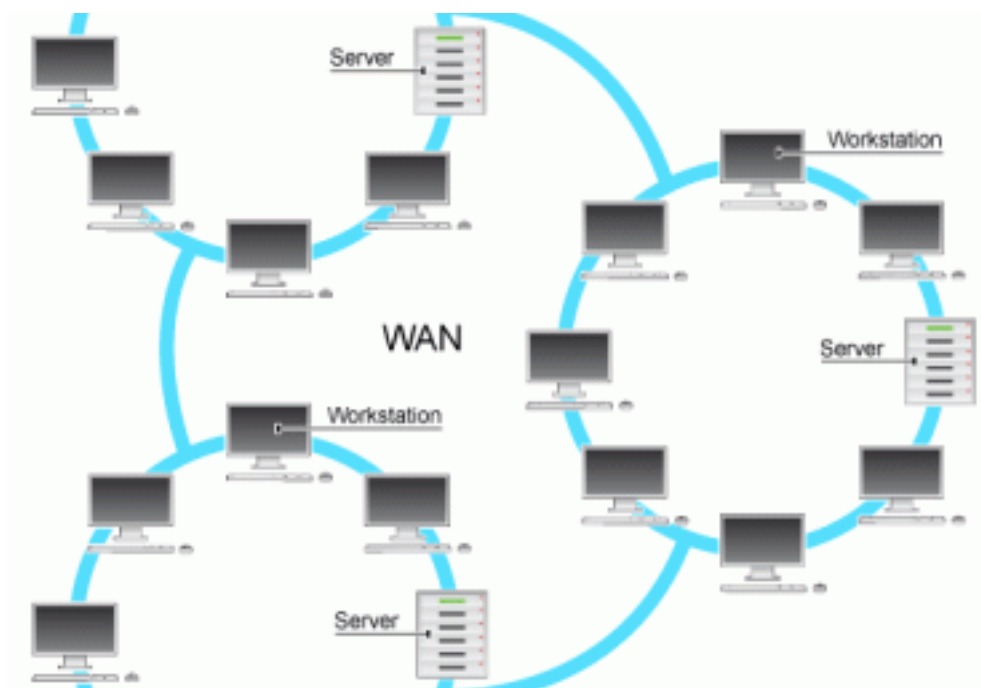


Figure I. 2 : Schéma montrant le réseau étendu (WAN)

### I.4.2 Réseau métropolitain (MAN, Metropolitan Area Network)

Encore appelé réseau intermédiaire, le réseau métropolitain (Figure I.3) connaît en ce moment un véritable essor. Déployé entre le dernier autocommutateur à autonomie d'acheminement du réseau longue distance et une zone plus précise (arrondissement, campus, petite ville, ...), il possède un environnement souvent très complexe et divers. Fondamentalement, on peut distinguer les réseaux métropolitains structurants et métropolitains d'accès. [4]

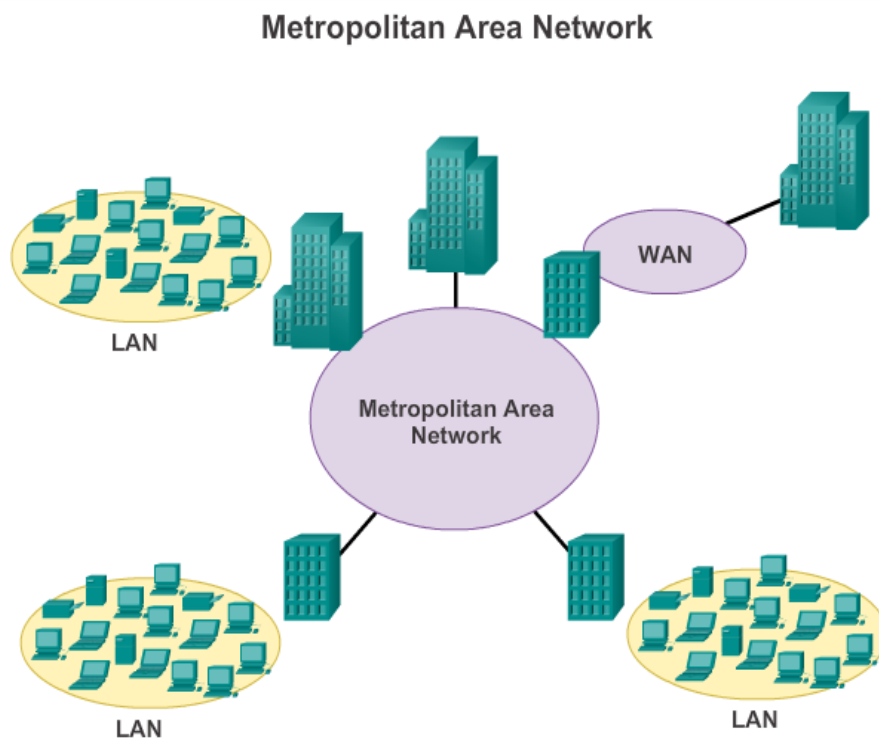
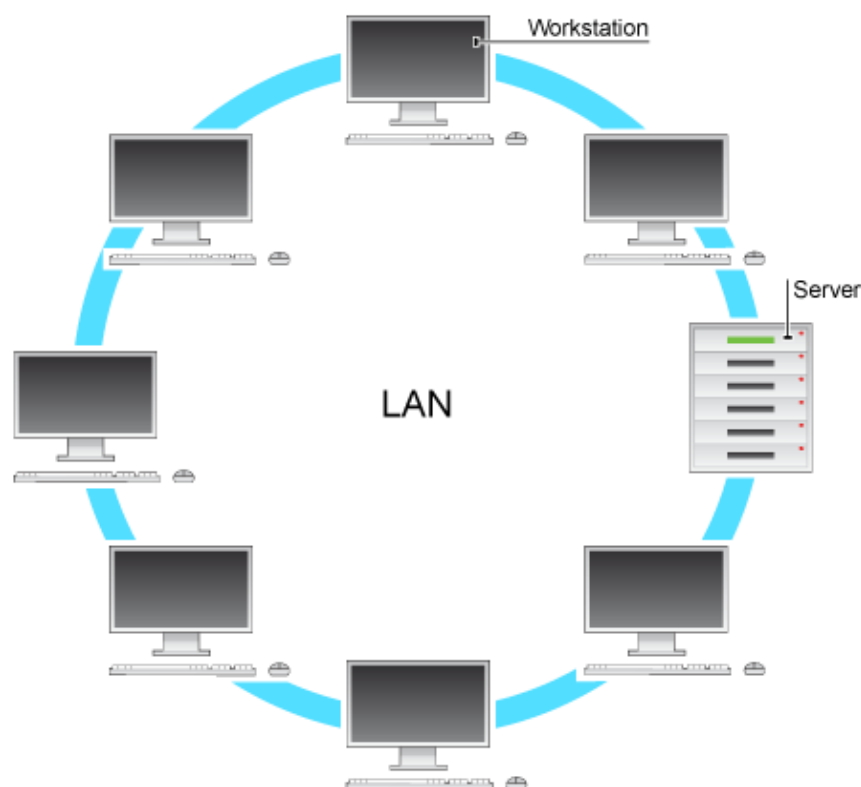


Figure I. 3 : Schéma montrant le réseau métropolitain (MAN)

### I.4.3 Réseau local (LAN, Local Area Network)

Un réseau d'accès regroupe l'ensemble des moyens servant à relier des terminaux de télécommunication entre un commutateur du réseau de transport et un utilisateur final (Figure I.4). Sa longueur varie de 2 à 50 Km et sa capacité est au plus du même ordre de grandeur que celle du réseau métropolitain. La fibre optique est largement utilisée par les réseaux longue distance (terrestre, marins) et apparaît ces dernières années dans le réseau d'accès optique -on parle de FTTx- permettant aux abonnés haut débit de profiter des performances de ce support qui est beaucoup meilleur que les autres supports tels que les câbles en cuivre, le wifi ou encore les liaisons satellitaires.

L'utilisation de la paire de cuivre dans les réseaux d'accès permet d'atteindre un débit maximal (théorique) de 200 Mbps sur une portée de 200m. Par contre l'utilisation de la fibre optique permet de transmettre des données facilement à un débit de 10 Gbps sur une distance de 60 Km. Vu le grand nombre des clients et le faible partage de l'infrastructure ces réseaux ont généralement un coût prépondérant. [5]



**Figure I. 4 :** Schéma montrant le réseau local (LAN)

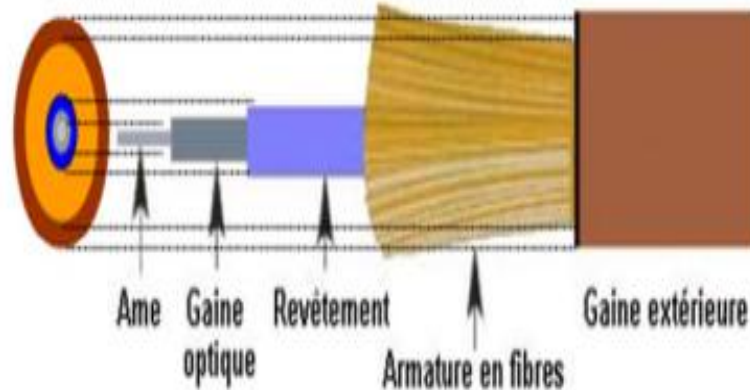
## I.5 Fibre optique

### I.5.1 Présentation de la fibre optique

La fibre optique est une ligne de transmission sous forme d'un guide d'onde cylindrique qui est composée d'une partie centrale appelée cœur d'indice de réfraction  $n_1$  fabriquée à base de silice entourée d'un autre matériau d'indice de réfraction  $n_2$  appelé la gaine (Figure I.5).

Le diamètre du cœur est de quelques dizaines de micromètres et celui de la gaine est de quelques centaines de micromètres, la fibre toute seule est très fragile et pour la protéger contre les facteurs externes (humidité, attaque chimique) elle est revêtue par le plastique puis par le nylon. [2]





**Figure I. 5 :** Structure d'une fibre optique

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine. Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui du cœur (une différence de quelques % est suffisante). La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique. L'ouverture numérique (O.N.) représente l'ouverture angulaire limite avant une transmission et non une réflexion totale sur le dioptré cœur-gaine de la fibre [4]

$$\text{O.N} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad \text{I. 1}$$

Avec :

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

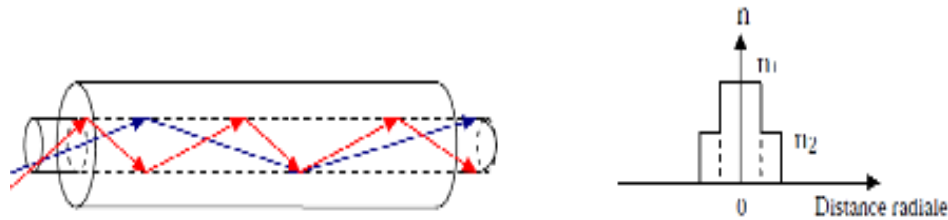
$n_2$  : est l'indice de réfraction de la gaine optique.

### I.5.2 Différents types de fibres optiques

Du point de vue propagation, il existe deux types de fibre optique : la fibre optique monomode et la fibre optique multi-mode et qui peuvent être classées selon le profil d'indice de réfraction fibre monomode à saut d'indice, fibre multi-mode à saut d'indice et fibre multimode à gradient d'indice.

### I.5.2.1 Les fibres optiques à saut d'indice multi-modes

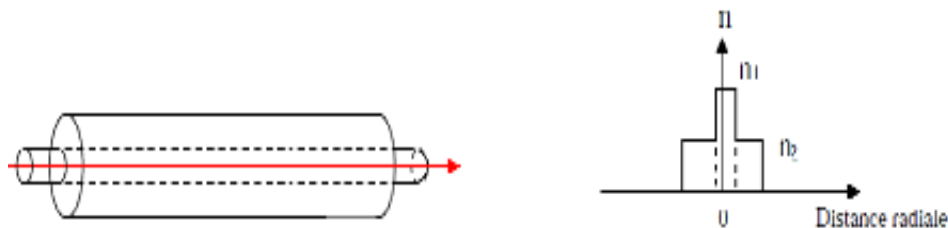
Dans ces types de fibres, le cœur est homogène de diamètre varie entre  $100\ \mu\text{m}$  et  $200\ \mu\text{m}$  tandis que celui de la gaine varie de  $150\ \mu\text{m}$  à  $250\ \mu\text{m}$  (voire Figure I.6) [2]



**Figure I. 6 :** Fibre optique multimode à saut d'indice et son profil d'indice

### I.5.2.2 Les fibres optiques à saut d'indice monomodes

Elles se différencient avec les fibres optiques à saut d'indice multi-modes en diamètres. Le diamètre de leurs cœurs varie entre  $6\ \mu\text{m}$  et  $8\ \mu\text{m}$ , tandis que le diamètre de leurs gaines est de  $125\ \mu\text{m}$ . (voire Figure I.7) [2]



**Figure I. 7 :** Fibre optique monomode à saut d'indice et son profil d'indice

Fibre monomode	Fibre multimode
Ouverture numérique faible (connexion délicate) Très faible atténuation (qqd dixième de dB/Km) Faible dispersion Haut débit longue distances	Ouverture numérique forte (connexion facile) Faible atténuation Forte dispersion Réseaux locaux

**Tableau I. 1 :** Caractéristiques générales des fibres monomode et multimode

### I.5.2.3 Fibres optiques à gradient d'indice

Dans ces types de fibres, l'indice du cœur diminue progressivement vers l'extérieur à partir de l'axe du cœur vers l'interface cœur-gaine. Le diamètre du cœur est de  $50\mu\text{m}$  et celui de la gaine est de  $150\mu\text{m}$ .(voire Figure I.8) [2]

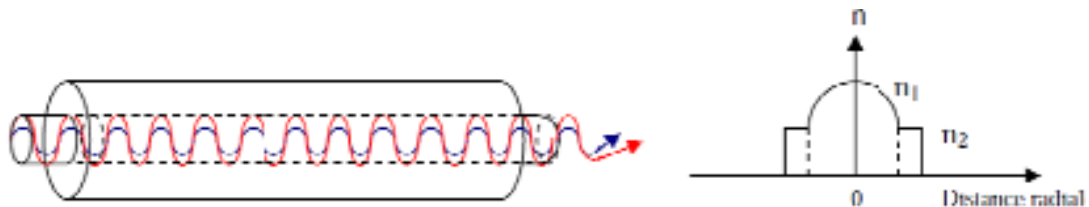


Figure I. 8 : Fibre optique à gradient d'indice et son profile d'indice

## I.6 Propagation dans la fibre optique

La propagation des rayons optiques se fait par la réflexion successive sur l'interface cœur gaine (voire Figure I.9). Pour que les rayons injectés dans la fibre soient totalement réfléchis par l'interface cœur gaine, il est nécessaire que l'angle d'incidence soit supérieur à l'angle critique, cette condition impose l'existence à l'entrée de la fibre d'un cône d'acceptance (angle en sommet  $2\theta_{\text{Acc}}$ ), à l'intérieur du quel tout rayon injecté se propage par réflexion totale [6]

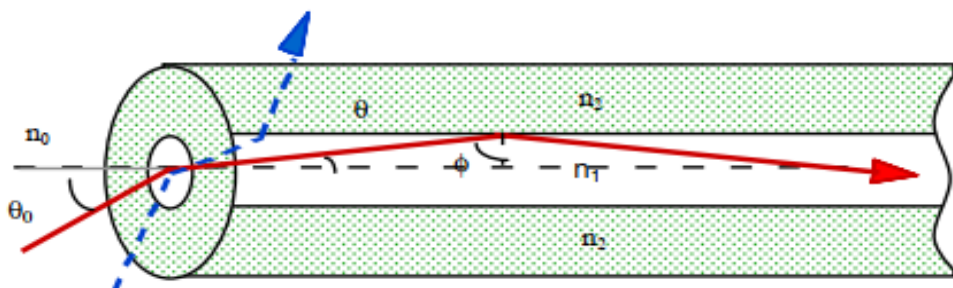


Figure I. 9 : Lois de propagation du signal dans une fibre optique

### I.6.1 Ouverture numérique

Est un paramètre lié à l'angle d'acceptance, indique l'angle d'incidence pour le quelle le rayon optique soit transmet par des réflexions totales dans la fibre optique, donnée par[2] :

$$ON = n_0 \sin \theta_{ac} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{I.2}$$

Si la fibre a une différence d'indice faible :

$$ON = n_1 \sqrt{2 \Delta} \quad \text{Avec } \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad \text{I.3}$$

### I.6.2 Longueur d'onde de coupure

La longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  est celle au-dessus de laquelle la fibre devient monomode. Si la longueur d'onde de propagation est inférieure à  $\lambda_c$  la fibre devient multimodes. Elle est définie comme suit dont  $a$  est le rayon du cœur :

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{2.404} a \cdot ON \quad \text{I.4}$$

## I.7 Effets linéaires et non linéaires dans la fibre optique

La propagation sur fibre optique comprend de nombreux effets physiques tels que les effets linéaires : pertes et dispersion et des effets non linéaires variés dont il faudra analyser les conséquences sur la qualité de transmission.

### I.7.1 Effets linéaires

#### I.7.1.1 Atténuation dans la fibre optique

C'est le rapport entre la puissance d'entrée et la puissance de sortie

$$\alpha_{\text{dB/m}} = \frac{10}{L} \log \frac{P}{P_0} \quad \text{I.5}$$

Avec :

**$\alpha$**  : Le coefficient d'atténuation

**$L$**  : la longueur de la fibre

**$P$**  et  **$P_0$**  sont respectivement les puissances d'émission et de réception

L'atténuation dans la fibre a plusieurs origines (voire Figure I.10) :

- Pertes par absorption moléculaire: elles sont causées par l'absorption des rayons optiques par la silice et les impuretés contenus dans celle-ci.
- Pertes par micro courbures: elles sont dues principalement aux techniques de fabrication, elles se traduisent par l'irrégularité de l'interface cœur-gaine. Lorsqu'un faisceau de rayons optiques atteint l'interface cœur-gaine qui présente des irrégularités, chaque rayon incident est caractérisé par sa trajectoire qui est imposée par le point de réflexion. En effet, certains rayons ( $\theta$  incidente  $\geq \theta$  critique) sont convertis en d'autres rayons introduisant ainsi des pertes de conversion, par contre d'autres rayons peuvent se réfracter dans la gaine ( $\theta$  incidente  $< \theta$  critique) et produire un rayonnement.
- Pertes par courbures: lorsqu'on courbe une fibre, l'angle d'incidence diminue, ce qui a pour conséquence soit une conversion de mode, soit un rayonnement dans la gaine
- Pertes par épissurage: elles sont dues au couplage. [6]

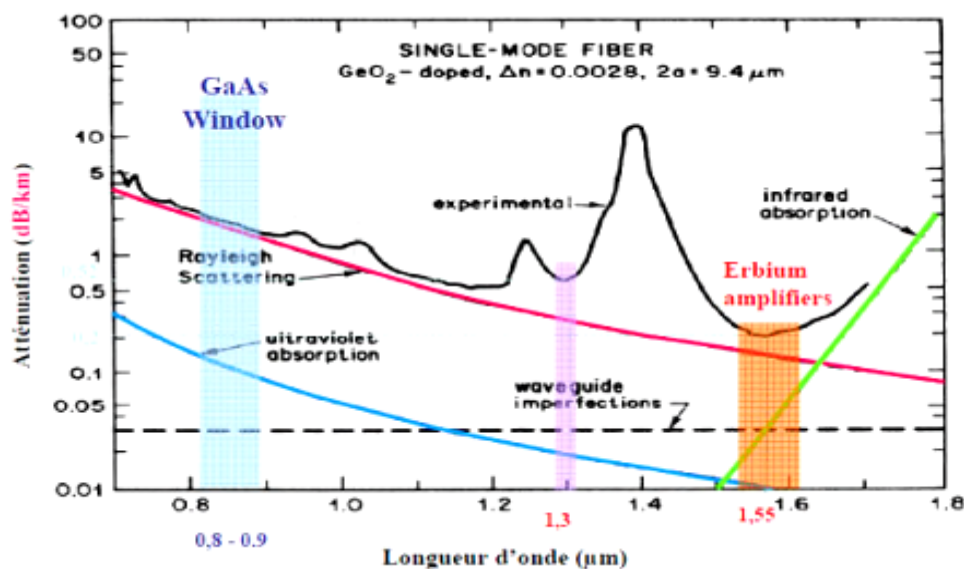


Figure I. 10 : Pertes optique dans une fibre standard

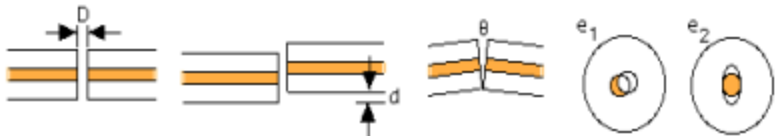
Selon l'atténuation, les fibres peuvent être utilisées pour la transmission essentiellement dans deux « fenêtres en longueur d'onde » : les fenêtres 1300 nm et 1500 nm. La fenêtre 800 nm étant pratiquement complètement abandonnée.

La fenêtre à 1300 nm a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne importante d'environ 0,4 dB/ km, mais les composants optoélectroniques à ces longueurs d'onde (lasers et récepteurs) sont peu coûteux. Elle est utilisée pour les systèmes de



télécommunications de courte distance (quelques dizaines de kilomètres) ou de faible capacité.

La fenêtre à 1550 nm a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,2 dB/km. Elle est utilisée généralement pour les télécommunications longues distances et à haut débit car la faible atténuation dans cette fenêtre permet d'espacer bien davantage les coûteux régénérateurs et/ou amplificateurs nécessaires pour la compensation de l'atténuation dans la fibre de ligne. [3]

Type de pertes	Explications
<b>absorption</b>	Perdurance du photon de lumière par un électron d'un atome d'impureté
<b>diffusion</b>	Variation locale de l'indice de réfraction du cœur de la fibre. Changements de densité ou de composition dans la matière.
<b>courbures</b>	Torsion dans la fibre. non-respect du principe de réflexion totale interne.
<b>Pertes de connections</b>	Séparation longitudinale. Désalignement radial/angularaire Excentricité/ellipticité des cœurs 

**Tableau I. 2 :** Les différentes causes d'atténuation

### I.7.1.2 Dispersion dans la fibre optique

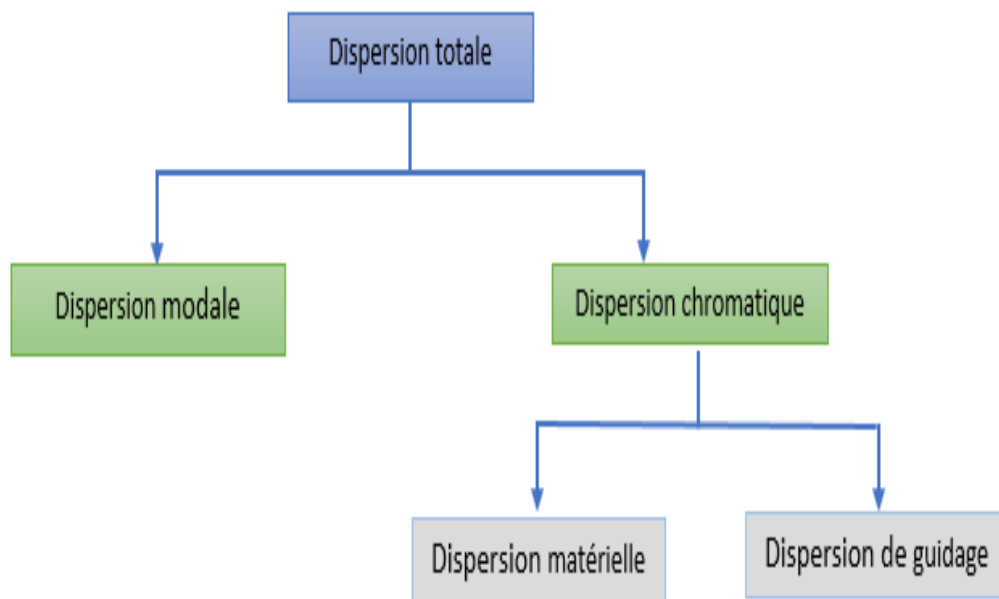
Lorsqu'un signal lumineux se propage dans un milieu, il subit un élargissement dans le temps que l'on appelle la dispersion temporelle. Cet élargissement limite le débit dans un système de communication optique, car il force à augmenter le délai entre deux impulsions. Il existe plusieurs causes d'élargissement temporel d'une impulsion qui se propage dans un milieu dispersif.



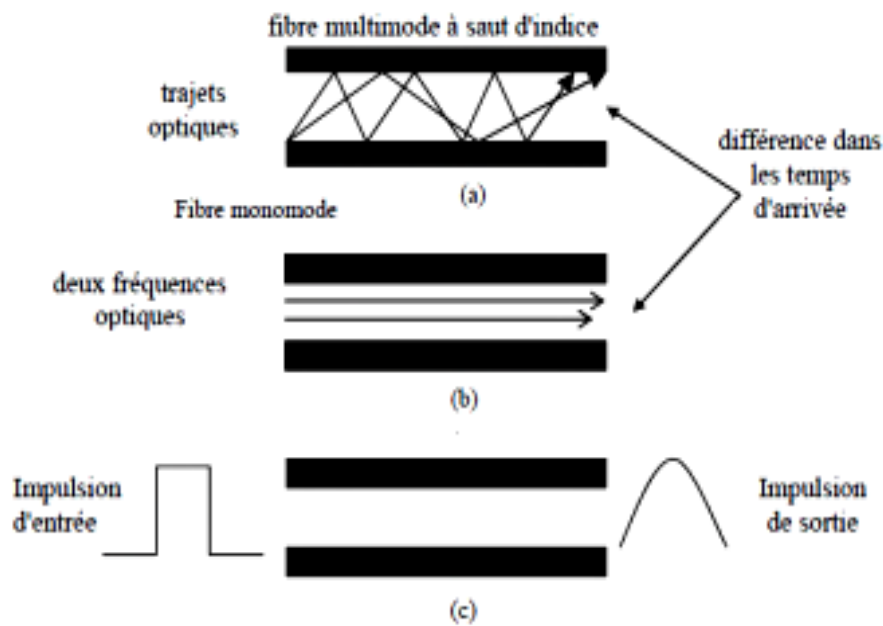
Une première cause vient du fait que pour une longueur d'onde donnée (lorsque nous considérons la propagation dans une fibre multi mode), les vitesses de groupe des différents modes ne sont pas égales les unes aux autres, nous analyserons cet effet, nommé dispersion modale.

Une seconde cause de la dispersion temporelle vient du fait que l'indice de réfraction d'un milieu dépend de la longueur d'onde et que les sources utilisées pour transmettre le signal ne sont pas purement monochromatiques (on parle alors de dispersion chromatique ou de dispersion matériau) (voire Figure I.11).

Les différentes composantes spectrales d'une source ont donc des temps de propagation différents, ce qui provoque l'élargissement d'une impulsion (peu importe le fait qu'elle soit guidée ou non). [7]



**Figure I. 11 :** Les différents types de la dispersion



**Figure I. 12** : Différents représentations des dispersions dans la fibre

### I.7.1.2.1 Dispersion chromatique

Une source parfaitement monochromatique n'existe pas. La lumière émise par une source réelle est donc constituée de la somme de différentes longueurs d'onde qui est caractérisée par une largeur à mi-hauteur (largeur spectrale  $\Delta\lambda$ ).

L'indice de réfraction d'un matériau dépend de la longueur d'onde. Il en résulte que la vitesse de propagation de la lumière dans un matériau dépend également de sa longueur d'onde. Il en résulte un temps de propagation différent pour les différentes composantes spectrales, et donc un élargissement des impulsions de lumière émises par une source non monochromatique. La dispersion chromatique est donnée par [2]:

$$D_{CGM} = \frac{\tau_t}{L \Delta\lambda} \quad \text{I. 6}$$

$$D_{CGM} = D_{CGM} + D_{CGM} \quad \text{I. 7}$$

$D_{CM}$ : Dispersion chromatique du matériau.

$D_{CG}$ : Dispersion chromatique du guide.

$\tau_t$ : Temps de transit.

### I.7.1.2.2 Dispersion modale

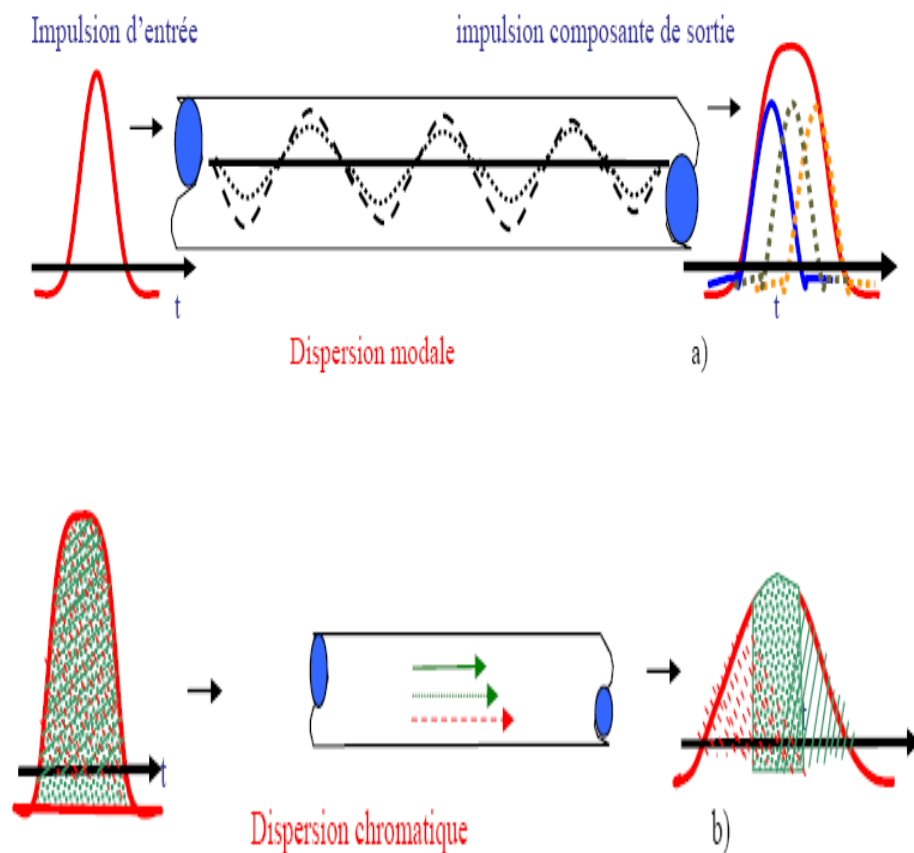
Qui résulte de la différence de temps de propagation des différentes modes qui se propagent dans la fibre multimodes.

La dispersion est une grandeur très importante pour les télécoms à grandes distances.

Les fibres monomodes en silice offrent actuellement la meilleure fiabilité et la plus grande bande passante que toute autre fibre, indispensables pour une propagation du signal sur de longues distances ou pour le WDM. [6]

### I.7.1.2.3 Effets de la dispersion modale et chromatique

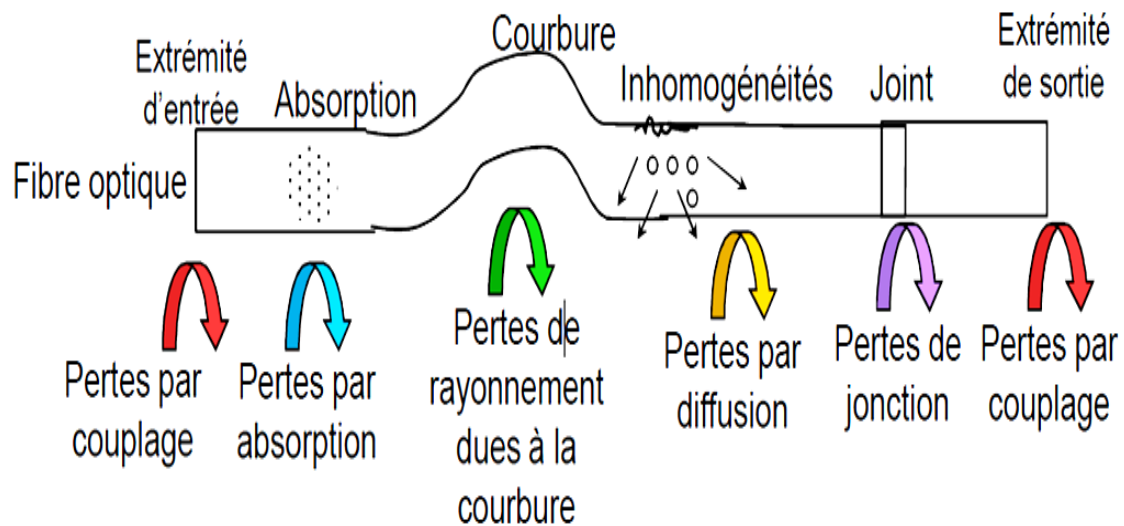
Les effets de la dispersion modale et chromatique sur la propagation de l'impulsion optique le long de la fibre, illustrée par la Figure 1.13 mettant en évidence, comment les différents comportements des composantes de l'impulsion déterminent la distorsion de celle-ci en réception. [7]



**Figure I. 13** : Effets de dispersion modale et chromatique

### I.7.1.3 Pertes dans la fibre optique

Un schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre optique est représentée dans la la Figure 1.14



**Figure I. 14 :** Schéma récapitulatif des différents types de pertes dans une fibre optique

- **L'absorption**

Les phénomènes mis en jeu ici sont régis par les lois des échanges d'énergie au niveau des atomes constituant le matériau de la fibre (absorption intrinsèque) ou ceux constituant les impuretés de ce matériau, comme les ions hydroxydes OH<sup>-</sup> (absorption extrinsèque). [5]

- **Pertes par couplage**

lors de l'injection dans la fibre optique, l'intégralité du rayonnement incident ne rentre pas dans le cœur ou ne se propage pas dans la fibre.[5]

- **Pertes de connectique**

Lorsqu'on raccorde bout à bout deux fibres optiques on voit apparaitre des pertes ponctuelles ces pertes sont dues à une séparation longitudinale, un désalignement radial, un désalignement angulaire, une excentricité des cœurs ou une ellipticité des cœurs. [5]

### I.7.2 Effets non linéaires

Les systèmes de télécommunications sur fibre sont conçus dans l'hypothèse d'une transmission linéaire et les effets non-linéaires sont alors des effets parasites qui en dégradent les performances quand les puissances véhiculées deviennent élevées.

Aujourd'hui, les systèmes de transmission à haut débit et grande distance utilisent des amplificateurs de puissance à l'émission, ce qui conduit à des puissances injectées dans la fibre très élevées et des effets non-linéaires non négligeables. [1]

Dans cette partie on va traiter les effets non linéaires qu'on peut classer en deux catégories: celles induites par l'indice de réfraction non linéaire (effet Kerr) et celles dues à la diffusion stimulée (Brillouin et Raman). [4]

#### I.7.2.1 Effet Kerr optique

L'effet non linéaire prépondérant dans la silice qui vient affecter la propagation est l'effet Kerr, il intervient très souvent lorsque des impulsions très brèves et très intenses traversent le cœur monomode d'une fibre optique, le vecteur de polarisation ne reste plus proportionnel au champ électrique et l'indice de réfraction devient alors dépendant de l'intensité de l'onde optique. Dans une fibre optique, ce changement d'indice est considéré comme instantané (temps de réponse de l'ordre de  $10^{-15}$  s).

Ce qui provoque une déformation de la répartition des charges électronique des molécules de silice. Cet indice de réfraction affecté par l'effet Kerr est donné par la relation suivante [8]

$$n = n_L + n_2 I \quad \text{I. 8}$$

$I = [E]^2$ : L'intensité optique du champ

$n_L$ : l'indice linéaire (indice pour des champs électriques peu intenses)

$n_2$ : l'indice non linéaire dont la valeur est de l'ordre de  $10^{-20}$  m<sup>2</sup>/W pour les fibres optiques.

#### I.7.2.2 Effet Brillouin (SBS Stimulated Brillouin Scattering)

Cet effet impose une limite sur la quantité de puissance optique qui peut être utilement injectée dans une fibre optique.

L'effet SBS a une puissance de seuil : quand ce seuil est dépassé, un facteur significatif de la lumière transmise est réorienté en arrière vers l'émetteur, onde de Stokes, avec une fréquence inférieure à celle du signal, le SBS induit un bruit significatif dans le système. L'efficacité de cet effet diminue si le signal est modulé et disparaît pratiquement pour une bande supérieure à 100 GHz. [3]

### I.7.2.3 Effet Raman (SRS Simulated Raman Scattering)

Lorsqu'une onde pompe (photons incidents) traverse un matériau elle est annihilée, certains de ces photons perdent une partie de leur énergie en faveur d'un phonon, particule associée à la vibration qui apparaît dans la matière, avec une certaine fréquence  $\omega$ . [2]

Ils sont alors diffusés avec une énergie plus faible constituent une onde appelée (onde Stokes) de fréquence :

$$\nu_s = \nu_p - \delta\nu \quad \text{I.9}$$

$\delta\nu$  : dépend que du matériau

En sens inverse, lorsque les phonons vont céder leur énergie à des photons qui vont diffuser sous forme d'une onde (anti-Stokes) de fréquence :

$$\nu_a = \nu_p + \delta\nu \quad \text{I.10}$$

## I.8 Avantages et inconvénients

### I.8.1 Avantage

- La très large bande passant, le multiplexage possible (en longueur d'onde) de nombreux signaux et de nombreux utilisateurs sur la même fibre, permettent des systèmes de portée (plus de 100 km entre l'émetteur et le récepteur) et de capacité (des débits de plusieurs T bit/s sont possibles sur une même fibre). [9]
- De plus, l'atténuation due au support de communication s'avère très faible, ce qui permet de couvrir des distances plus grandes sans nécessité d'installer des répéteurs. [8]
- La fibre optique présente également des avantages de sécurité électrique (isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive et sous forte tension) et électromagnétique. Elle est donc insensible aux parasites électromagnétiques, et n'en créant pas elle-même, elle assure ainsi une inviolabilité

presque totale, ce qui permet son utilisation dans les applications militaires, bancaires et en transmission de données. [8]

- Enfin, les facilités de mise en œuvre qu'elle présente, à la fois par sa petite taille, sa grande souplesse et son faible poids, combinés à un coût raisonnable, lui confère un avantage économique sur les autres supports de transmission. [8]

### **I.8 .2 Inconvénients**

Les inconvénients de la fibre optique sont [9]:

- Prix : Même si la matière première pour fabriquer des fibres optiques est abondante et pas chère, les fibres optiques sont encore plus chères par mètre que le cuivre. Une fibre peut transporter beaucoup plus de signaux qu'un seul câble en cuivre et la transmission à large distance signifie que moins de répéteurs coûteux sont requis
- Fragilité : les câbles à fibre optique sont plus fragiles que les fils électriques.
- Transmission : La transmission du signal dans les câbles de fibre optique doit se répéter au long d'une certaine distance grâce à des appareils amplificateurs mais demande beaucoup moins de répétitions que les câbles de cuivre
- Protection : Les Fibres Optiques exigent plus de protection autour du câble comparé au cuivre.

### **I.9 Conclusion**

Ce chapitre a permis de situer le contexte de la description d'une liaison optique. Les différentes pertes linéaires telles que l'atténuation et la dispersion ont été présentées, ainsi leurs effets sur la propagation de la lumière.



# Chapitre II

## Etude d'une liaison par Fibre Optique

## II.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, on va étudier d'une manière globale les composants d'une liaison par fibre optique comme ligne de transmission, émetteur et récepteur. En premier lieu, on va définir qu'est ce qu'une liaison par fibre optique, ensuite on va décrire la ligne de transmission, la partie d'émission, où on va aborder une bref définition des sources optiques en décrivant les composants : diode laser DL et diode électroluminescente DEL en comparant entre eux, on va voir aussi deux types de modulation (directe et externe).[9]

## II.2 Définition d'une liaison par fibre optique

Dans les liaisons optiques hyperfréquences (Figure II.1), comme dans tous les systèmes de communication, il existe trois blocs importants pour effectuer la transmission de l'information qui sont : L'émetteur, le canal de communication et le récepteur.

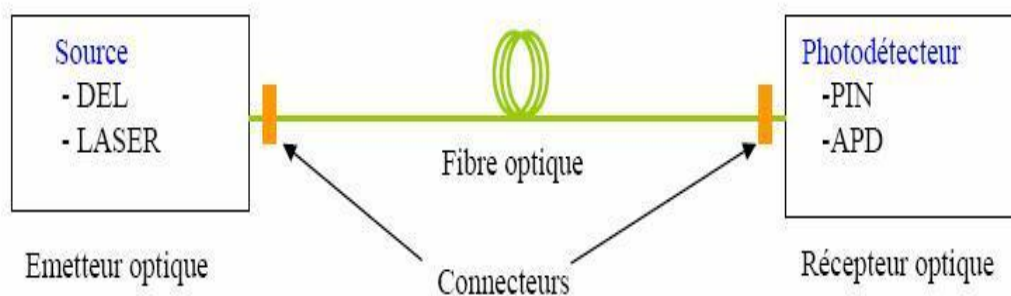


Figure II. 1 : Schéma synoptique d'une liaison optique

## II.3 Composant d'émission

Compte tenu des propriétés des fibres optiques, des efforts sont nécessaires sur les composants micro-optoélectroniques pour permettre une utilisation optimale. D'importants progrès sur les lasers ont été réalisés dès la fin des années 60 et les premiers réseaux à fibres optiques ont pu être déployés.

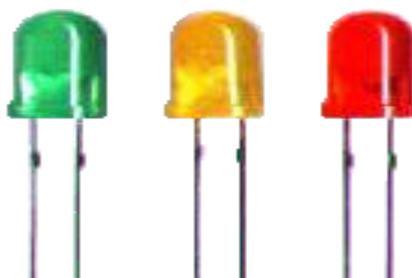
La partie émission d'une liaison optique est composée de divers éléments (laser, modulateur, driver). Son rôle est de délivrer au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données. [4]

### II.3.1 Sources optiques

#### II.3.1.1 Diodes électroluminescentes LED

Une LED est une jonction PN polarisée en direct (Figure II.2). Les électrons ou les trous qui constituent les porteurs majoritaires sont injectés dans le voisinage de la jonction. Leur recombinaison donne lieu à une émission de la lumière.

Ces diodes sont généralement utilisées pour les applications bas débit. C'est pour ces raisons que nous ne parlerons dans la suite que des diodes lasers à semi-conducteurs.[3]



**Figure II. 2 :** Diode électroluminescente LED

La LED représente les caractéristiques suivantes :[7]

- En théorie c'est une droite. En pratique la courbe dévie de la droite idéale à cause de l'échauffement.
- Pas de tension de seuil. La lumière est émise dès que le courant passe.
- Une diode standard émet typiquement 3mW pour un courant de 100 mA.
- Rendement de l'ordre de 0.03 mW/mA.
- Courant maximum de fonctionnement conseillé : 100 à 200 mA

#### a) Mécanisme d'émission

La recombinaison d'un électron et d'un trou d'électron dans un semi-conducteur conduit à l'émission d'un photon. En effet, la transition d'un électron entre la bande de conduction et la bande de valence peut se faire avec la conservation du vecteur d'onde (Figure II.3) .

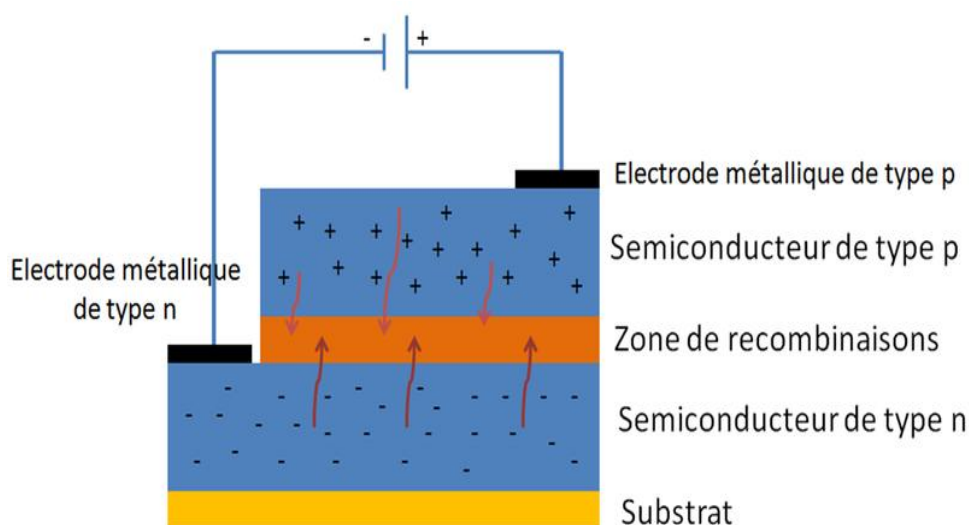
Elle est alors radiative (émissive) c'est-à-dire accompagnée de l'émission d'un photon. Dans une transition émissive, l'énergie du photon créé est donnée par la différence des niveaux d'énergie avant ( $E_i$ ) et après ( $E_f$ ) la transition :

$$h\nu = E_i - E_f(\text{eV})$$

II. 1

Une diode électroluminescente est une jonction P-N qui doit être polarisée en sens direct lorsqu'on veut émettre de la lumière.

Le potentiel imposé aux bornes doit être supérieur à celui imposé par la jonction P-N. La plupart des recombinaisons sont radiatives. La face émettrice de la LED est la zone P car c'est la plus radiative [10]



**Figure II. 3 :** Fonctionnement d'une LED

### b) Couleurs de diode électroluminescente

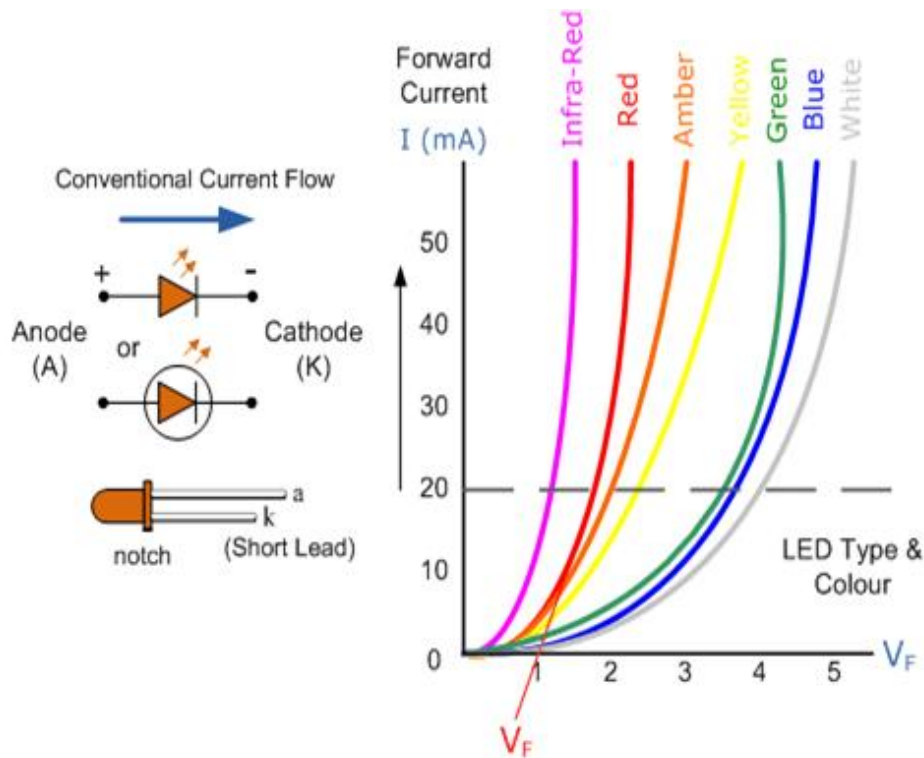
Alors, comment une diode électroluminescente obtient-elle sa couleur? Contrairement aux diodes de signal normales conçues pour la détection ou la rectification de puissance, et qui sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs au germanium ou au silicium, les diodes électroluminescentes sont fabriquées à partir de composés semi-conducteurs exotiques tels que l'arséniure de gallium (GaAs), le phosphure de gallium (GaP), l'arséniure de gallium Le phosphure (GaAsP), le carbure de silicium (SiC) ou le nitrure de gallium et d'indium (GaInN) sont tous mélangés ensemble à différents rapports pour produire une longueur d'onde de couleur distincte.

Différents composés LED émettent de la lumière dans des régions spécifiques du spectre de la lumière visible et produisent donc des niveaux d'intensité différents. Le choix exact du

matériau semi-conducteur utilisé déterminera la longueur d'onde globale des émissions de lumière photonique et donc la couleur résultante de la lumière émise (Tableau II.1) [11]

Typical LED Characteristics			
Semiconductor Material	Wavelength	Colour	$V_F @ 20mA$
GaAs	850-940nm	Infra-Red	1.2v
GaAsP	630-660nm	Red	1.8v
GaAsP	605-620nm	Amber	2.0v
GaAsP:N	585-595nm	Yellow	2.2v
AlGaP	550-570nm	Green	3.5v
SiC	430-505nm	Blue	3.6v
GaN	450nm	White	4.0v

**Tableau II. 1 :** Caractéristiques des LED



**Figure II. 4 :** Symboles schématiques de LED et les différentes couleurs disponibles

### II.3.1.2 Source laser

Un laser est un dispositif à semi-conducteur (Figure II.5) qui génère de la lumière monochromatique et cohérente à travers le processus de l'émission stimulée comme l'indique l'acronyme dont le mot est issu « Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation ».

La première démonstration de l'effet Laser date de 1960 par T. H. MAIMAN (laser à rubis dopé Cr). Ce composant produit une puissance optique beaucoup plus importante que les LEDs avec un spectre plus fin, et peuvent donc coupler plus de puissance avec la fibre.

La différence avec les LEDs et que les lasers disposent sur les deux côtés de deux miroirs pour obtenir plusieurs allers retours dans le milieu en constituant ainsi une cavité optique. Pour les télécommunications on choisit une composition *GaInAsP* qui émette à 1.3 ou 1.55 $\mu\text{m}$ . [12][7]

Les lasers à semi-conducteur sont constitués. [13]

- d'un milieu amplificateur qui utilise la propriété d'émission stimulée de photons dans une jonction **PN** où l'inversion de population entre les bandes de valence et de conduction est assurée par une injection de charges électriques.

- d'une cavité résonnante permettant de sélectionner les modes d'oscillation.



Figure II. 5 : Exemple de diodes laser en boîtier

a) **Paramètres caractéristique du laser**

- **gain optique**

L'injection des porteurs à l'intérieur de la couche active de la diode laser permet de réaliser l'inversion de la population des porteurs. Or, cette dernière ne peut émettre de la lumière cohérente que si la densité de porteurs injectée  $N$  dépasse une valeur critique connue comme densité de transparence de porteurs  $N_T$ .

Dès que cette condition est satisfaite la zone active présente un gain optique. Le pic de ce gain est exprimé de façon empirique par:

$$g_{pic} = A (N - N_T) \quad \text{II. 2}$$

Où  $A$  est le gain différentiel. [8]

- **Puissance**

La puissance d'une diode laser dépend du courant de la jonction. La variation de la puissance lumineuse en fonction du courant permet de mettre en évidence l'existence d'un courant seuil. Lorsque le courant augmente au-dessus du seuil, l'émission stimulée apparaît : tous les porteurs injectés en supplément subissent une recombinaison stimulée (Figure II. 6) [3]

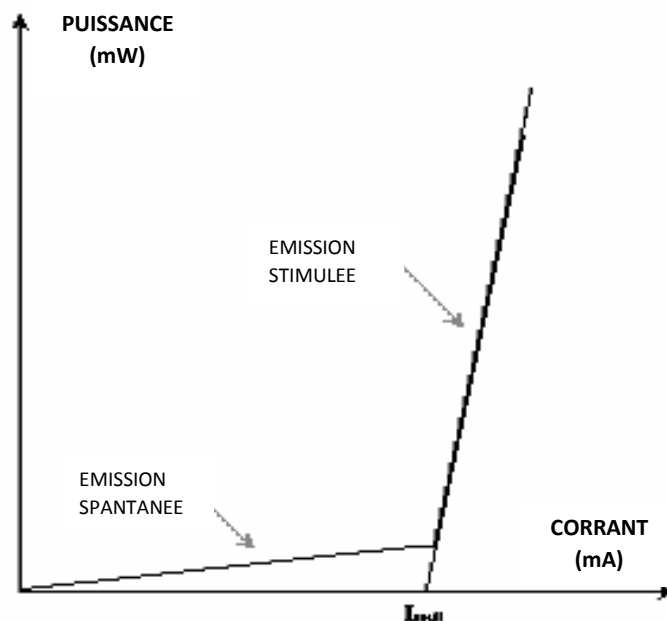


Figure II. 6 : Caractéristique puissance-courant d'un laser

La puissance optique instantanée  $P_{IOPT}$  est alors donnée par la relation [13]:

$$P_{IOPT} = \frac{P \cdot \eta \cdot h \cdot c}{2\tau_p \cdot \lambda} \quad \text{II. 3}$$

Avec :

$P$  : Nombre de photon

$\eta$  : Rendement quantique différentiel

$h$  : Constante de Planck

$\tau_p$  : Durée de vie des photons

### b) L'émission stimulée

Un laser est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée. En effet, dans un semi-conducteur, un électron peut passer d'un état à un autre de trois façons [4] :



- **L'émission spontanée** : De sa propre initiative, l'électron peut tomber dans un état moins énergétique non occupé (il passe d'un état ionisé à un état lié), en émettant un photon spontané.
- **L'absorption** : En absorbant un photon, l'électron peut être amené dans un état plus énergétique. Il passe de l'état lié (électron et trou combinés) à l'état ionisé (électron dans la bande de conduction et trou dans la bande de valence).
- **L'émission stimulée** : Frappé par un photon, l'électron peut retomber dans l'état le moins énergétique (état lié) en émettant un photon stimulé dont le rayonnement correspond à la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et la même directivité spatiale que le photon incident. On parle alors de lumière cohérente. Avec l'émission stimulée s'introduit la notion de gain ou d'amplification du rayonnement incident puisque, à partir d'un photon, on en obtient deux. (Figure II.7)

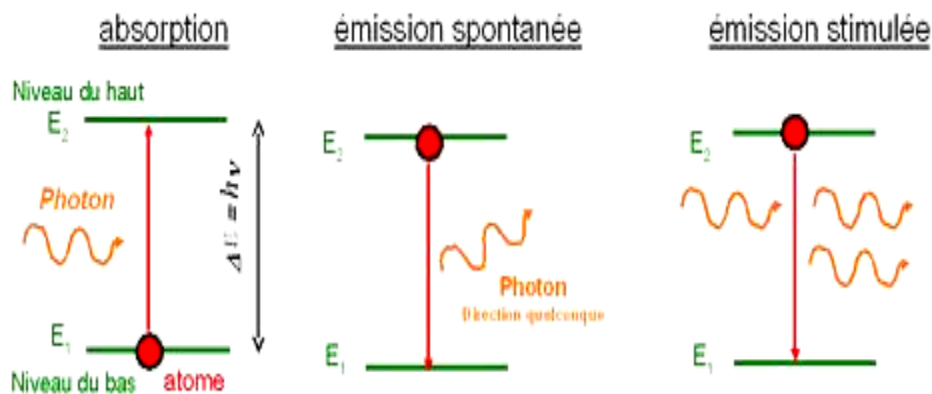


Figure II. 7 : Schéma des processus d'absorption, d'émission spontanée et stimulée

### c) Effet laser

L'effet laser est un principe d'amplification cohérente de la lumière par émission stimulée. Laser est l'acronyme anglais « **Light Amplification by Stimulated Emission Radiation** » en français « **Amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement** ».

La plupart des amplificateurs optiques sont basés sur l'effet laser. Une source laser est une source de lumière spatialement et temporellement cohérente basée sur l'effet laser.



Une source laser associe un amplificateur optique basé sur l'effet laser à une cavité optique, encore appelé résonateur, généralement constituée de deux miroirs, dont au moins l'un des deux est partiellement réfléchissant c'est-à-dire qu'une partie de la lumière sort de la cavité et l'autre partie est réinjectée vers l'intérieur de la cavité laser comme il est schématisé dans la Figure II.8.

Les caractéristiques géométriques de cet ensemble imposent que le rayonnement émis soit d'une grande pureté spectrale, c'est-à-dire temporellement cohérente.

Le spectre du rayonnement contient en effet un ensemble discret de raies très fines, à des longueurs d'ondes définies par la cavité et le milieu amplificateur. La finesse de ces raies est cependant limitée par la stabilité de la cavité et par l'émission spontanée au sein de l'amplificateur (bruit quantique) [14]

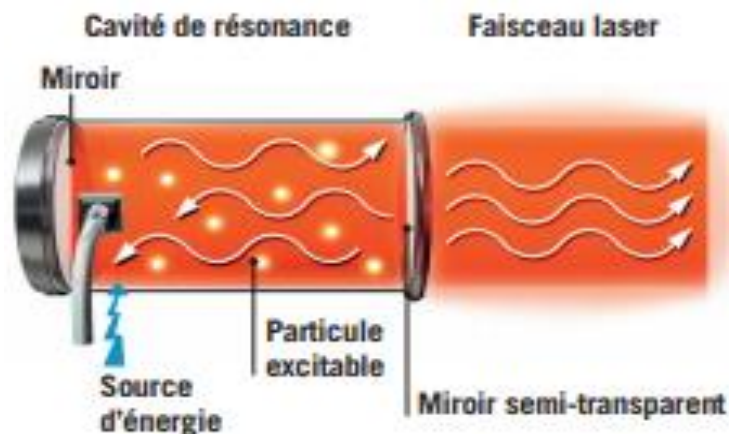


Figure II. 8 : Oscillateur laser

### II.3.1.3 Déférence entre la diode DL et la diode LED

Le tableau II. 2 ci dessous nous montre la déférence en valeur entre les diodes DL et DEL [9]

	Diode DEL	Diode DL
<b>Puissance</b>	0.1 mW	1 mW
<b>Puissance dans la fibre optique</b>	0.01 mW	0.5 mW
<b>Largeur du spectre</b>	50 à 200 nm	1 nm
<b>Rapidité de modulation</b>	100 MHz	10 GHz
<b>Durée de vie</b>	100 ans	10 ans
<b>Refroidissement</b>	Non	Oui

Tableau II. 2 : Comparaison entre les diodes (DEL et DL)

### II.3.2 Modulation

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation, qui est une fonction essentielle de tout système de transmission. Pour réaliser la modulation d'émission. [6]

#### II.3.2.1 Modulation par la technique du 'OOK' (On-Off-Keying)

Dans cette technique, on utilise un obturateur rapide qui agit sur le faisceau LASER. Quand l'obturateur s'ouvre, il permet à la lumière de passer à travers la fibre ; quand il est fermé, la lumière est bloquée. L'obturateur optique affecte la puissance optique du faisceau LASER. [2]

#### II.3.2.2 modulations directes

Dans la modulation directe (Figure II. 9), on modifie le courant dans la diode laser (DL) ou dans la diode électroluminescente (DEL), tandis que pour la modulation externe, il faut un dispositif séparé appelé modulateur externe.

La modulation directe offre l'avantage d'être simple et peu coûteuse, en plus elle nécessite une tension réduite (la tension appliquée n'est que de 2 à 3 Volts) et une puissance faible. Cependant, elle présente des inconvénients liés aux oscillations de relaxation, chirp, bruit, ... En effet, la modulation d'intensité s'accompagne d'une modulation parasite de fréquence optique (ou de longueur d'onde) désignée sous le nom de « chirp ». [3]

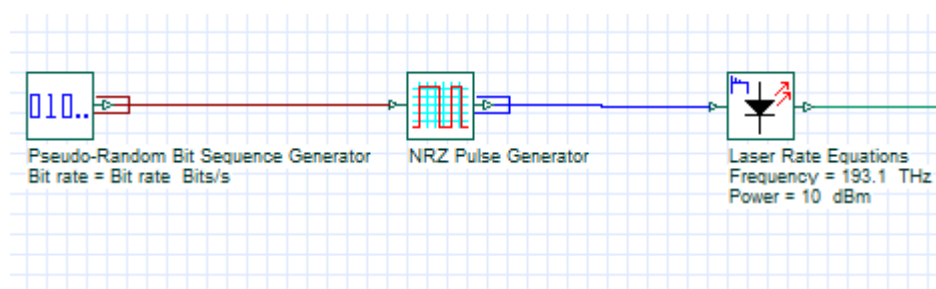


Figure II. 9 : Synoptique de la modulation directe

#### a) modulateurs en phase (PM)

Les modulateurs directs en phase consistent simplement en une cellule électro-optique comme celles présentes sur les bras du MZM. Un déphasage proportionnel à la tension appliquée au modulateur est alors induit. [17]

### II.3.2.3 modulations externe

Dans le cas de la modulation externe (Figure II. 10), divers types de modulation sont possibles : modulation d'amplitude, de phase, de polarisation, d'impulsion.

Ce type de modulation permet d'obtenir de très grands débits. Avant de décrire la modulation, examinons quelques particularités et/ou caractéristiques des différentes modulations.

Comme la sortie d'un laser à semi-conducteurs (dans notre cas laser DFB, Distributed Feed Back) possède une longueur d'onde qui varie dans le temps à cause de la variation dans le temps du bruit et de la température, la modulation de fréquence et la modulation de phase sont assez difficiles à expliquer à cause de la non-cohérence de la lumière laser utilisée dans la communication optique. On peut, à coup sûr, utiliser en pratique les modulations d'amplitude et d'impulsion. [3]

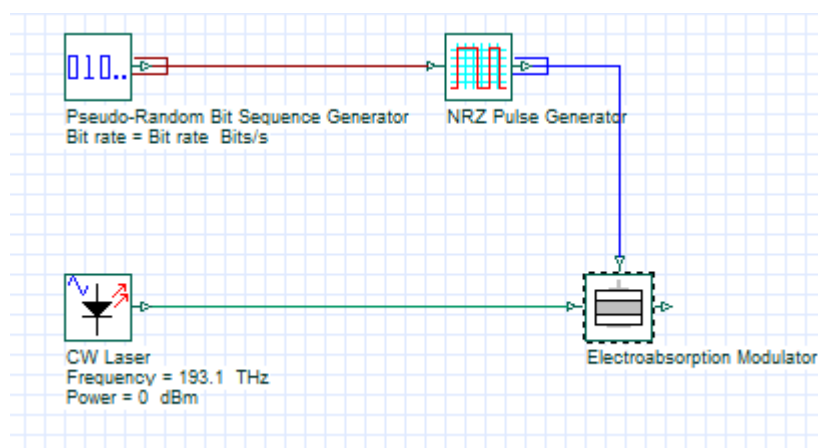
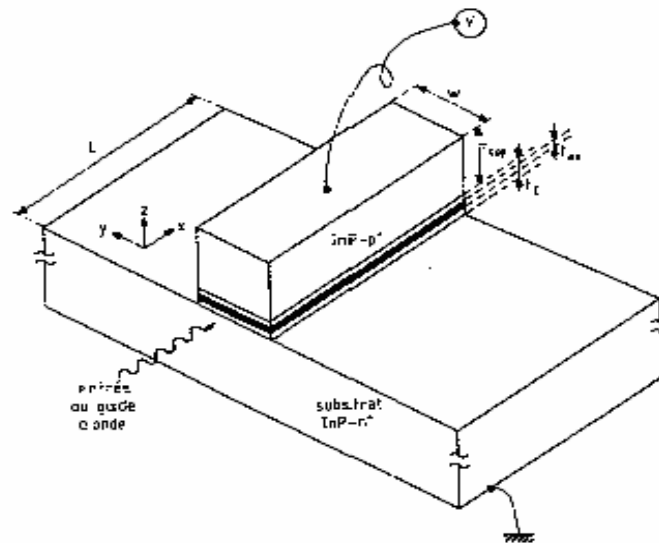


Figure II. 10 : Synoptique de la modulation externe

#### a) Modulateur électro-absorbant (MEA)

Le principe de fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur soumis à un champ

électrique. Leur particularité intéressante est qu'ils peuvent être facilement intégrés avec les diodes lasers pour créer des sources optiques compactes et à très large bande de modulation. (Figure II. 11) [14]



**Figure II. 11 :** Structure d'un guide d'onde contenant un matériau électro-absorbant

#### b) Modulateur de Mach-Zehnder (MZM)

Ce modulateur a deux entrées (voire Figure II. 12), une entrée électrique et une autre optique. Ce dispositif produit des changements temporels dans l'amplitude et la phase du signal optique.

Le modulateur MZM est caractérisé par sa fonction de transfert en amplitude décrite, par l'équation

$$E_s = E_e \cos\left[\pi\left(\frac{V_1 - V_2}{2V_\pi}\right) e^{-i\left(\pi\frac{V_1 + V_2}{2V_\pi}\right)}\right]$$

II. 4

Avec :

$E_e$  : est le champ électrique du signal optique d'entrée, continu car provenant directement de la source laser.

$E_s$  : est le champ électrique du signal de sortie.

$V_1$  et  $V_2$  : sont les tensions de commande des cellules électro-optiques.

$V_\pi$  : est la tension appliquée afin d'obtenir un déphasage de  $\pi$  entre les deux bras du modulateur. [18]

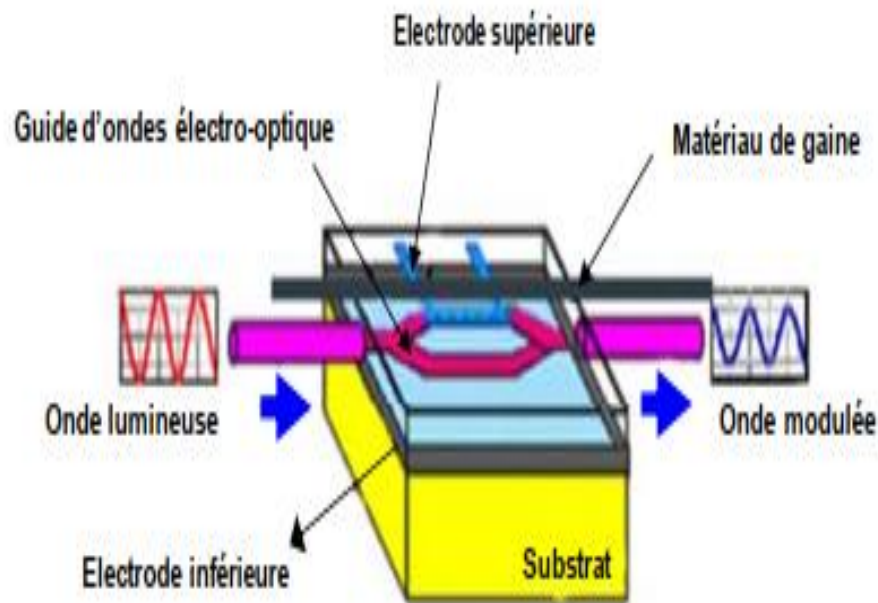


Figure II. 12 : Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder

### c) Comparaison entre modulateur MEA et modulateur MZM

Le tableau II. 3 ci dessous nous montre la différence en valeur entre les diodes DL et DEL

	modulateur MZM	modulateur MEA
<b>Tension de commande (V)</b>	>3	2 à 3
<b>Puissance optique incidente (mW)</b>	Quelques centaines	Quelques dizaines
<b>Pertes d'insertion (dB)</b>	4 à 6	10 à 13
<b>Bande passante (GHz)</b>	$\geq 13$	50
<b>Taux d'extinction (dB)</b>	20 à 40	10 à 20
<b>Débit (Gb/s)</b>	Elevé ( $\geq 5$ )	Elevé ( $\geq 5$ )
<b>Coût (Keuros)</b>	10	-
<b>Longueur d'onde (nm)</b>	1500	1550

Tableau II. 3 : Différence en valeur entre les diodes DL et DEL

#### II.3.2.4 Comparaison entre modulation directe et modulation externe

La modulation directe, plus simple et moins coûteuse est encore très utilisée si les données sont transmises à un débit de quelques Gbits/s, selon la qualité du laser. Mais au-delà de 5 Gbits/s, la modulation externe est indispensable pour maintenir une qualité correcte.

---

Cependant, les modulateurs ne sont pas parfaits et peuvent engendrer des défauts mais leur impact est moins important.[6]

### II.3.3.5 Format de Modulation

Les systèmes de transmission par fibre optique sont conçus pour faire propager une séquence de données binaires « 1 » et « 0 » par voie optique. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, cette séquence est d'abord sous la forme d'un signal électrique.

La forme de ce dernier, en termes d'amplitude et de phase, est appelée format de modulation. Le format de modulation le plus simple est le format OOK (On/Off Keying), et il repose sur le principe d'une modulation de l'amplitude du signal électrique. Ainsi, un minimum d'amplitude correspond au bit « 0 », et un maximum d'amplitude correspond à un bit « 1 ».

Pour une séquence temporelle donnée, et donc une succession de bits, il existe deux manières de moduler les impulsions d'un format de modulation donné: la technique de retour à zéro (RZ, Return-to-Zéro), et la technique de non-retour à zéro (NRZ, Non-Return-to-Zéro).[9]

#### a) Format RZ (Return-to-Zero)

Le format RZ (Figure II. 13) est le format le plus robuste vis à vis des effets non linéaires et de la dispersion de mode de polarisation (PMD pour Polarization Mode Dispersion). De plus, ce format est propice au multiplexage temporel, comme nous le verrons dans la suite de ce paragraphe. Ainsi, le format RZ apparaît comme le format de modulation de type ASK le mieux adapté aux transmissions haut débit.

Un signal codé au format RZ est formé d'impulsions correspondant aux symboles '1' et d'absence d'impulsion pour les symboles '0'. Ainsi, deux '1' successifs seront codés par l'enchaînement de deux impulsions. Il y a donc, contrairement au format NRZ, un « retour au niveau zéro » entre deux '1' successifs. [18]

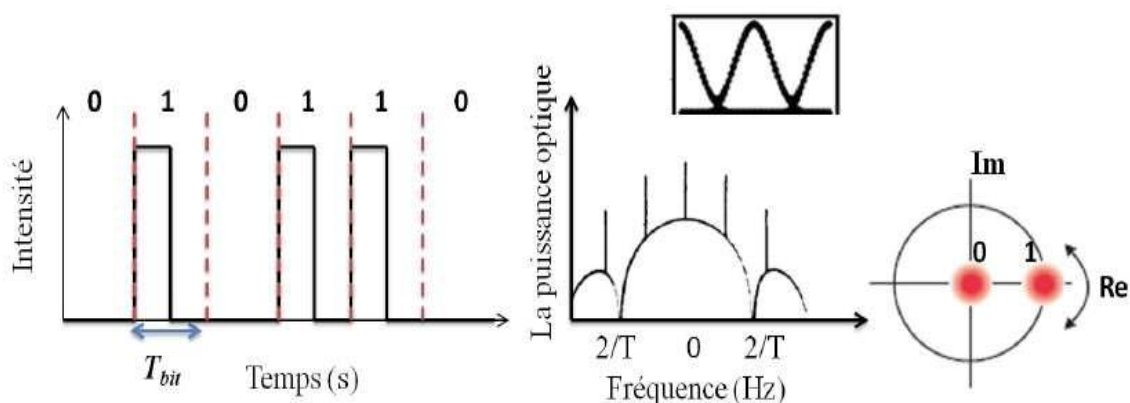


Figure II. 13 : Format de modulation de type RZ-OOK

### b) Format NRZ (Non Return-to-Zero)

Le format NRZ est celui le plus utilisé dans les réseaux de télécommunications actuels. Il est donc intéressant d'étudier en laboratoire des fonctions compatibles avec ce format.

Comme pour tout format d'amplitude, un symbole '1' correspond à la présence de lumière et un symbole '0' à son absence. Plus précisément dans le cas du format NRZ, à chaque bit correspond un niveau continu. Ainsi, lorsque deux (ou plus) symboles identiques se suivent, le signal reste au même niveau continu.

Il n'y a donc pas de retour à zéro entre deux '1' successifs. La différence entre un minimum et un maximum d'intensité du signal est appelée taux d'extinction (ER, Extinction Ratio). Il s'exprime de la façon suivante

$$\mathbf{ER} = \frac{P_1}{P_0} \quad \text{ou} \quad \mathbf{ER}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \quad \text{II. 5}$$

$P_0$  et  $P_1$  sont respectivement les puissances moyennes du niveau 0 et du niveau 1. En pratique, pour un minimum d'intensité, l'absence totale du signal optique n'existe pas car le taux d'extinction d'un signal n'est jamais infini.[18]

La figure II.14 montre le schéma de principe du format de modulation de type NRZOOK, mettant en évidence la trace temporelle, la densité spectrale de puissance et le diagramme de l'œil, ainsi que la constellation [20]



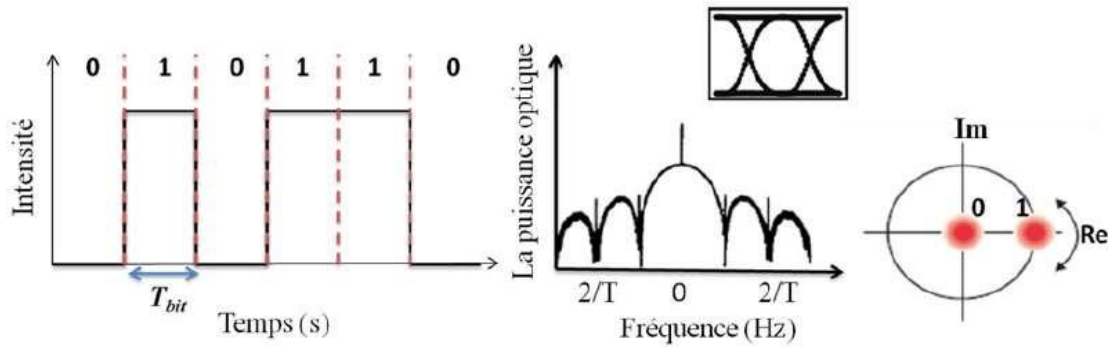


Figure II. 14: Format de modulation de type NRZ-OOK

Formats de modulation	Variations	Débit Gbit/s	Principales caractéristiques
<b>NRZ</b>	Amplitude variable Phase constante Polarisation constante	2,5/10/40	Format de modulation le plus simple à implanter avec un bon rapport performance/complexité
<b>RZ</b>	Amplitude variable Phase constante Polarisation constante	10/40	Résistance accrue à la plus part de la source de distorsion lors de la transmission

Tableau II. 4 : Formats de modulation de transmission

### II.3.3 Multiplexage

La notion de multiplexage s'explique par le fait de vouloir transmettre plus d'information sur un seul support de transmission. A l'aide de ce principe, de larges économies sont possibles grâce à la réduction des coûts d'installation et / ou d'exploitation.

Plusieurs techniques de multiplexage sont possibles, à savoir le multiplexage en temps (TDM), le multiplexage en longueur d'onde, le multiplexage mode spatial (SDM) et le multiplexage par répartition de code (CDMA).[21]

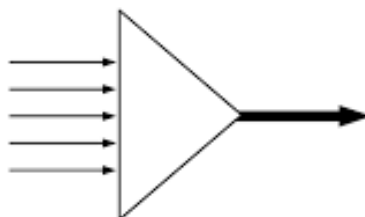


Figure II. 15 : Schéma d'un multiplexeur

### II.3.3.1 Multiplexages temporels la TDMA

Le TDMA consiste à partager les ressources de la fibre optique en les allouant de façon temporaire à chaque utilisateur (Figure II. 16).

Les utilisateurs ne peuvent pas accéder aux ressources simultanément, mais uniquement durant les intervalles temporels définissant le canal qui leur est alloué. A la réception, un démultiplexage temporel est effectué permettant de récupérer les données de chaque utilisateur suivant les intervalles temporels du canal correspondant.[5]

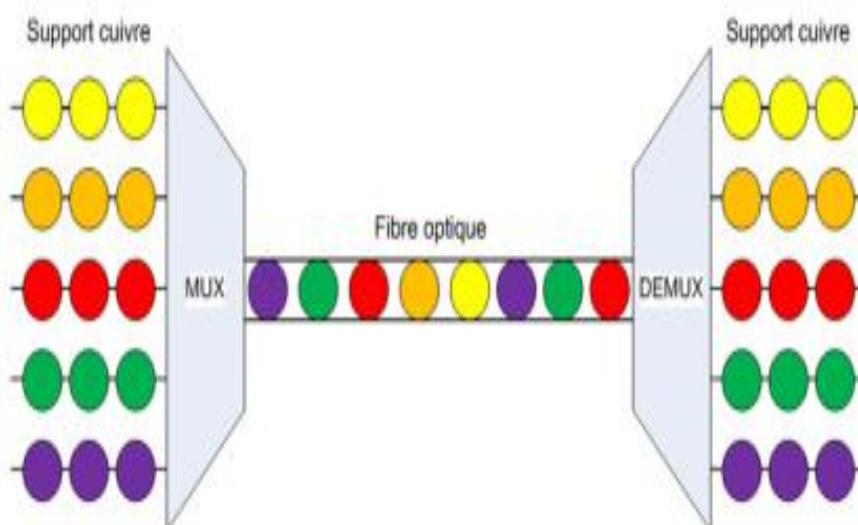
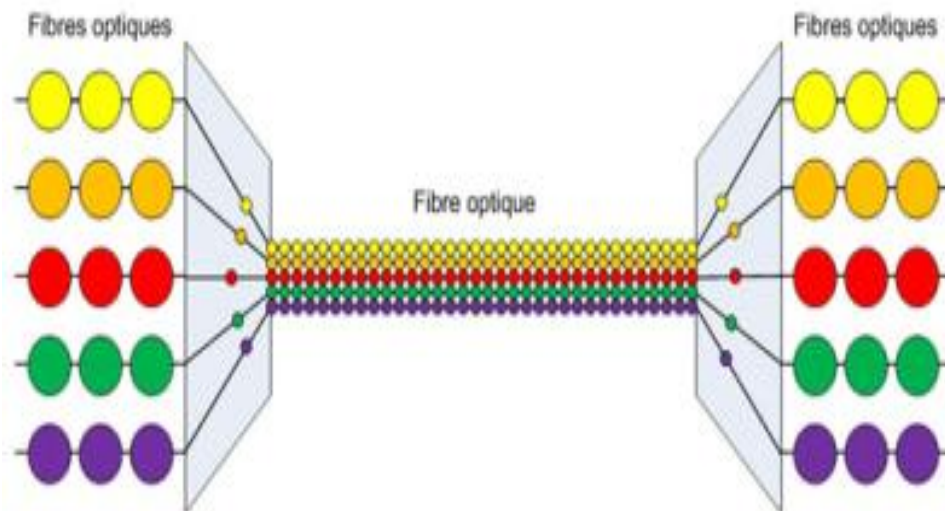


Figure II. 16 : Schéma du découpage en temps TDMA

### II.3.3.2 Multiplexages en longueur d'onde WDM

Le multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing) (Figure II. 17) a permis une augmentation significative de la capacité des systèmes de

transmission optique. Le principe du multiplexage en longueur d'onde consiste à moduler en parallèle plusieurs sources laser émettant à différentes longueurs d'onde plus ou moins rapprochées, et à les faire propager simultanément dans la fibre optique.[17]



**Figure II. 17 :** Schéma de découpage en longueur d'onde WDM

### II.3.3.3 Multiplexages mode spatial SDM

Le multiplexage spatial ou SDM (Space Division Multiplexing) consiste à multiplexer plusieurs fibres dans un même câble ou à utiliser des fibres à multi-cœurs pour la propagation des signaux optiques.

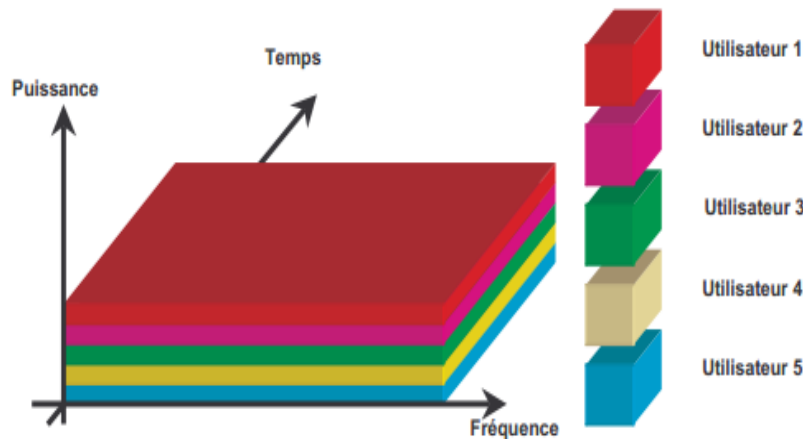
Le SDM s'illustre comme la technologie de rupture pour dépasser ces limites et réaliser les réseaux optiques de demain. En utilisant plusieurs formes de lumière simultanément dans une fibre optique multimode comme autant de canaux indépendants, le multiplexage spatial permet d'augmenter la capacité dans les fibres optiques.

Mais générer et multiplexer de nombreuses formes de lumières reste complexe. Les multiplexeurs actuels sont fortement limités en nombre de modes, induisent des pertes importantes, ce qui rend le traitement du signal reçu beaucoup plus complexe [21]

### II.3.3.4 Multiplexage par répartition de codes CDMA

L'étalement du spectre occupé par un message sur un support de transmission donné, permet une plus grande tolérance en termes de bruit. Le bruit peut être (et est essentiellement)

constitué des messages des autres utilisateurs. Pour que le récepteur reconnaisse le message qui lui est destiné, l'étalement est produit par une séquence déterminée : le code, connu de l'émetteur et du récepteur. Les codes sont en général choisis de façon à être dotés des propriétés statistiques d'une séquence aléatoire mais les propriétés ne sont pas toutes nécessaires. (voire Figure II. 18) [14]



**Figure II. 18 :** Accès multiples par répartition en code

## II.4 Composant de la ligne de transmission

### II.4.1 Amplificateur

#### II.4.1.1 EDFA

Dans un amplificateur à fibre, le milieu amplificateur est le cœur d'une fibre optique monomode dopée avec des ions de terre rare. Pour rendre la fibre amplificatrice, il faut ajouter un pompage.

Le signal à amplifier est injecté dans la fibre dopée par le biais d'un coupleur sélectif en longueur d'onde. Simultanément, le flux lumineux provenant d'une diode laser de pompe est couplé au signal injecté. Le laser pompe opère à 980 nm ou à 1480 nm et le coupleur multiplexeur à 980 nm/1550 nm ou 1480 nm/1550 nm.

Pour prévenir les réflexions dans l'amplificateur et empêcher la contre propagation du bruit généré à l'intérieur de l'amplificateur par émission spontanée, on installe des isolateurs à l'entrée et à la sortie de l'amplificateur.[14]

### II.4.1.2 RAMAN

Les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de transmissions optiques longues et très longues distances, ce qui en fait d'eux les premiers dispositifs optiques non linéaires largement commercialisés dans le marché des télécommunications.

L'amplificateur Raman utilise la fibre de transmission elle-même comme un milieu d'amplification. L'amplificateur Raman est basé sur le principe de la diffusion Raman qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un phonon [5]

### II 4.1.3 Amplificateurs à semi-conducteur (SOA)

Un SOA est un dispositif optoélectronique qui peut, dans des conditions d'exploitation appropriées, amplifier un signal lumineux incident. Les travaux sur les amplificateurs à semi conducteur ont commencé à partir du moment où les lasers à semi conducteur fonctionnaient en continu avec une fiabilité acceptable. Leur structure de base est peu différente de celle d'une diode laser. Contrairement aux lasers à semi conducteur ; il n y a pas de miroir aux extrémités mais un revêtement anti-reflets est déposé sur les faces afin de minimiser les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit. Ce dispositif d'amplification est de petite taille et a l'avantage que le pompage est électrique. [5]

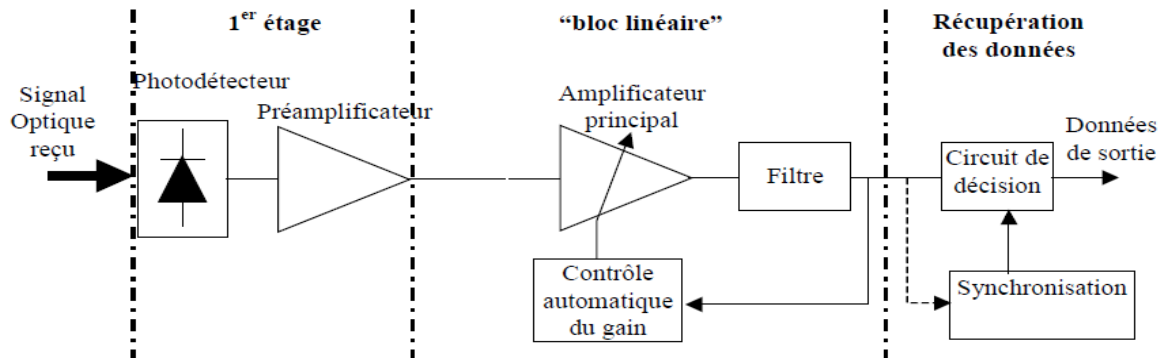
## II.5 Composant de réception

De même que pour les modules d'émission, les modules de réception ont connu des avancées technologiques importantes.

Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique (la réception est basée sur la technique de détection directe).

Ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels. On y trouve trois parties indiquées sur la Figure II.19.

Nous détaillerons le rôle de chaque partie dans les paragraphes suivants. [3]



**Figure II. 19** : Schéma d'un récepteur de données à détection directe

- le bloc de "premier étage" composé du photo-détecteur. Il peut être accompagné d'un pré-amplificateur, qui a pour but de rendre le photo-courant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photo-détecteur.
- le bloc "linéaire", composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre, réducteur de bruit.
- le bloc "récupération des données", correspondant au dernier étage du récepteur. On y trouve un circuit de décision et un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation [22]

## II.5.1 Bloc de premier étage

### II.5.1.1 Photo-détecteur

La photo détectrice est un composant essentiel dans les communications par fibres optiques. Son rôle est de traduire le signal optique envoyé par la fibre optique en signal électrique, qui sera traité par des dispositifs électroniques. Dans notre étude nous allons parler des photos détecteurs, les plus utilisés dans les systèmes de transmission par fibre optique qui sont les photodiodes PIN ou APD. [23]

#### II.5.1.1.1 Principe de la photo détection

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la

---

bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou.

Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher les électrons de retomber dans son état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés. [4]

#### II.5.1.1.1.2 Photodiodes PIN

Pour effectuer la photodétection, en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il faut que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN, encore appelée zone déplétée. Cette dernière doit être large pour permettre un bon rendement quantique, d'où l'intérêt de la photodiode PIN (Figure II.20), où une région intrinsèque est intercalée entre les régions de type P et de type N.

La majorité des photons est absorbée dans la zone intrinsèque, lorsque la photodiode est polarisée en inverse, où règne un champ électrique qui sépare les porteurs.

La zone traversée par la lumière (P ou N) doit être de faible épaisseur, et recouverte d'une couche antireflet qui améliore le rendement quantique externe, et qui protège le matériau.[12]

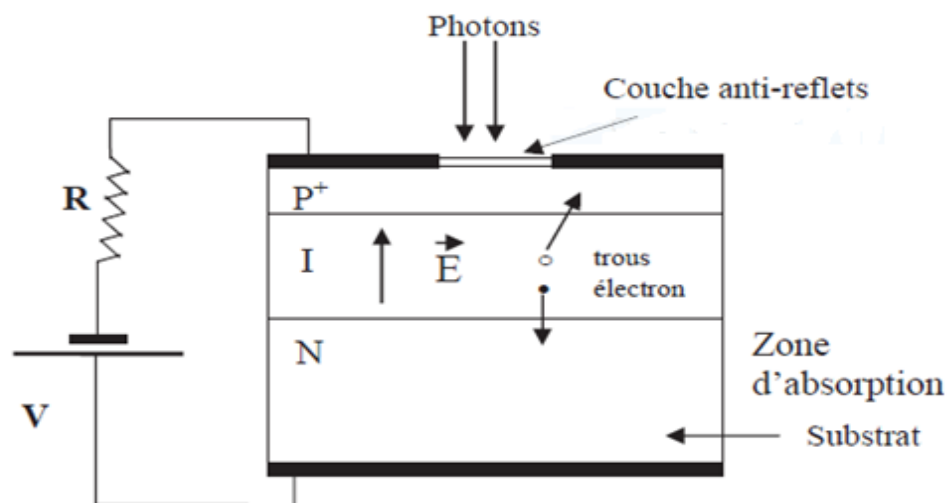


Figure II. 20 : Structure d'une photodiode PIN

#### II.5.1.1.3 Photodiodes APD

Lorsque la puissance lumineuse reçue est très faible, les courants détectés sont peu élevés et se superposent au courant d'obscurité, conduisant à un mauvais rapport signal sur bruit. Pour augmenter ce dernier, il est nécessaire que le courant détecté soit plus important en utilisant d'autres types de photodiode, comme les photodiodes à gain interne de type avalanchent.

La photodiode d'avalanche est une diode PIN dans laquelle est réalisée une amplification de puissance, cela permet d'extraire un signal électrique fort même pour une puissance lumineuse affaiblie.

Les photodiodes à avalanche sont aussi utilisées grâce à leurs performances, leur gain important et leur réponse rapide mais elles sont plus coûteuses, difficiles à utiliser et nécessitant une polarisation inverse très forte. Une structure d'une photodiode APD est présentée dans la Figure II. 21 [23]



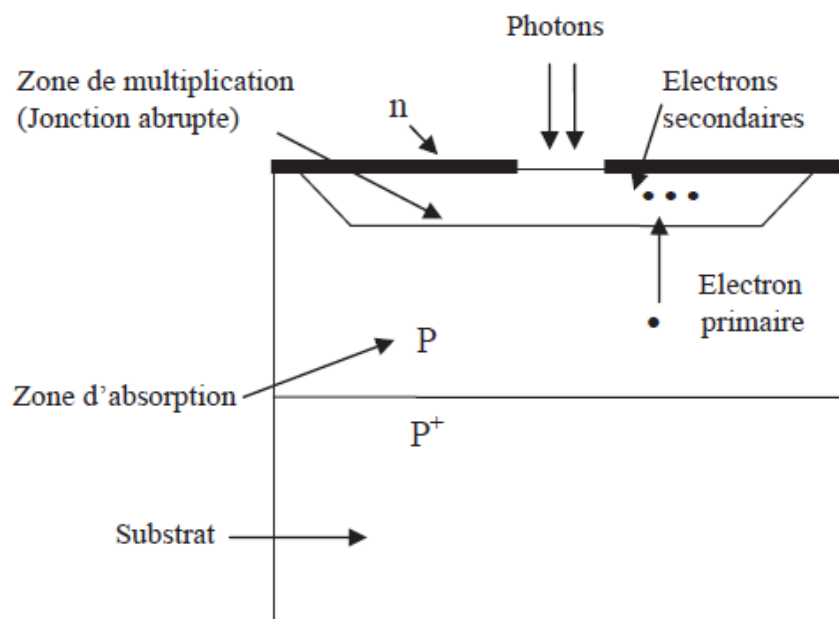


Figure II. 21 : Structure d'une photodiode APD

#### II.5.1.1.4 Comparaison entre des photodiodes PIN et APD

Le choix du détecteur est particulièrement déterminé par le rapport signal à bruit ( $S/B$ ) qui est défini par le rapport du photocourant engendré par la puissance du signal optique sur le courant de bruit du photodétecteur plus le courant de bruit de l'amplificateur.

Pour de faibles niveaux, le rapport  $S/B$  est meilleur avec une photodiode à avalanche alors que pour des niveaux plus forts, il vaut mieux utiliser une photodiode PIN. (Tableau II. 5) [3]

Caractéristiques	PIN	APD
Tension de commande (V)	Faible	Elevé
Fréquence de coupure (GHz)	>60	Quelque
Rendement quantique (%)	Faible	Elevé
Bande passante (GHz)	Large	Faible
Longueur d'onde (nm)	1300 et 1550	1300 et 1550

Tableau II. 5 : Comparaison des caractéristiques des photodiodes PIN et APD



## II.5.2 Bloc linéaire

### II.5.2.1 Amplification électrique

L'amplification 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 opto-électronique et une amplification électrique sur chaque canal, donc  $N$  amplificateurs électriques.[4]

### II.5.2.2 Circuit de filtrage

Le signal en sortie de la photodiode PIN est généralement accompagné du bruit, afin de minimiser ce dernier un filtrage du signal numérique, est nécessaire dans une bande  $0 - \Delta F$  qui soit la plus petite possible, tout en ne créant pas d'ISI, c'est-à-dire telle que la réponse du filtre à un symbole s'annule à tous les instants de décision sur les symboles voisins. Selon le critère de Nyquist, on sait que le filtre passe-bas rectangulaire de largeur  $\Delta F = F_r / 2$  (avec  $F_r$  la fréquence rythme du signal) possède cette propriété, mais ce filtre théorique n'est pas réalisable.

De plus, le critère s'applique à des impulsions de Dirac, et non à des impulsions au format NRZ. On utilise donc le « filtre pratique de Nyquist » dont la largeur de bande de bruit, aux conditions habituelles, vaut approximativement  $\Delta F = 0.8 \cdot F_r$ . [8]

## II.5.3 Circuit de Décision

Une fois que le signal électrique soit récupéré, il nous faut reconstituer la séquence binaire envoyée dans la ligne. Pour ce faire, nous appliquons le bloc de décision.

Celui-ci est composé d'un circuit de récupération d'horloge, appelé aussi circuit de synchronisation (Figure II.22), et d'un détecteur de seuil. Par ailleurs, dans notre cas, la décision se fait au moyen du diagramme de l'œil, qui sera décrit dans le paragraphe suivant. La figure suivante illustre ainsi le principe de fonctionnement d'un bloc de décision [20]



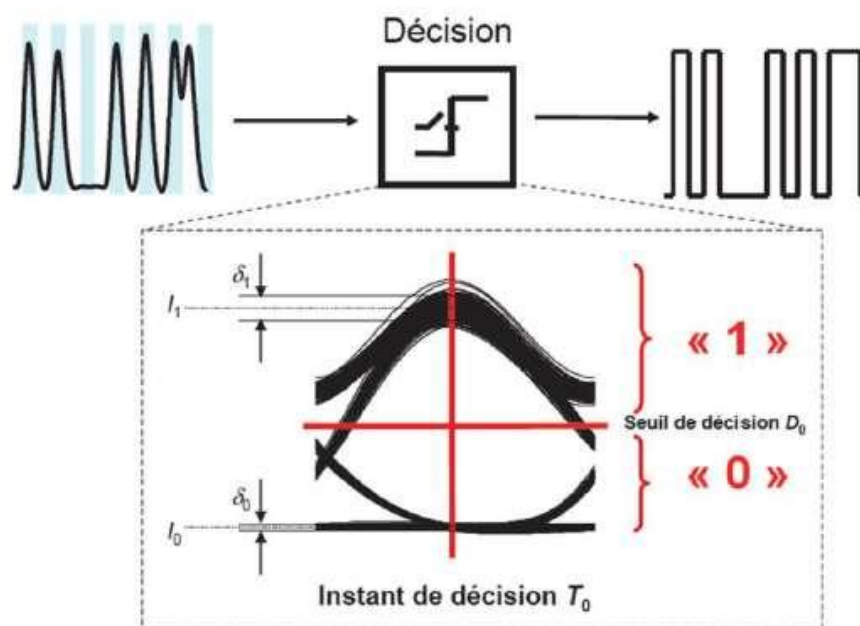


Figure II. 22 : Principe de la décision basé sur le diagramme de l'œil

## II.6 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la synthèse des systèmes de transmission par fibre optique. Une description détaillée de tous les composants présents dans un système de transmission sur fibre optique a été présenté.

# Chapitre III

## Etude des technique de Multiplexage

### III.1 Introduction

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 meilleur est de multiplier le débit par câble (sur une seule fibre), ce procédé est obtenu par la technologie WDM qui consiste en un multiplexage en longueur d'onde.

Cette partie vise à présenter une vue générale sur la technique de multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing).

### III.2 Multiplexage des signaux optiques

La fréquence de modulation maximale lors d'une modulation analogique, ou le débit binaire maximal lors d'une modulation numérique, constituent en général une fraction de la fréquence porteuse. À ce titre, la porteuse optique présente l'avantage d'être extrêmement élevée : aux longueurs d'ondes des télécommunications ( $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$  et surtout  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ ), la porteuse optique a une fréquence de l'ordre de quelques  $10^{14}$  Hz. Sur le principe, il est donc envisageable de transmettre des débits de données jusqu'à  $1000 \text{ Gbits.s}^{-1}$ .

Les circuits électroniques actuels (notamment de modulation des lasers ou modulateurs externes, ceux nécessaires au niveau de la réception) permettent actuellement un débit de  $40 \text{ Gbits.s}^{-1}$ .

Lorsque de tels débits ne sont pas nécessaires, par exemple pour la transmission de données téléphoniques à  $64 \text{ kbits.s}^{-1}$ , il est possible de profiter de ces possibilités en exploitant la technique du multiplexage temporel (TDM pour l'acronyme anglais Time Division Multiplexing) . Un débit de  $40 \text{ Gbits.s}^{-1}$  correspond ainsi à approximativement 600 000 conversations téléphoniques véhiculées par la même fibre véhiculant une unique longueur d'onde.

L'optique permet une autre forme de multiplexage, le multiplexage en longueur d'onde ou WDM (Wavelength Division Multiplexing). Partant du constat que dans le domaine des faibles puissances optiques, la propagation de la lumière est régie par des lois linéaires (équations de Maxwell dans lesquelles on néglige les termes non linéaires liés à la constitution de la fibre optique), il est apparu possible de faire se propager sur la même fibre non pas une longueur d'onde mais plusieurs. Ces signaux, à des longueurs d'onde différentes,

peuvent être cadencés à des débits binaires différents ou peuvent correspondre à des formats de codage différents, sans que cela ne pose aucun problème, dans la mesure où les signaux n'interagissent pas entre eux (ce qui n'est jamais tout à fait vrai).

En première approximation, le débit binaire global est ainsi multiplié par le nombre de canaux en longueurs d'onde (typiquement jusqu'à 160). Cette technique permet de dépasser les 1000 Gbits.s<sup>-1</sup> véhiculé par une unique fibre optique. De nombreux composants passifs d'optique intégrée ont été conçus pour rendre viable les communications par fibre basées sur le WDM : multiplexeurs/démultiplexeurs en longueur d'onde, filtres optiques, convertisseurs de longueurs d'onde, etc. [26]

### III.3 Principe de WDM

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

L'utilisation du multiplexage WDM nécessite un ensemble de diodes laser émettant à des longueurs d'ondes différentes mais assez proches, sans qu'il y ait de mélange entre eux au cours de la propagation. Ainsi un multiplexeur/démultiplexeur optiques pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans/de la fibre. La Figure III.1 représente un exemple d'une liaison utilisant le multiplexage WDM. La fibre optique transporte alors un débit numérique égal à  $N * Db$ . Cette dernière est souvent définie comme la capacité du système.[6]

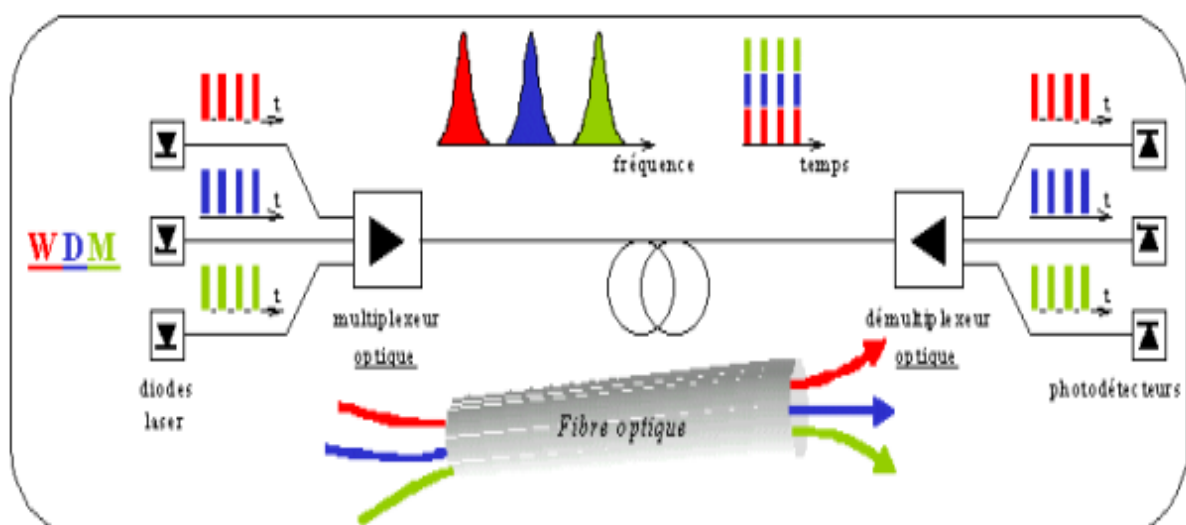


Figure III. 1 : Principe d'une liaison WDM

### III.4 Fonctionnement général de WDM

La technologie du WDM (Figure III.2) est représentée par deux terminaux et un lien optique monomode les reliant. Le premier est un multiplexeur, le second un démultiplexeur. Le multiplexeur a pour rôle de changer les longueurs d'ondes des signaux entrant et de les multiplexer sur un seul canal. Pour changer les longueurs d'ondes entrantes, il est nécessaire d'utiliser un transpondeur.

Lorsque des signaux arrivent au niveau du multiplexeur, il est possible qu'ils aient la même longueur d'onde, même si l'émetteur est différent. Étant donné qu'il n'est pas possible d'envoyer deux fois la même longueur d'ondes sur un même lien au risque d'erroné l'information des deux signaux, c'est le transpondeur qui va se charger la longueur d'onde d'un deux signaux. Ainsi, chaque flux entrant va être codé sur une porteuse par modulation d'amplitude ou de phase.

Ce qui permet donc de diffuser des signaux de sources différentes et ayant des longueurs d'ondes identiques sur un même canal. Arrivé au démultiplexeur, celui-ci va agir comme un ensemble de filtres, dans des zones de longueurs d'ondes données. Sachant que le démultiplexeur connaît les longueurs d'ondes circulant dans le lien optique. Il peut récupérer l'intégralité d'un signal qui avait été multiplexé. [27]

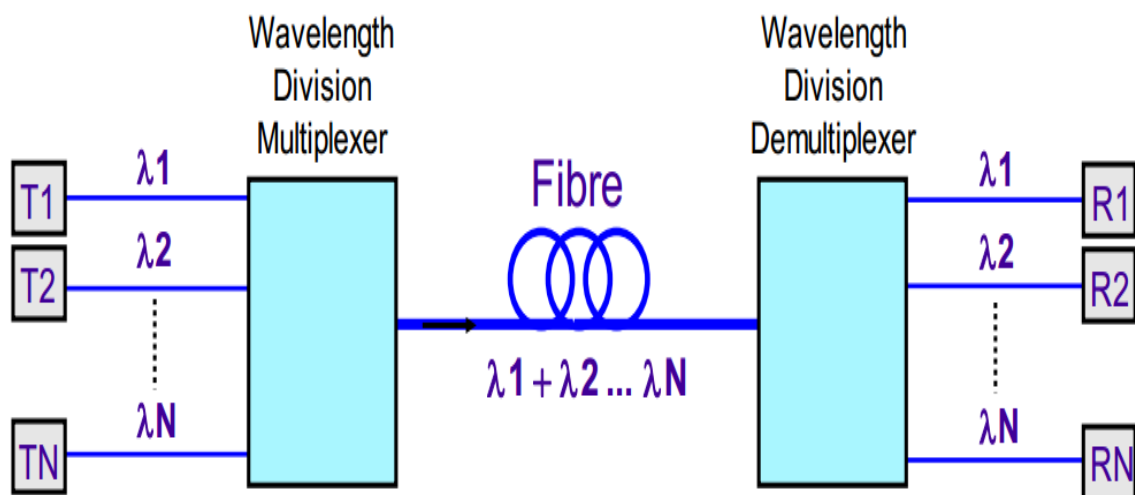


Figure III. 2 : Principes d'un system WDM

### III.5 Application de WDM

L'intérêt premier du WDM est de permettre le transport de débits d'informations très importants sur une même fibre, à destination de plusieurs utilisateurs. Les systèmes actuels autorisent 4, 8, 16,32 et même 64 canaux optiques différents.

Par exemple chacune pouvant supporter 2,5Gbits/s, on obtient alors des débits de 10, 40,80 et 160Gbits/s. Mais le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission WDM s'est fait lorsqu'il a été associé à l'amplification optique.

En effet, l'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA) a permis l'amplification simultanée de l'ensemble des N canaux d'un multiplex, sans distorsion du signal utile. Envoyer N canaux dans une fibre optique plutôt que N fibres devenait un avantage économique indiscutable. Si, il y a encore peu de temps, l'espacement entre canaux était de l'ordre de 1nm, le terme de DWDM est maintenant utilisé.

En effet, avec l'apparition, sur le marché, de lasers accordables de très bonne qualité, l'espacement entre les longueurs d'onde a pu être progressivement réduit, et est descendu à 0,8 nm ou 0,4nm. [6]

### III.6 Principales composantes d'un réseau WDM

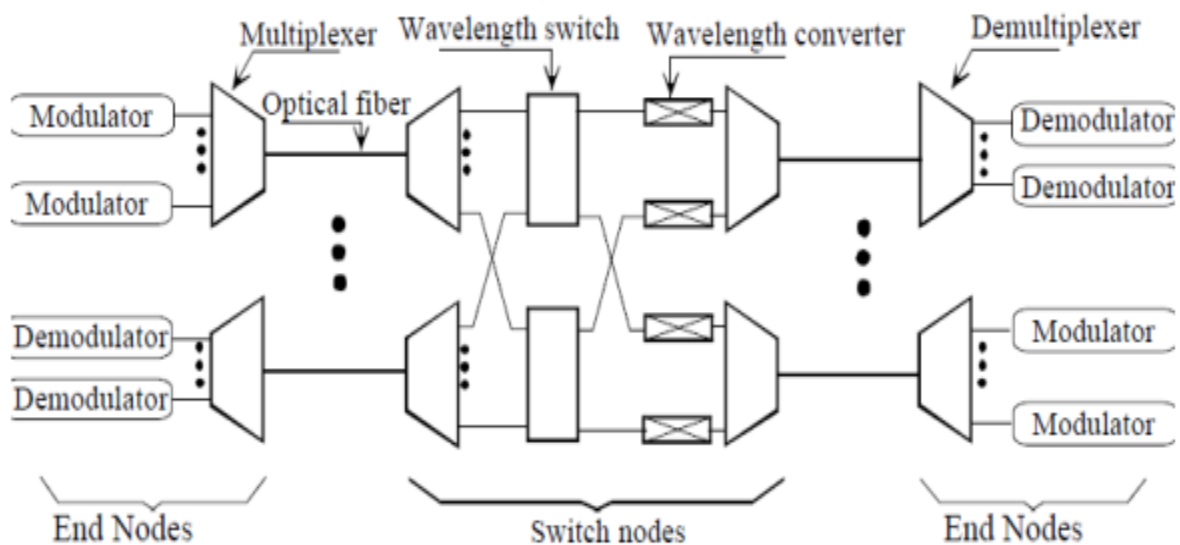
La Figure III.3 ci-dessous décrit l'architecture de base et le fonctionnement d'un réseau DWDM. Ce réseau se compose de nœuds d'extrémité, de nœuds de commutation et de liaisons par fibres optiques. Les nœuds d'extrémité consistent en modulateurs démodulateurs (ou modems) à chaque voie, ainsi qu'en multiplexeurs et démultiplexeurs servant respectivement au groupement et à la séparation des ondes lumineuses de fréquences différentes.

Les modulateurs convertissent les données numériques en ondes par modulation d'intensité ou d'amplitude, tandis que les démodulateurs reconvertissent les signaux optiques en données numériques. Les nœuds de commutation se composent de multiplexeurs et de démultiplexeurs à insertion-extraction, de commutateurs de longueur d'onde et de convertisseurs de longueur d'onde.



Les multiplexeurs servent à grouper les signaux de longueurs d'onde différentes à des fins de transmission alors que les démultiplexeurs séparent ces mêmes signaux à des fins de commutation. Le commutateur de longueur d'onde interconnecte les voies d'entrée aux voies de sortie voulues.

Les convertisseurs de longueur d'onde ont pour fonction de convertir, au sein d'une même fibre optique, les longueurs d'onde surexploitées en longueurs d'onde disponibles de manière à maximiser l'utilisation des voies. [12]



**Figure III. 3 :** Principales composantes d'un réseau WDM

### III.7 Les différentes technologies WDM

Il existe plusieurs technologies WDM à savoir la Broad WDM, Coarse WDM, Dense WDM et Ultra WDM. Elles restent identiques par leur principe mais se différencient uniquement par le nombre de canaux exploités dans une fibre.

La technologie WDM actuellement utilisée dans les réseaux de télécommunication se présente en deux technologies seulement : CWDM et DWDM. Des différents types de WDM existent selon les fenêtres qu'ils occupent par l'espacement entre canaux.

### III.7.1 Multiplexage DWDM (Dense WDM)

La technologie DWDM (Figure III.4) est adaptée pour le transport courte et longue distance de données. En outre, le système DWDM est parfaitement adapté dans le Metro ou longue distance où les demandes de capacité sont extrêmement élevées.

Cette grande capacité demande un résultat de l'agrégation des services reçus des clients multiples à la périphérie de l'entreprise, utilisent des lasers qui ont un débit pouvant aller jusqu'à 10 Gbps (OC-192/STM-64) et peuvent multiplexer jusqu'à 240 longueurs d'onde. Cela fournit un maximum de 2,4 Tbps sur une seule fibre optique.

De plus, les nouveaux systèmes DWDM seront en mesure de soutenir 40 Gbps avec un maximum de longueurs d'onde de 300 chaînes (Figure III.5), résultant en 12 Tbps de bande passante sur une seule fibre optique.

Les émetteurs-récepteurs optique des systèmes DWDM consomment plus d'énergie et dissiper la chaleur beaucoup plus que les émetteurs-récepteurs des systèmes CWDM. Cela crée une obligation pour le refroidissement des sous-systèmes de DWDM. [28]

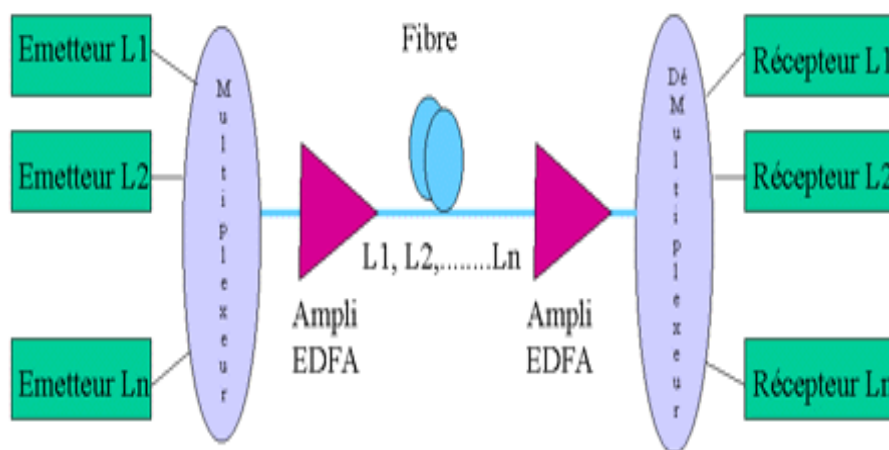
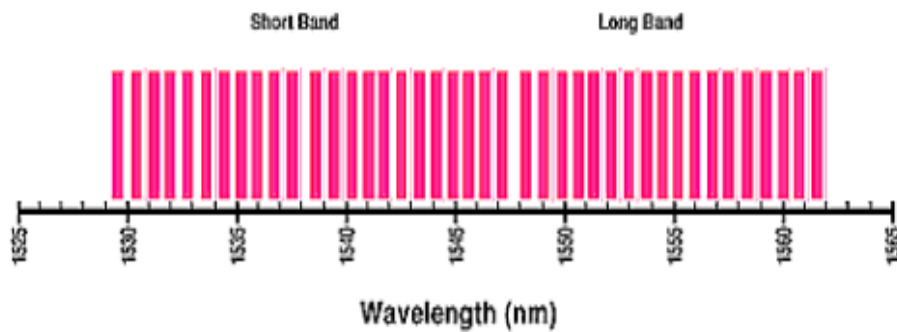


Figure III. 4 : Exemple d'un lien DWDM

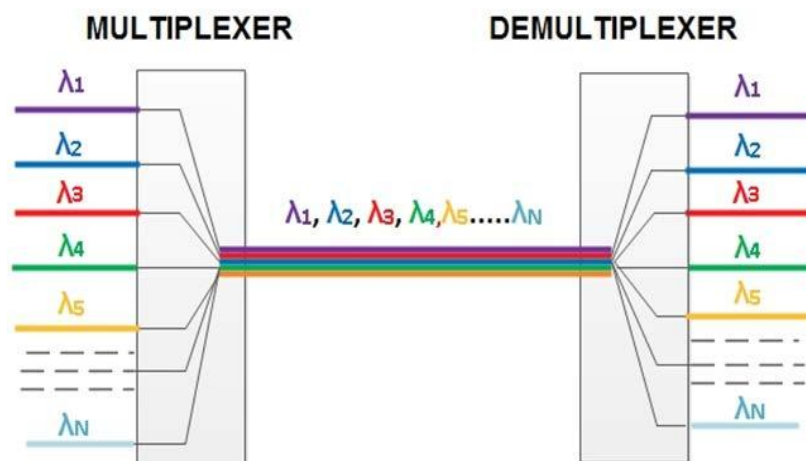


**Figure III. 5 :** Peigne des fréquences en DWDM

### III.7.2 Multiplexage U-DWDM (Ultra DWDM)

Les systèmes de communications optiques sans fil utilisent le multiplexage par répartition en longueur d'onde ultra-dense (UDWDM) (Figure III.6) est la meilleure solution pour fournir une transmission à haut débit avec un très faible taux d'erreur de bits (BER).

Ce type de multiplexage est le phénomène le plus récent pour l'avancement de la technologie, il s'agit d'une technologie qui peut transmettre plusieurs données simultanément sur la fibre unique avec un espacement des canaux très étroit, où l'espacement entre les canaux est de 0,4 nm et le nombre de canaux utilisables est égal à 100. [9]



**Figure III. 6 :** Technique de multiplexage Ultra DWDM

### III.7.3 Multiplexage CWDM

En effet, dans les équipements CWDM (Figure III.7), on peut utiliser des lasers non régulés en température, d'un coût moindre et qui émettent à des longueurs d'onde espacées de 20 nm dans la fenêtre de transmission 1270-1610 nm.

CWDM fait l'objet de la recommandation ITU-T G.695 qui prévoit des solutions souples et modulables, notamment la solution de 8 à 16 canaux optiques avec deux fibres (une pour chaque sens de transmission), offrant des débits de 1,25 Gb/s à 2,5 Gb/s par canal. Cependant, les systèmes CWDM n'étant pas compatibles avec les amplificateurs optiques, sont limités en portée.

Deux longueurs de liaison indicatives sont spécifiées dans la recommandation G.695 : jusqu'à 40 Km et jusqu'à environ 80 Km, ce qui est généralement suffisant pour les besoins des réseaux métropolitains. [29]

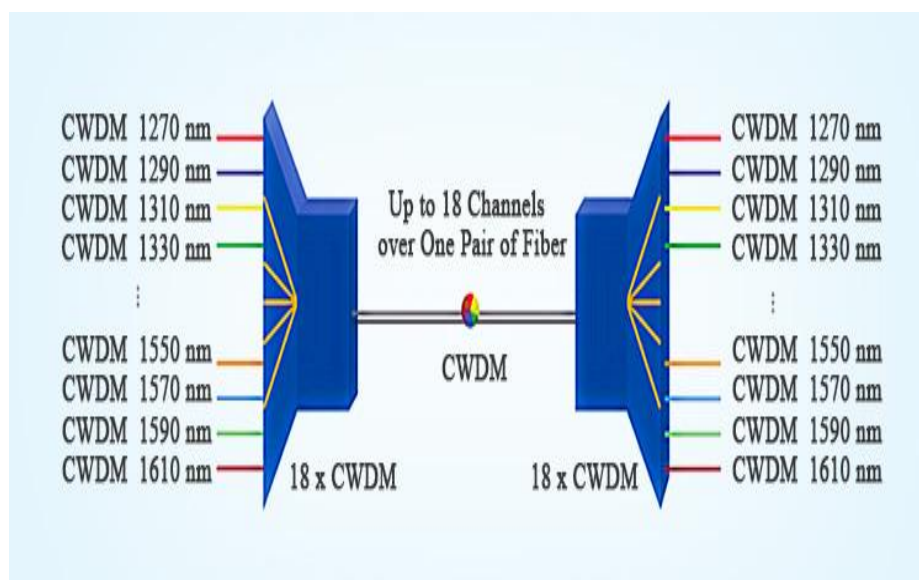


Figure III. 7 : Multiplexage CWDM

### III.7.4 Comparaison entre les techniques de multiplexage [9]

Le tableau III. 1 suivant résume la différence entre les systèmes de multiplexage WDM, CWDM, DWDM et UDWDM :

Type de multiplexage	Espacement inter canaux en (nm)	Nombre de canaux	Bande de signaux en (nm)
WDM	8	32	1530 - 1565
CWDM	20	8 - 18	1270 - 1610
DWDM	0.8	80 - 160	1525 - 1565
UDWDM	0.4	400	1675 - 1625

Tableau III. 1 : Comparaison entre les techniques de multiplexage

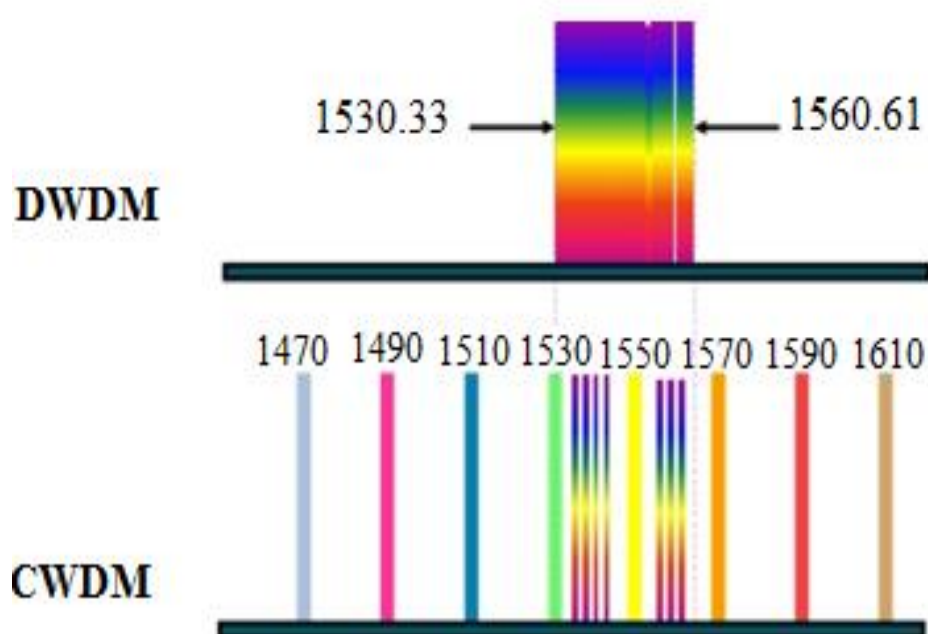
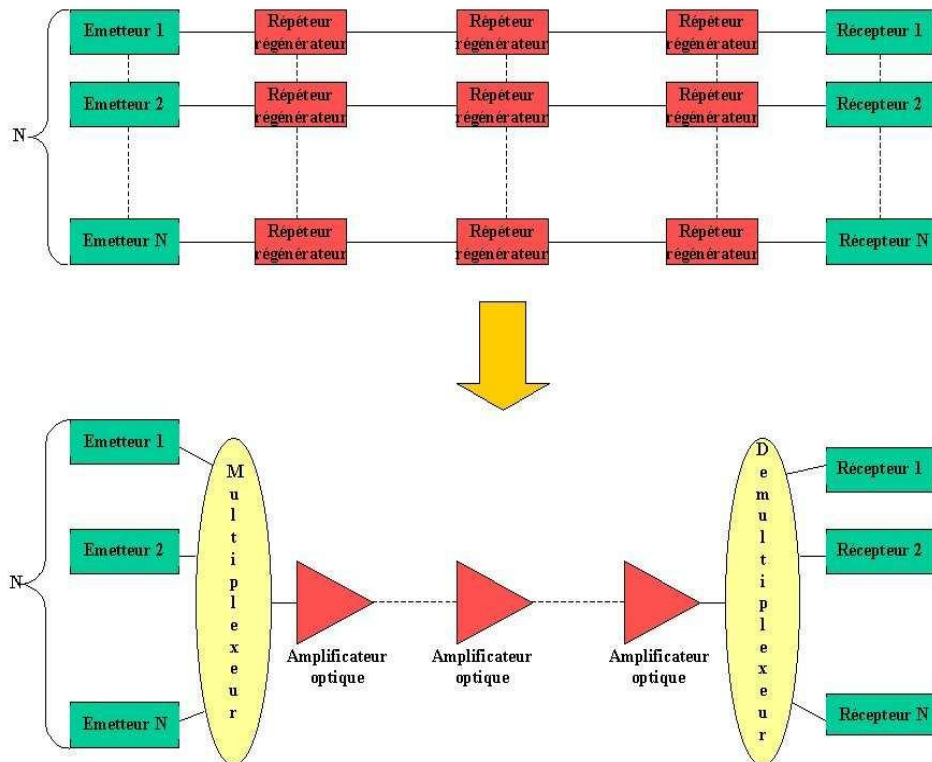


Figure III. 8 : Différence entre la bande des techniques multiplexages DWDM et CWDM

### III.8 Les systèmes WDM / DWDM

Les systèmes WDM / DWDM commercialisés aujourd'hui comportent de 4 à 80, voire 160 canaux optiques, ce qui permet d'atteindre des capacités de 10 à 200 voire 400 Gb/s en prenant un débit nominal de 2,5 Gb/s.

Des débits nominaux de 40 Gb/s ont été atteints et ont permis d'obtenir 3,2 Tb/s avec 80 canaux optiques multiplexés sur la bande C. En 2000, le réseau transatlantique FLAG ATLANTIC-1 est le premier réseau haut débit – longue distance avec une capacité de 1,28Tbit/s.



**Figure III. 9 :** Opportunité d'utilisation du multiplexage couplée à l'amplification optique

L'un des éléments primordiaux de la technique du multiplexage est l'amplificateur optique. Il en existe différents qui seront exposés plus loin. L'apparition de l'amplification optique fut le véritable point de départ du développement de la technologie WDM longue portée.

En effet, l'amplificateur procure un avantage économique décisif par son aptitude à amplifier l'ensemble des  $N$  longueurs d'ondes. De ce fait, un seul amplificateur se substitue aux  $N$  régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec le nombre de canaux et la longueur de la liaison comme le montre la figure III.9.

Les amplificateurs optiques peuvent être utilisés en tant qu'amplificateurs en ligne (répéteurs) mais aussi comme préamplificateurs afin d'améliorer la sensibilité des récepteurs ou postamplificateurs pour augmenter la puissance de sortie d'un émetteur. Ces amplificateurs fonctionnent dans la troisième fenêtre optique autour de 1550 nm, longueur d'onde du minimum d'atténuation de la fibre monomode standard SSMF (Standard Single Mode Fiber). [30]

#### **A. Avantages du DWDM:**

- Faible distorsion du signal et faible consommation d'énergie.
- Bande passante élevée (environ 50 Tbps).
- Extension plus facile du réseau.
  - Aucune nouvelle fibre nécessaire.
  - Ajoutez simplement une nouvelle longueur d'onde.
  - Le coût différentiel pour une nouvelle chaîne est faible.
  - Pas besoin de remplacer de nombreux composants tels que les amplificateurs optiques.
- Systèmes DWDM capables de portées plus longues.

#### **B. Inconvénients du DWDM:**

- Pas rentable pour les numéros de canal bas.
  - Coût fixe de mux / demux, transpondeur, autres composants du système.
- Introduit un autre élément, le domaine fréquentiel, dans la conception et la gestion du réseau.
- Les systèmes de gestion de réseau SONET / SDH ne sont pas bien équipés pour gérer le DWDM topologies.
- Développement de méthodologies de surveillance et de protection des performances DWDM.

### III.9 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les techniques de multiplexage en longueur d'onde (WDM), le multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing) a permis une augmentation significative de la capacité des systèmes de transmission optique.

Le principe du multiplexage en longueur d'onde consiste à moduler en parallèle plusieurs sources laser émettant à différentes longueurs d'onde plus ou moins rapprochées, et à les faire propager simultanément dans la fibre optique. Pour ce faire, les signaux optiques modulés sur chaque longueur d'onde porteuse sont multiplexés au moyen de dispositifs à matrice de fibre.



# Résultats et Discussions

## IV.1 Introduction

Ce chapitre consiste à présenter les résultats de simulation d'une liaison par fibre optique par la technique de multiplexage en longueur d'onde (DWDM). Cette transmission par fibre optique permet à 8 utilisateurs chacun a un débit de 5 Gb/s pouvant transmettre les informations sur une même fibre optique transportant ces informations de débit 40 Gb/s à l'aide du multiplexeur WDM sur une longue distance de l'ordre de 900 km. A l'aide du logiciel de simulation OPTISYSTEM nous allons donc voir le fonctionnement et les résultats de chaque bloc de cette liaison optique. L'analyse des résultats est effectuée à l'aide du facteur de qualité, diagramme de l'œil et le taux d'erreur binaire.

## IV.2 Présentation du logiciel OPTISYSTEM

La conception et l'analyse des systèmes de communications optique, comprennent des dispositifs non-linéaires et des sources de bruit non gaussiennes qui sont très complexes et couteuses en temps, il en résulte que ces tâches ne peuvent désormais être effectuées rapidement et efficacement qu'avec l'aide de nouveaux outils logiciel. [16]

Optisystem est un outil qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal, allant du dispositif le plus élémentaire, au système complet de communication. Optisystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur conviviale. [27]

La démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- Construire le schéma bloc.
- Analyser le schéma.

### IV.2.1 Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont [14]:

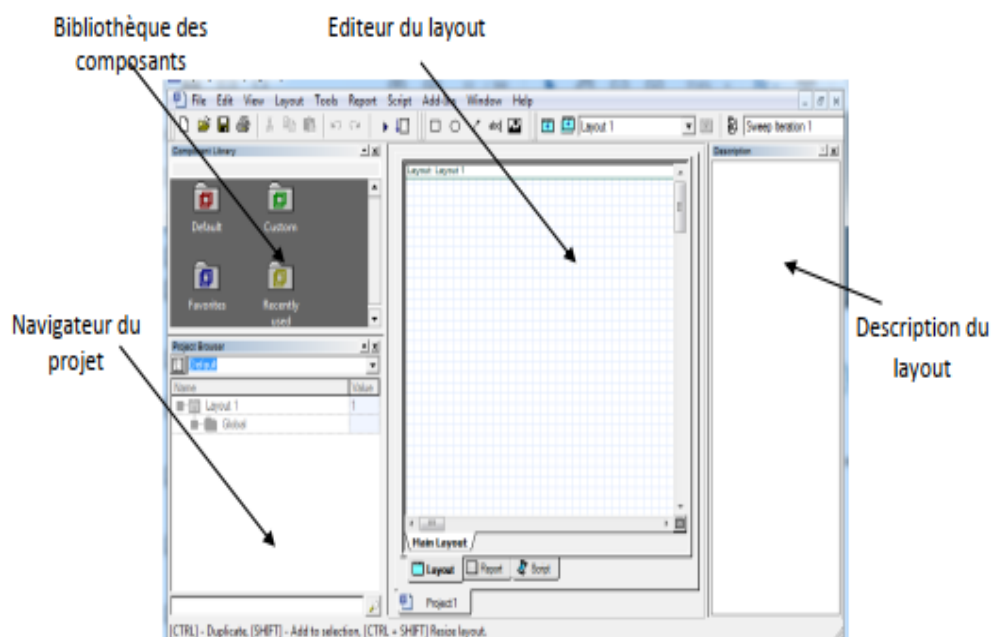
- Les composants virtuels de la bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.

- La bibliothèque de composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurées à partir de périphériques réels, ces composants s'intègrent aux équipements de test et de mesure des différents fournisseurs.
- Les outils de visualisation avancée produit le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des visualiseurs sur le moniteur au même port.

### IV.2.2 Interface de l'OptiSystem

L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale réparti en plusieurs parties [31] (voir figure IV.1) :

- Bibliothèque.
- Editeur du layout.
- Projet en cours.



**Figure IV. 1** :L'interface de travail sur optisystem

- **Bibliothèque**

La bibliothèque est une base de donnée qui contient tout type de modèles qui permettent de réaliser les différents schémas blocs, comme les entrées, régénérateurs, codeurs, modulateur, filtres,...etc. (voir figure IV.2)

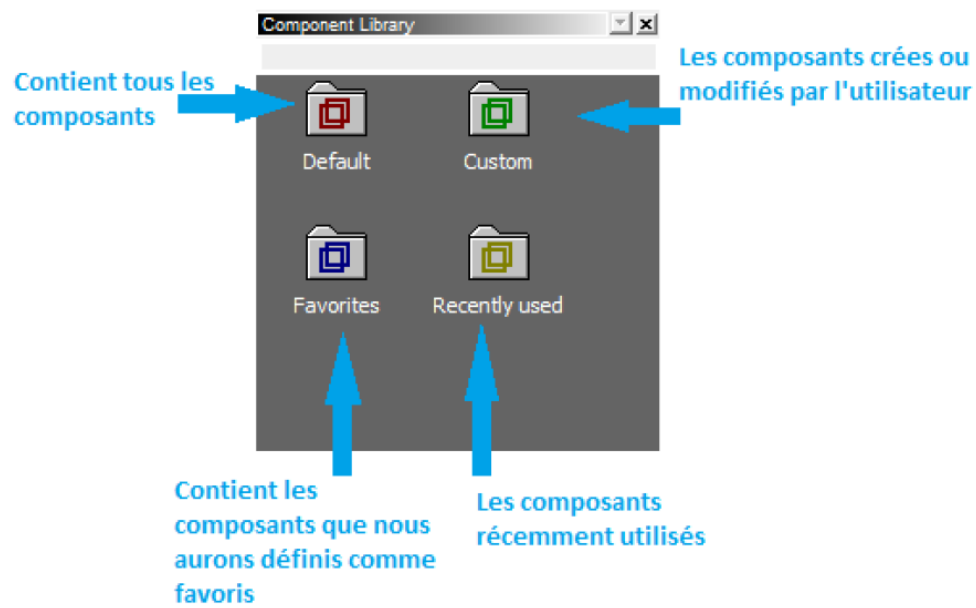


Figure IV. 2 : La bibliothèque du logiciel optisystem

- **Navigateur du Projet (Projet en cours)**

Cette fenêtre contient tous les composants utilisés lors du projet afin de pouvoir accéder plus rapidement aux différents composants, particulièrement dans le cas d'un projet complexe qui contient un nombre important de composants. (voir figure IV.3)

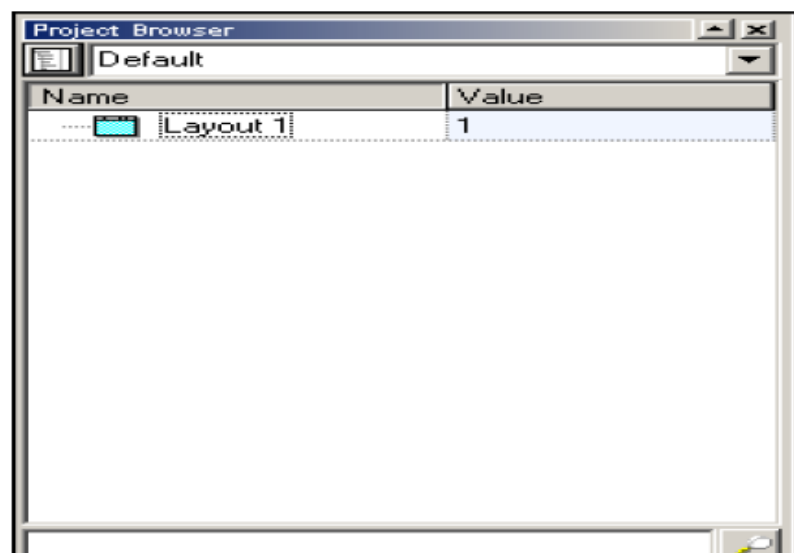
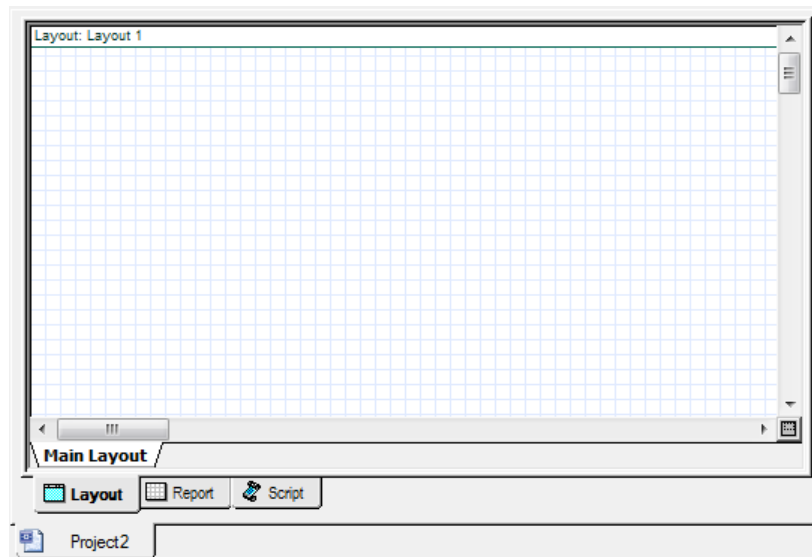


Figure IV. 3: Navigateur du projet

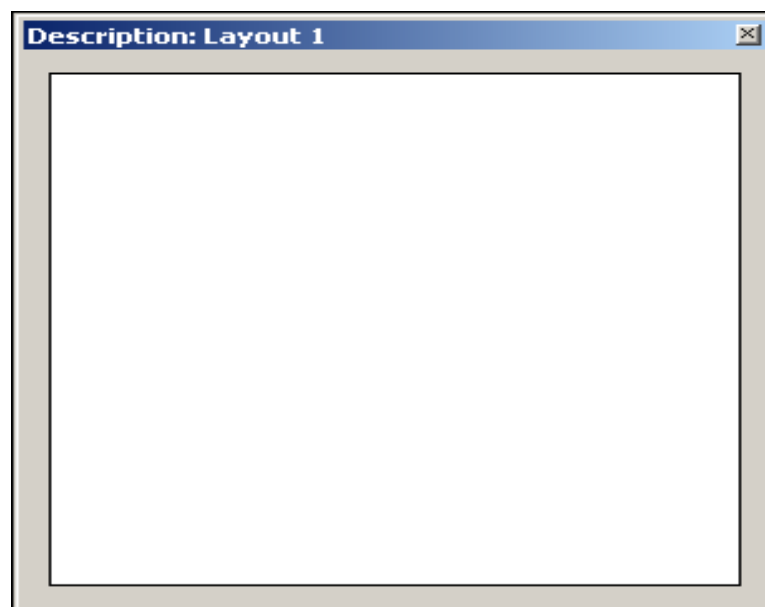
- **Editeur du layout**

L'éditeur de layout et la fenêtre qui permet de concevoir des schémas bloc avec des différents composants de la bibliothèque où on peut les configurer en modifiant ces paramètres. (voir figure IV.4)



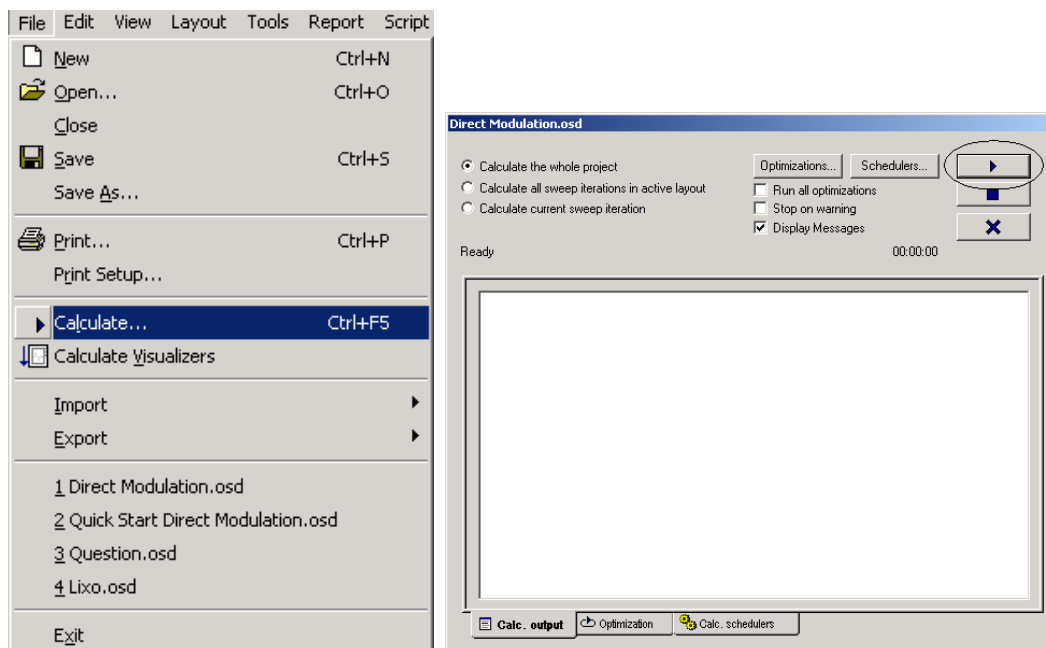
**Figure IV. 4:** Editeur du layout

- **Projet en cours (description du layout):** Visualise et affiche les divers fichiers et composants correspondants au projet en cours. [27] (voir figure IV.5)



**Figure IV. 5:** Fenêtre de description

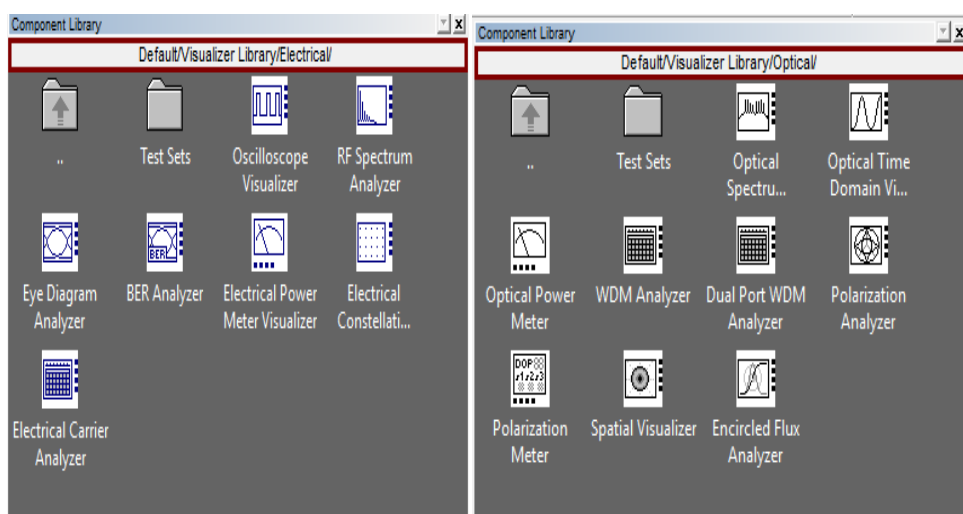
- **Lancer une simulation** : Pour exécuter une simulation, procédez comme suit. (voir figure IV.6)



**Figure IV. 6:** Fenêtre montre le lancement de la simulation

- **Outils de visualisation**

OptiSystem est très riche en outils de visualisation, qui permettent d'afficher les résultats à pour chaque composant utilisé lors de la conception. On trouve les visualisateurs optiques et électriques. [25] (voir figure IV.7)



**Figure IV. 7:** Outils de visualisations

---

### IV.2.3 Affichage des résultats à partir d'un appareil [31]

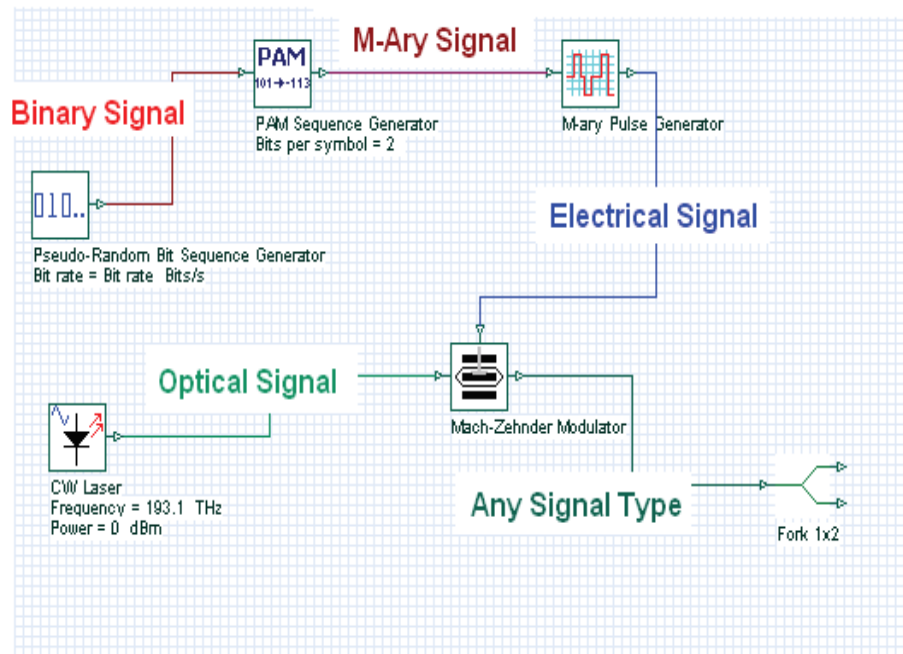
Pour afficher les graphiques et les résultats générés par la simulation, il faut faire double cliques sur le visualiseur dans la structure du projet.

- Analyseur de spectre optique: Affiche le signal optique modulé dans le domaine fréquentiel.
- Visualiseur optique en domaine temporel: Affiche le signal optique modulé dans le domaine temporel.
- Oscilloscope: Affiche le signal électrique après le code PIN dans le domaine temporel.
- Analyseur BER(BET): mesure les performances du système en fonction du signal avant et après la propagation.

### IV.2.4 Représentation des Signaux dans Optisystem

Pour rendre l'outil de simulation plus souple et plus efficace, il est essentiel qu'il fournisse des modèles à différents niveaux d'abstraction, y compris le système, sous-système, et les niveaux de composants. OptiSystem dispose d'une définition hiérarchique de composants et systèmes, nous permettant d'utiliser des outils spécifiques pour l'optique intégrée et permettant à la simulation d'aller aussi profond que la précision désirée l'exige.

Différents niveaux d'abstraction impliquent des représentations de signaux différents. La représentation du signal doit être aussi complète que possible afin de permettre une simulation efficace. Il ya cinq types de signaux dans la bibliothèque du logiciel tous régis par un code de couleur (voir figure IV.8). [31]



**Figure IV. 8:** Types de signaux

**a) Signaux électriques**

Les signaux électriques sont générés par des composants tels que des générateurs d'impulsions dans la bibliothèque des émetteurs et des photodétecteurs dans la bibliothèque des récepteurs. Les signaux électriques sont constitués de la forme d'onde du signal échantillonné dans le domaine temporel. Les propriétés principales du signal électrique sont les variances de bruit de signal dans le domaine temporel et les densités spectrales de puissance de bruit dans le domaine de fréquence.

**b) Signaux binaires**

Les signaux binaires sont générés par des composants tels que des générateurs de séquence de bits. Les générateurs d'impulsions de la bibliothèque des émetteurs et les commutateurs numériques de la bibliothèque réseau utilisent ce signal en tant que données d'entrée. Un signal binaire consiste en une séquence de uns et de zéros, ou de marques et d'espaces. La propriété principale du signal binaire est le débit binaire

**c) Signaux optiques**



Les signaux optiques sont générés par des composants tels que les lasers dans la bibliothèque des émetteurs. Les signaux optiques permettent différentes représentations de signaux:

- signaux échantillonnés
- signaux paramétrés
- bacs à bruit

**d) Les signaux M-Ary :**

Les signaux M-Ary sont des signaux à plusieurs niveaux utilisés pour des types spéciaux de codage, tels que PAM, QAM, PSK et DPSK. Les signaux M-Ary sont similaires aux signaux binaires. Cependant, les signaux M-Ary peuvent avoir n'importe quel niveau au lieu de seulement les niveaux haut (1) et bas (0), ou les marques et les espaces.

#### IV.2.5 Applications du logiciel OptiSystem

Parmi les diverses applications d'OptiSystem nous allons citer les plus utilisées [7]:

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

#### IV.2.6 Avantages du logiciel OptiSystem

Les avantages du logiciel OptiSystem sont [23]:

- Fournir un aperçu de performances du système mondial de fibres optiques.
- Evaluer les sensibilités des paramètres aidant aux spécifications de tolérance de conception.
- Présenter visuellement les options de conception à des clients potentiels.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation approfondie du système.
- Fournir le balayage automatique des paramètres et d'optimisation.

### IV.2.7 Modes de simulation

Le logiciel Optisystem offre trois différents modes de simulation [31] :

- Le mode normal : où il suffit d'entrer la valeur du paramètre désiré.
- Le mode de balayage (Sweep) : Où la valeur du paramètre varie suivant une courbe donnée.
- Le mode scripte : où le paramètre est évalué comme une expression arithmétique.

### IV.3 Critères de qualité d'une transmission

Afin de connaître le bon fonctionnement d'un système, on compare la séquence envoyée à celle reçue, cette dernière est obtenue en mesurant la qualité de transmission, pour cela il y'a trois critères principaux qui sont : le facteur de qualité, le taux d'erreur binaire et le diagramme de l'œil. [26]

- **Le facteur de qualité**

Facteur de qualité, ou le facteur Q, est un critère de qualité d'un signal optique. Il est obtenu à partir des statistiques du bruit des niveaux (1) et (0) du signal à détecter tel que :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\delta_1 - \delta_2} \quad \text{IV. 1}$$

Où  $I_1$  et  $I_2$  sont les valeurs moyennes qui représentent le signal utile  $\delta_1$  et  $\delta_2$  sont les écarts types des densités de probabilité des symboles 1 et 0.

- **Taux d'erreurs binaire (BER)**

Le moyen quantitatif pour évaluer la qualité d'une transmission consiste à évaluer la probabilité d'erreur, qui correspond à la probabilité de prendre une décision erronée sur un bit. Le taux d'erreur binaire (TEB) est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits émis.

Le récepteur prend une décision sur la présence d'un symbole "1" ou "0" selon le niveau de signal reçu à un instant donné appelé instant de décision. Si les fluctuations d'amplitude et temporelles sont importantes, la tension d'un symbole "1" peut passer au-dessous du seuil et la tension d'un symbole "0" au-dessus du seuil, des erreurs sont alors commises.

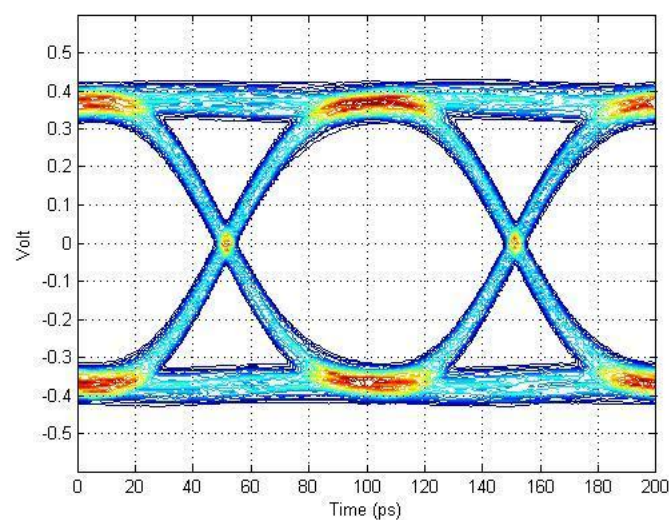
Un TEB acceptable à la réception est généralement inférieur à  $10^{-9}$  [27].

$$\text{BER} = \frac{\text{Nombres de bits erroné}}{\text{Nombres de bits transmis}}$$

IV. 2

- **Diagramme de l'œil**

On utilise souvent en télécommunications, la méthode dite: diagramme de l'œil pour décrire la dégradation par le bruit et la dispersion du signal numérique. Le diagramme de l'œil permet d'une manière très simple d'apprécier la qualité des signaux numériques reçus avant qu'ils atteignent le dispositif de démodulation. Il s'agit d'une mesure de base en transmission numérique. Si l'on superpose des symboles successifs par paires sur un oscilloscope, on obtient le diagramme de l'œil. Des appareils spécialisés engendrent des séquences aléatoires et comparent le signal de sortie de la liaison optique avec le signal d'entrée. Une séquence aléatoire de bits est visualisée sur un oscilloscope en mode d'accumulation en fonction du temps. La somme de tous les signaux aboutit à une forme de signal appelé œil : Sans bruit les traces se superposent exactement, quand le bruit augmente, les signaux varient et la trace s'épaissit. La Figure (IV.9) montre toute une série de paramètres observables. Le principe général est que plus l'aire centrale est grande, plus la qualité du signal reçu est bonne. La largeur est liée à la facilité à synchroniser et différencier les échantillons successifs alors que la hauteur du lobe central traduit le rapport d'énergie entre le signal original et le bruit de canal.[28]



**Figure IV. 9:** Exemple d'un diagramme de l'œil

### IV.4 Conception d'une chaîne de transmission optique sous OptiSystem

Dans son synoptique le plus général et le plus simple possible, un système de télécommunications optique est donné par la chaîne de la figure IV.10 :

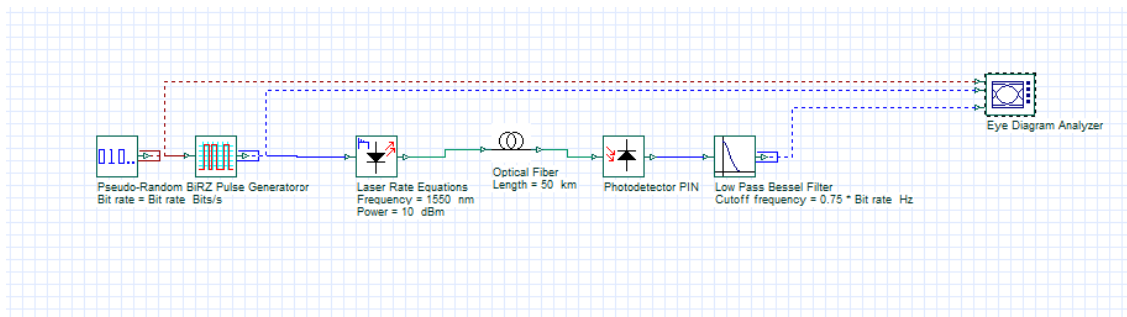
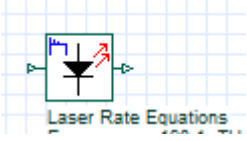
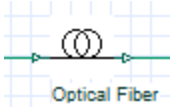
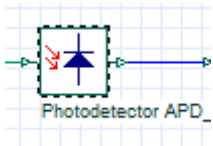
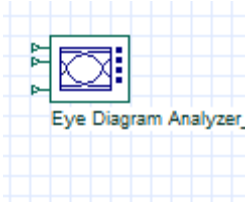


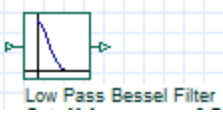
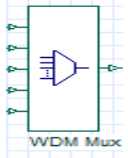
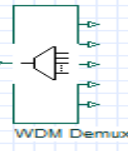
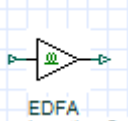
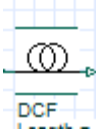
Figure IV. 10: Synoptique d'une chaîne de transmission optique

Le tableau suivant présente les paramètres caractéristiques des composants utilisés de la bibliothèque OPTISYSTEM pour construire les différents blocs de la chaîne

Modèle de simulation	Paramètres caractéristiques																																			
<p>Pseudo-Random RZ Pulse Generator Bit rate = Bit rate Bits/s</p> <p><b>Générateur de séquence binaire et de Générateur NRZ</b></p>	<p>Ce modèle permet de générer un courant d'entrée de laser, modélisé par une séquence binaire pseudo-aléatoire représentant l'information à transmettre. Le signal, formé de créneaux prend uniquement deux valeurs : I<sub>min</sub> et I<sub>max</sub> qui représentent le courant qui entre dans le laser quand l'information à transmettre est un 0 ou un 1 respectivement. Le choix de ces valeurs de courant dépend de la puissance voulue.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Disp</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Units</th> <th>Mode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>Bit rate</td> <td>1</td> <td>GBits/s</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Operation mode</td> <td>Order</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Order</td> <td><math>\log(\text{Sequence length})/\log(5)</math></td> <td></td> <td>Script</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Mark probability</td> <td>0.5</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Number of leading zeros</td> <td><math>(\text{Time window} * 3 / 100) * 5</math></td> <td></td> <td>Script</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Number of trailing zeros</td> <td><math>(\text{Time window} * 3 / 100) * 5</math></td> <td></td> <td>Script</td> </tr> </tbody> </table>	Disp	Name	Value	Units	Mode	<input checked="" type="checkbox"/>	Bit rate	1	GBits/s	Normal	<input type="checkbox"/>	Operation mode	Order		Normal	<input type="checkbox"/>	Order	$\log(\text{Sequence length})/\log(5)$		Script	<input type="checkbox"/>	Mark probability	0.5		Normal	<input type="checkbox"/>	Number of leading zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script	<input type="checkbox"/>	Number of trailing zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script
Disp	Name	Value	Units	Mode																																
<input checked="" type="checkbox"/>	Bit rate	1	GBits/s	Normal																																
<input type="checkbox"/>	Operation mode	Order		Normal																																
<input type="checkbox"/>	Order	$\log(\text{Sequence length})/\log(5)$		Script																																
<input type="checkbox"/>	Mark probability	0.5		Normal																																
<input type="checkbox"/>	Number of leading zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script																																
<input type="checkbox"/>	Number of trailing zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script																																
	<p>Ce modèle permet de simuler une diode laser DFB à semi conducteur. Il est possible de le décrire par ses paramètres physiques internes (coefficient de gain différentiel, facteur de compression de gain, durée de vie des photons...), mais</p>																																			

 <p style="text-align: center;"><b>Laser</b></p>	<p>également par des grandeurs "système" ou mesurables, souvent plus accessibles, notamment dans les data sheet fournies par les constructeurs (courant de seuil, RIN, rendement...)</p> <table border="1" data-bbox="659 342 1345 663"> <thead> <tr> <th colspan="5">Main   Physical   Numerical   Graphs   Simula...   Noise   Random...</th> </tr> <tr> <th>Disp</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Units</th> <th>Mode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>Frequency</td> <td>193.1</td> <td>THz</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Calculate current</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>Power</td> <td>10</td> <td>dBm</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Power at bias current</td> <td>0</td> <td>dBm</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Bias current</td> <td>38</td> <td>mA</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Modulation peak current</td> <td>28</td> <td>mA</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Threshold current</td> <td>33.45723247941</td> <td>mA</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Threshold Power</td> <td>0.01541301355644</td> <td>mW</td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>	Main   Physical   Numerical   Graphs   Simula...   Noise   Random...					Disp	Name	Value	Units	Mode	<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	193.1	THz	Normal	<input type="checkbox"/>	Calculate current	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal	<input checked="" type="checkbox"/>	Power	10	dBm	Normal	<input type="checkbox"/>	Power at bias current	0	dBm	Normal	<input type="checkbox"/>	Bias current	38	mA	Normal	<input type="checkbox"/>	Modulation peak current	28	mA	Normal	<input type="checkbox"/>	Threshold current	33.45723247941	mA	Normal	<input type="checkbox"/>	Threshold Power	0.01541301355644	mW	Normal
Main   Physical   Numerical   Graphs   Simula...   Noise   Random...																																																			
Disp	Name	Value	Units	Mode																																															
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	193.1	THz	Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Calculate current	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal																																															
<input checked="" type="checkbox"/>	Power	10	dBm	Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Power at bias current	0	dBm	Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Bias current	38	mA	Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Modulation peak current	28	mA	Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Threshold current	33.45723247941	mA	Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Threshold Power	0.01541301355644	mW	Normal																																															
 <p style="text-align: center;"><b>Fibre optique</b></p>	<p>La fibre optique monomode. Il permet d'introduire de façon optionnelle les effets non-linéaires Kerr et Raman.</p> <table border="1" data-bbox="659 786 1361 1039"> <thead> <tr> <th>Disp</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Units</th> <th>Mode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>User defined reference w</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>Reference wavelength</td> <td>1550</td> <td>nm</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>Length</td> <td>50</td> <td>km</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Attenuation effect</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Attenuation data type</td> <td>Constant</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>Attenuation</td> <td>0.2</td> <td>dB/km</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Attenuation vs. wavelengt</td> <td>Attenuation.dat</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>	Disp	Name	Value	Units	Mode	<input type="checkbox"/>	User defined reference w	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal	<input checked="" type="checkbox"/>	Reference wavelength	1550	nm	Normal	<input checked="" type="checkbox"/>	Length	50	km	Normal	<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal	<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal	<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	0.2	dB/km	Normal	<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelengt	Attenuation.dat		Normal										
Disp	Name	Value	Units	Mode																																															
<input type="checkbox"/>	User defined reference w	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal																																															
<input checked="" type="checkbox"/>	Reference wavelength	1550	nm	Normal																																															
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	50	km	Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal																																															
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	0.2	dB/km	Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelengt	Attenuation.dat		Normal																																															
 <p style="text-align: center;"><b>Diode APD</b></p>	<p>C'est la photodiode à avalanche.</p> <table border="1" data-bbox="659 1122 1401 1279"> <thead> <tr> <th>Disp</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Units</th> <th>Mode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Responsivity type</td> <td>Constant</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Gain</td> <td>3</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Responsivity</td> <td>1</td> <td>A/W</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Responsivity vs. waveleng</td> <td>Responsivity.dat</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Ionization ratio</td> <td>0.9</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>	Disp	Name	Value	Units	Mode	<input type="checkbox"/>	Responsivity type	Constant		Normal	<input type="checkbox"/>	Gain	3		Normal	<input type="checkbox"/>	Responsivity	1	A/W	Normal	<input type="checkbox"/>	Responsivity vs. waveleng	Responsivity.dat		Normal	<input type="checkbox"/>	Ionization ratio	0.9		Normal																				
Disp	Name	Value	Units	Mode																																															
<input type="checkbox"/>	Responsivity type	Constant		Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Gain	3		Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Responsivity	1	A/W	Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Responsivity vs. waveleng	Responsivity.dat		Normal																																															
<input type="checkbox"/>	Ionization ratio	0.9		Normal																																															
 <p style="text-align: center;"><b>Diagramme de l'oeil</b></p>	<p>Il nous permet de visualiser la qualité d'un signal dans le domaine temporel en superposant un grand nombre de séquence au moyen d'un oscilloscope synchronisé sur le signal d'horloge de signal de données. Et pour superposer tous les bits il suffit de faire glisser temporellement chaque séquence bit à bit.</p> <p><b>Remarque :</b> L'ouverture de l'œil caractérise le bruit et les distorsions. L'œil bien ouvert permettra au dispositif de démoduler les signaux transmis. L'ouverture de l'œil est fermée se traduira inévitablement par de nombreux erreurs de transmissions.</p>																																																		
	<p>Un filtre passe-bas de Bessel est utilisé pour filtrer la composante haute fréquence optique du signal reçu.</p>																																																		



 <p><b>Filtre passe bas</b></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Disp</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Units</th> <th>Mode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Cutoff frequency</td> <td>0.75 * Bit rate</td> <td>5 Hz</td> <td>Script</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Insertion loss</td> <td></td> <td>0 dB</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Depth</td> <td></td> <td>100 dB</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Order</td> <td></td> <td>2</td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>	Disp	Name	Value	Units	Mode	<input type="checkbox"/>	Cutoff frequency	0.75 * Bit rate	5 Hz	Script	<input type="checkbox"/>	Insertion loss		0 dB	Normal	<input type="checkbox"/>	Depth		100 dB	Normal	<input type="checkbox"/>	Order		2	Normal																				
Disp	Name	Value	Units	Mode																																										
<input type="checkbox"/>	Cutoff frequency	0.75 * Bit rate	5 Hz	Script																																										
<input type="checkbox"/>	Insertion loss		0 dB	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Depth		100 dB	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Order		2	Normal																																										
 <p><b>Multiplexeur WDM</b></p>	<p>Un multiplexeur optique regroupe sur une même sortie plusieurs longueurs d'ondes issues de différentes entrées.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Disp</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Units</th> <th>Mode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Number of input ports</td> <td></td> <td>8</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Bandwidth</td> <td></td> <td>10 GHz</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Insertion loss</td> <td></td> <td>0 dB</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Depth</td> <td></td> <td>100 dB</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Filter type</td> <td>Bessel</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Filter order</td> <td></td> <td>4</td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>	Disp	Name	Value	Units	Mode	<input type="checkbox"/>	Number of input ports		8	Normal	<input type="checkbox"/>	Bandwidth		10 GHz	Normal	<input type="checkbox"/>	Insertion loss		0 dB	Normal	<input type="checkbox"/>	Depth		100 dB	Normal	<input type="checkbox"/>	Filter type	Bessel		Normal	<input type="checkbox"/>	Filter order		4	Normal										
Disp	Name	Value	Units	Mode																																										
<input type="checkbox"/>	Number of input ports		8	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Bandwidth		10 GHz	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Insertion loss		0 dB	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Depth		100 dB	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Filter type	Bessel		Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Filter order		4	Normal																																										
 <p><b>Démultiplexeur WDM</b></p>	<p>C'est un filtre de longueur d'onde il fait l'opération inverse d'un multiplexeur.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Disp</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Units</th> <th>Mode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Number of output ports</td> <td></td> <td>8</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Bandwidth</td> <td></td> <td>10 GHz</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Insertion loss</td> <td></td> <td>0 dB</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Depth</td> <td></td> <td>100 dB</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Filter type</td> <td>Bessel</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Filter order</td> <td></td> <td>4</td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>	Disp	Name	Value	Units	Mode	<input type="checkbox"/>	Number of output ports		8	Normal	<input type="checkbox"/>	Bandwidth		10 GHz	Normal	<input type="checkbox"/>	Insertion loss		0 dB	Normal	<input type="checkbox"/>	Depth		100 dB	Normal	<input type="checkbox"/>	Filter type	Bessel		Normal	<input type="checkbox"/>	Filter order		4	Normal										
Disp	Name	Value	Units	Mode																																										
<input type="checkbox"/>	Number of output ports		8	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Bandwidth		10 GHz	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Insertion loss		0 dB	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Depth		100 dB	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Filter type	Bessel		Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Filter order		4	Normal																																										
 <p><b>Amplificateur Optique</b></p>	<p>Il a pour rôle d'amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexés en longueurs d'onde. Ces paramètres caractéristiques sont présentés dans le tableau suivant.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Disp</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Units</th> <th>Mode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Core radius</td> <td></td> <td>2.2 <math>\mu</math>m</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Er doping radius</td> <td></td> <td>2.2 <math>\mu</math>m</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Er metastable lifetime</td> <td></td> <td>10 ms</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Numerical aperture</td> <td></td> <td>0.24</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Er ion density</td> <td></td> <td>10e+024 <math>m^{-3}</math></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Loss at 1550 nm</td> <td></td> <td>0.1 dB/m</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Loss at 980 nm</td> <td></td> <td>0.15 dB/m</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Length</td> <td></td> <td>10 m</td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>	Disp	Name	Value	Units	Mode	<input type="checkbox"/>	Core radius		2.2 $\mu$ m	Normal	<input type="checkbox"/>	Er doping radius		2.2 $\mu$ m	Normal	<input type="checkbox"/>	Er metastable lifetime		10 ms	Normal	<input type="checkbox"/>	Numerical aperture		0.24	Normal	<input type="checkbox"/>	Er ion density		10e+024 $m^{-3}$	Normal	<input type="checkbox"/>	Loss at 1550 nm		0.1 dB/m	Normal	<input type="checkbox"/>	Loss at 980 nm		0.15 dB/m	Normal	<input type="checkbox"/>	Length		10 m	Normal
Disp	Name	Value	Units	Mode																																										
<input type="checkbox"/>	Core radius		2.2 $\mu$ m	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Er doping radius		2.2 $\mu$ m	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Er metastable lifetime		10 ms	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Numerical aperture		0.24	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Er ion density		10e+024 $m^{-3}$	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Loss at 1550 nm		0.1 dB/m	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Loss at 980 nm		0.15 dB/m	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Length		10 m	Normal																																										
 <p><b>Fibre compensatrice</b></p>	<p>A pour rôle de compenser la dispersion. Ces paramètres caractéristiques sont présentés dans les tableaux suivants :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Disp</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Units</th> <th>Mode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>User defined reference wa</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Reference wavelength</td> <td></td> <td>1550 nm</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>Length</td> <td></td> <td>4 km</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Attenuation effect</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Attenuation data type</td> <td>Constant</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>Attenuation</td> <td></td> <td>0.5 dB/km</td> <td>Normal</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Attenuation vs. wavelengt</td> <td>Attenuation.dat</td> <td></td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>	Disp	Name	Value	Units	Mode	<input type="checkbox"/>	User defined reference wa	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal	<input type="checkbox"/>	Reference wavelength		1550 nm	Normal	<input checked="" type="checkbox"/>	Length		4 km	Normal	<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal	<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal	<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation		0.5 dB/km	Normal	<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelengt	Attenuation.dat		Normal					
Disp	Name	Value	Units	Mode																																										
<input type="checkbox"/>	User defined reference wa	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Reference wavelength		1550 nm	Normal																																										
<input checked="" type="checkbox"/>	Length		4 km	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal																																										
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation		0.5 dB/km	Normal																																										
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelengt	Attenuation.dat		Normal																																										

### IV.5 Spécification des objectifs du système

La conception du prototype du système DWDM se compose essentiellement de 8 canaux du DWDM étroitement espacés transmettant chacun un débit de 5 Gbps. Toutes les spécifications souhaitées du système sont indiquées dans le tableau IV.1.

Capacité totale	40Gbps
Nombre de canaux	8
Débit de données de chaque canal	5Gbps
Distance de transmission	900km
BER exigé	$10^{-12}$ à $10^{-9}$

**Tableau IV. 1:** Spécification des objectifs du système.

Le système DWDM dispose de 8 canaux fonctionnant chacun à 5 Gbit / s. Un espacement des canaux de 100 GHz (0,8 nm) a été. Des canaux étroitement espacés ont été utilisés afin que le système puisse être amélioré en ajoutant plus de canaux à l'avenir à mesure que la demande augmente.

La fenêtre de longueur d'onde de 1550 nm (bande C) a été choisie en raison de la faible atténuation, de la bande passante énorme et du grand nombre de composants optiques disponibles pour cette bande.

Les canaux utilisés dans le système DWDM conçu sont indiqués dans le tableau IV.2.

Canal	Longueur d'onde (nm)	Fréquence (THz)
1	1552.52	193.1
2	1551.72	193.2
3	1550.91	193.3
4	1550.11	193.4
5	1549.31	193.5
6	1548.51	193.6
7	1547.71	192.7
8	1546.91	192.8

**Tableau IV. 2:** Canaux du DWDM utilisés dans le système.

#### IV.5.1 Détermination de la longueur maximale de la fibre due à la dispersion

Des fibres monomodes SMF (single mode fibers) ont été utilisées en raison de leur atténuation et de leur coefficient de dispersion très faibles. Les caractéristiques de la fibre SMF utilisée dans la conception sont illustrées dans le tableau IV.3.

<b>Type de fibre</b>	Fibre monomode SMF
<b>Coefficient d'atténuation à 1550 nm (<math>\alpha_{SMF}</math>)</b>	0.2 dB/km
<b>coefficient de dispersion à 1550 nm (<math>D_{SMF}</math>)</b>	2 ps/nm/km

**Tableau IV. 3:** Caractéristiques du SMF

Les effets de la dispersion modale peuvent être complètement ignorés car des fibres SMF sont utilisées dans la conception. Les effets de la dispersion chromatique pour un canal de transmission de 900 km ont été calculés

En supposant une dispersion causée uniquement par la fibre de transmission. En plus de la fibre de transmission, chaque composant du système optique ajoute une quantité comparable de dispersion dans la liaison et ces effets de dispersion ont été ignorés dans les calculs numériques.

L'étalement des impulsions  $\Delta\lambda$  dû à la dispersion chromatique dépend du coefficient de dispersion de la fibre et de la largeur de la raie spectrale ( $\Delta\lambda$ ) de la source. La largeur de la raie spectrale du signal optique modulé lancé injecté dans la fibre a été calculée en utilisant l'équation suivante à 1550 nm.

$\lambda$ = Longueur d'onde =1550 nm

C= vitesse de la lumière =  $3 \times 10^8$  m/s

$B_0$ = débit de données =5Gbps

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} (B_0) = \frac{(1550 \times 10^{-9})^2}{3 \times 10^8} \times (5 \times 10^9) = 0.04 \text{ nm} \quad \text{IV. 3}$$

Le calcul de la distance maximale L sans compensation de dispersion des impulsions optiques avec un débit 5 Gbit / s est comme suit:

L= distance maximale sans compensation de dispersion

$\Delta\lambda = 0.04 \text{ nm}$

$B_0$ = data rate =5Gbps

$$L = \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2 \times 10^{-12} \times 5 \times 10^9 \times 0.04} \right) = 625 \text{ km}$$



Du moment que la distance de transmission est de 900 km, une compensation de dispersion doit être utilisée dans le système.

#### IV.6 Détermination de la limite du système due à l'atténuation

Cette section détermine si le système nécessite une amplification optique. L'atténuation des fibres optiques limite la distance maximale qu'un signal optique peut être propagé avec une puissance spécifiée par le récepteur afin de détecter le signal avec des erreurs minimales. Pour cette raison, le budget de puissance du système doit être calculé tout au long du processus de conception.

Les caractéristiques de l'APD utilisée dans la conception sont indiquées dans le tableau IV.4.

Type	Avalanche Photodiode (APD)
Sensibilité à 5Gbps avec BER de $10^{-10}$	-35 dBm
Puissance maximale de la photodiode	-3 dBm
Réponse spectrale	1 A/W

**Tableau IV. 4:** Caractéristiques de la photodiode à Avalanche.

Selon les spécifications ci-dessus, chaque canal doit avoir une puissance minimale de -35 dBm afin d'être détectée et avec un BER de  $10^{-12}$  à  $10^{-9}$  et que la puissance du signal ne dépassant pas -3dBm qui est la puissance maximale de l'APD.

$$P_t - \alpha \cdot L - SM = P_r \text{ (dBm)} \quad \text{IV. 4}$$

Où  $P_t$  est la puissance transmise de l'émetteur,  $\alpha$  est la perte due à l'atténuation dans la fibre,  $SM$  est la marges de sécurité, et  $P_r$  est la sensibilité du récepteur.

l'équation du bilan de puissance ci-dessus a été appliquée à l'ensemble du système comme indiqué ci-dessous :

$$P_t - \alpha L - SM = P_r$$

$P_t = 0$  dBm (puissance injectée dans la fibre)

$P_r$  = puissance reçue par le détecteur . (Doit être supérieure à -35dBm)

$SM = 6$  dB (la marges de sécurité)

$\alpha = 0.19$  dB/km (coefficient d'atténuation)

$$0 \text{ dBm} - (0.19 \times 900) \text{ dBm} - 6 \text{ dBm} = P_r$$

$$0 \text{ dBm} - 133 \text{ dBm} - 6 \text{ dBm} = P_r$$

$$P_r = -139 \text{ dBm}$$

La puissance du signal au niveau du détecteur (-139 dBm) est bien inférieure à la sensibilité de l'APD (-35dBm) donc un amplificateur EDFA doit être employé dans la ligne de transmission.

#### IV.7 Paramètres de simulation de la liaison optique d'un système à DWDM

Les paramètres et les valeurs utilisés dans la simulation sont résumés dans le tableau IV.5 qui correspondent à un système à DWDM pour 8 utilisateurs. Dans cette liaison, nous allons utiliser une fibre de compensation de dispersion (DCF).

Paramètres	Valeurs
Nombres de canaux	8
Type de modulation	NRZ
Débit de chaque canal	5Gb/s
Emetteur	CW laser
Fibre	SMF
Récepteur	APD
Longueur de la fibre (SMF)	100 Km par tranche
Longueur de DCF	4 Km par tranche
Puissance transmise	0 dBm
Coefficient de dispersion du SMF	2ps/nm/km
Atténuation du SMF	0.2db/km



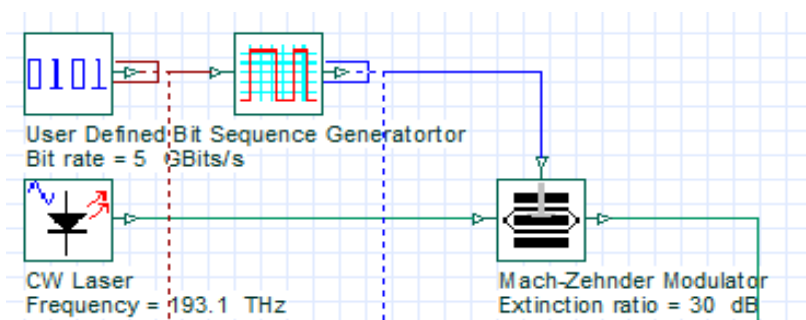
Fréquence de coupeur du filtre	0.75*bit rate
EDFA GAIN	31dB
Bruit et Pertes non linéaire	Activés pour tous les composants et la fibre optique

**Tableau IV. 5:** Paramètre de la simulation pour 8 utilisateurs.

#### IV.7.1 Partie émission

La source choisie dans la simulation est une source laser continue, cette source émet à 193.1THz, et pour un débit de 40 Gbit/s, de modulateur externe composés de générateur binaires, de générateur NRZ, nous pouvons citer le modulateur de type Mach-Zehnder (MZM, MachZehnder Modulator) qui est parmi les modulateurs les plus utilisés dans les systèmes de transmission dont le principe de fonctionnement se base sur l'interférométrie.

Le signal à la sortie de ce type de modulateur est beaucoup moins dégradé que celui issu d'un modulateur direct, d'où son utilisation est très importante dans les systèmes à longues distances.



**Figure IV. 11:** Partie d'émission de la liaison optique.

L'émetteur DWDM a été simulé en utilisant 8 structures (fig. IV.14), pareilles à celles illustrée dans la figure IV.11. Le spectre optique d'un canal individuel avant d'être multiplexé et le spectre optique de sortie du multiplexeur DWDM sont présentés dans les figures IV.12 et IV.13.

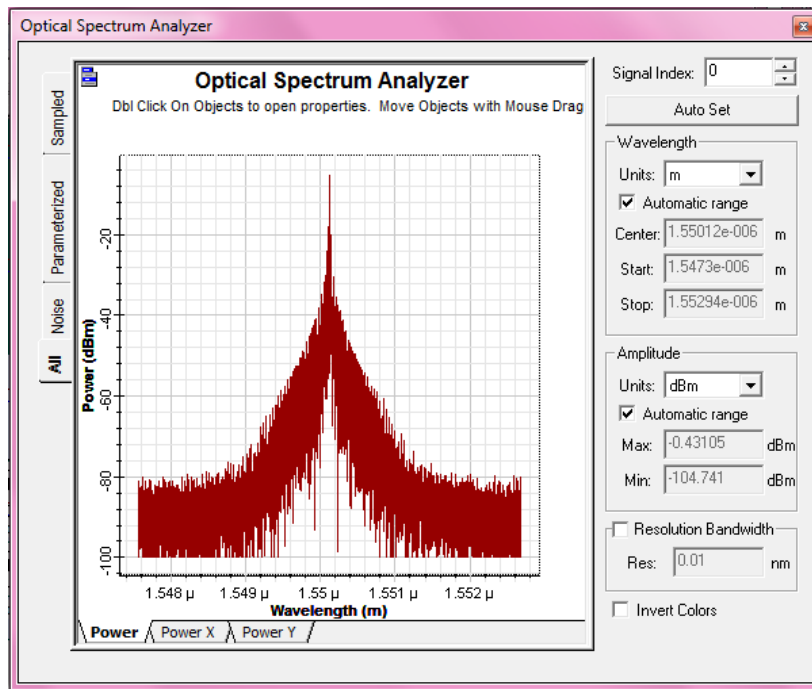


Figure IV. 12: Spectre d'un canal individuel.

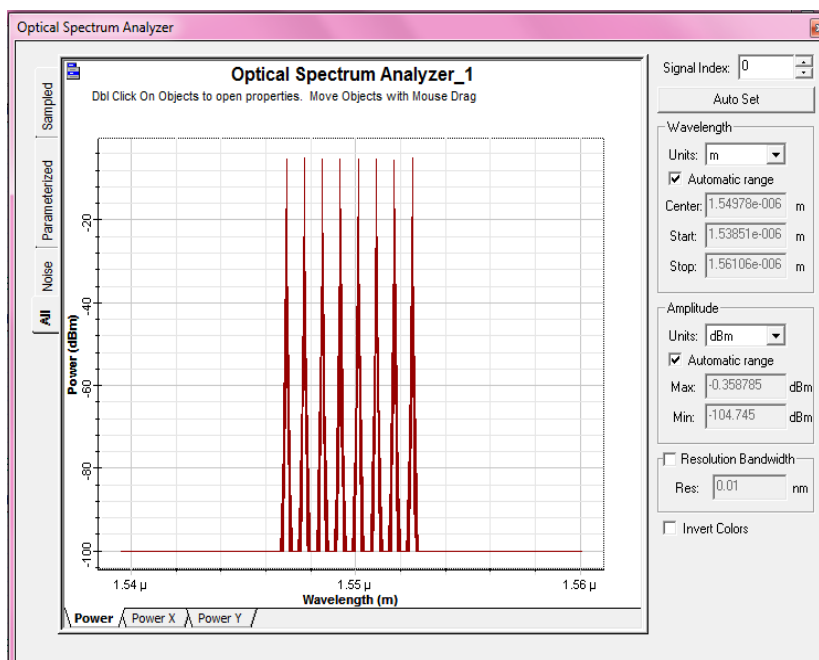


Figure IV. 13: Spectre d'un canal multiplexé.

---

---

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	-2.9251869	-90.071244	87.146057
193.2	-2.9255286	-87.006491	84.080963
193.3	-2.9251415	-87.028112	84.102971
193.4	-2.9258977	-87.026446	84.100549
193.5	-2.9258115	-86.982371	84.056559
193.6	-2.9249923	-86.990875	84.065883
193.7	-2.9252241	-86.934095	84.008871
193.8	-2.9251131	-90.079272	87.154158

**Tableau IV. 6:** Niveau de puissance optique de chaque canal injecté dans la fibre optique.

Selon le tableau IV.6 ci-dessus, la puissance injectée dans la fibre optique est de près de 2 dBm pour chaque canal. Du bruit a été ajouté au système pendant les processus de génération d'impulsions, de modulation et de multiplexage qui représentait environ -80 dBm de puissance de bruit.

Notre chaîne de transmission est représenté dans figure IV.14.

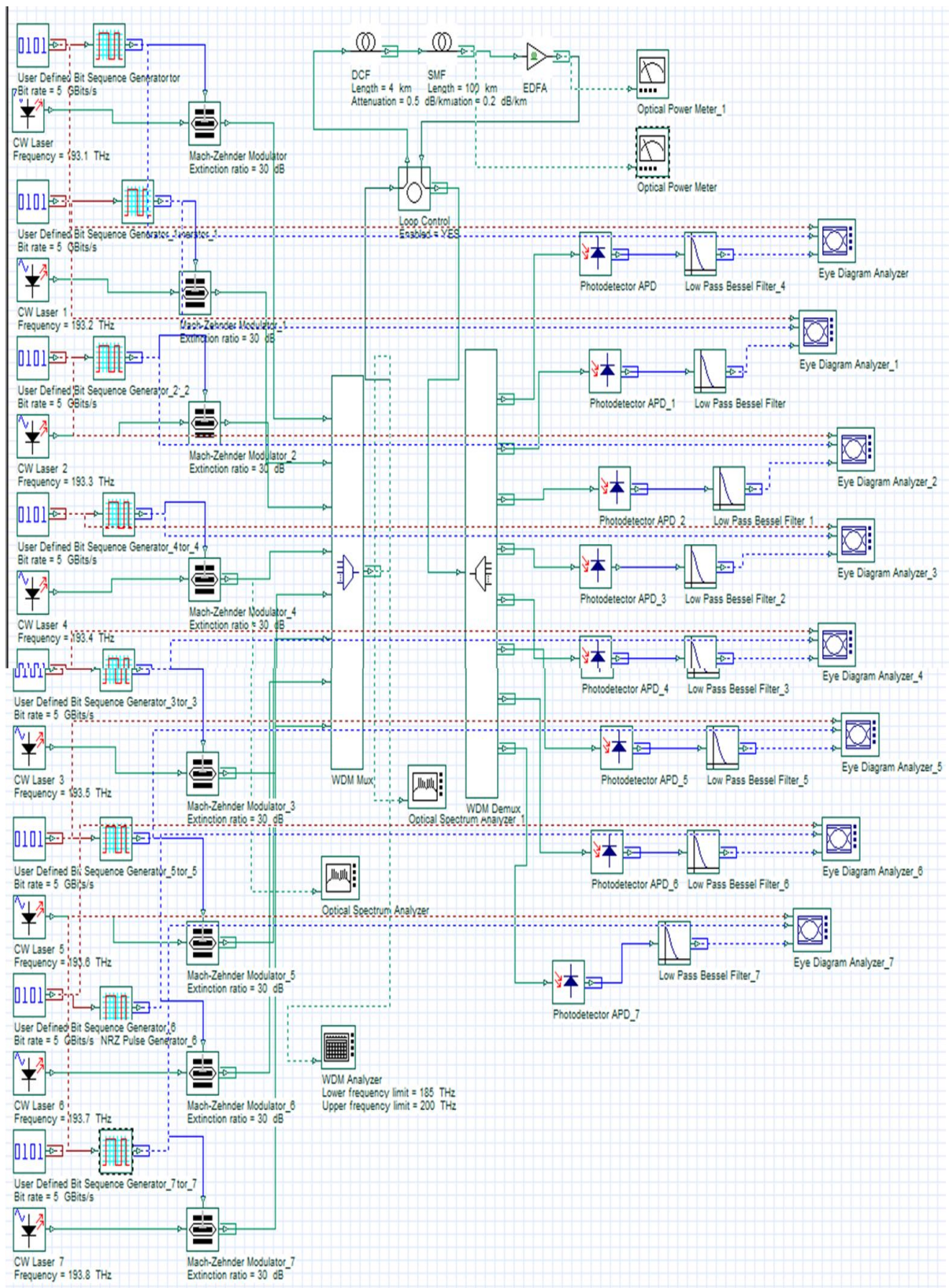
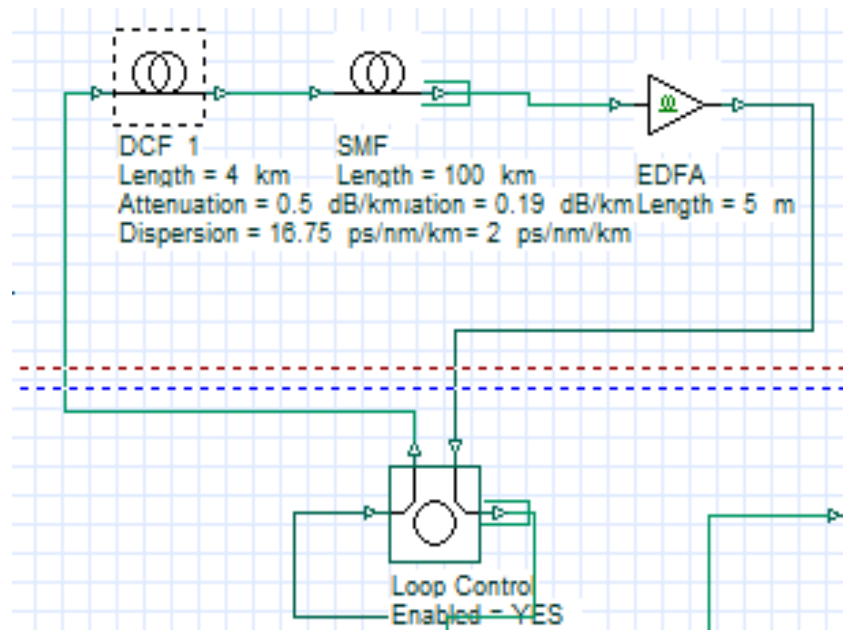


Figure IV. 14 : Schéma du système de communication à DWDM.





**Figure IV. 15:** Partie de transmission de la liaison optique

Une seule tranche a été conçue comme le montre la figure IV.15 et répétée 9 fois par la boucle de contrôle d'OptiSystem, qui est conçu pour simuler de grandes longueurs de liaison de communication. Les effets des non-linéarités ont été ajoutés à la simulation.

La puissance de chaque canal individuel (voir Tableau IV.7) est réduite de 0 dBm à -5 dBm indiquant une perte de puissance d'environ 5 dB sur une seule tranche.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	-4.9251869	-92.071244	87.146057
193.2	-4.9255286	-89.006491	84.080963
193.3	-4.9251415	-89.028112	84.102971
193.4	-4.9258977	-89.026446	84.100549
193.5	-4.9258115	-88.982371	84.056559
193.6	-4.9249923	-88.990875	84.065883
193.7	-4.9252241	-88.934095	84.008871
193.8	-4.9251131	-92.079271	87.154158

**Tableau IV. 7:** Niveaux de puissance de chaque canal à la fin de la première tranche de la fibre optique.

Le spectre optique après SMF est illustré dans la figure IV.16.

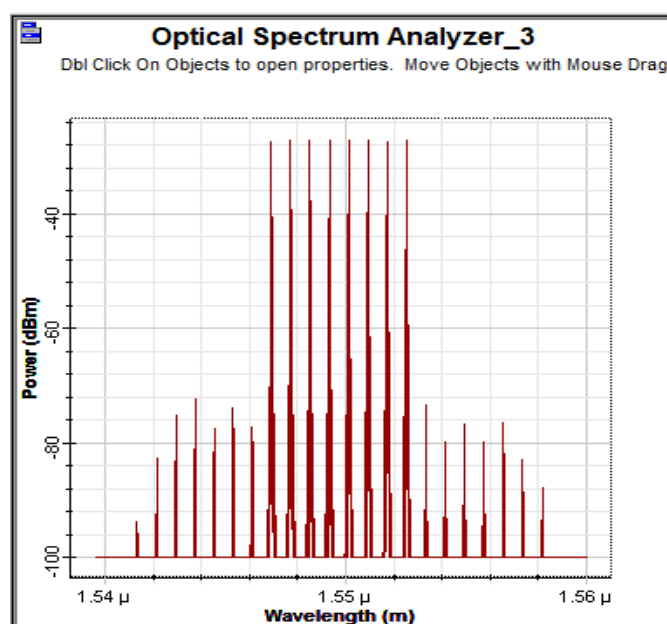


Figure IV. 16: Spectre optique apres SMF.

#### IV.7.2 Effets des amplificateurs optiques sur le bruit du système

Les amplificateurs optiques peuvent être considérés comme la partie la plus critique du canal de communication. Le nombre d'amplificateurs utilisés dans le système de communication doit être réduit au minimum car les EDFA vont ajouter une quantité importante de bruit tout en amplifiant le signal. Le spectre optique avant et après avoir traversé un EDFA est illustré dans la figure IV.17.

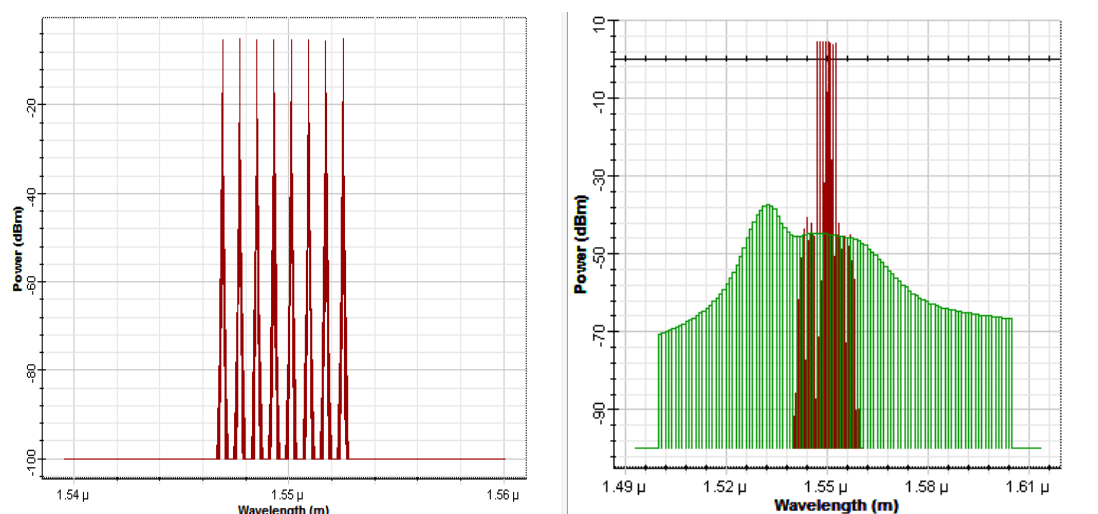


Figure IV. 17: Spectre optique avant et après l'amplification par un EDFA.



La puissance du signal et le rapport signal optique / bruit de chaque canal individuel à la fin du canal de communication optique de 936 km de longueur (avant d'être injectée dans le démultiplexeur) est illustrée dans le tableau IV.8.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	8.1683695	-18.732965	26.901334
193.2	8.278104	-18.90988	27.187984
193.3	8.1399091	-18.90988	27.049789
193.4	7.5638271	-19.305358	26.869186
193.5	7.3297714	-19.736282	27.066053
193.6	6.950027	-20.148266	27.098293
193.7	6.3624349	-20.537199	26.899634
193.8	5.9370204	-20.537199	26.47422

**Tableau IV. 8:** Puissance à la fin de la distance de transmission.

La puissance du signal à la fin de la ligne de transmission optique pour chaque canal est d'environ 8 dBm. L'OSNR de chaque canal est d'environ 26 dB.

#### IV.7.3 Partie réception

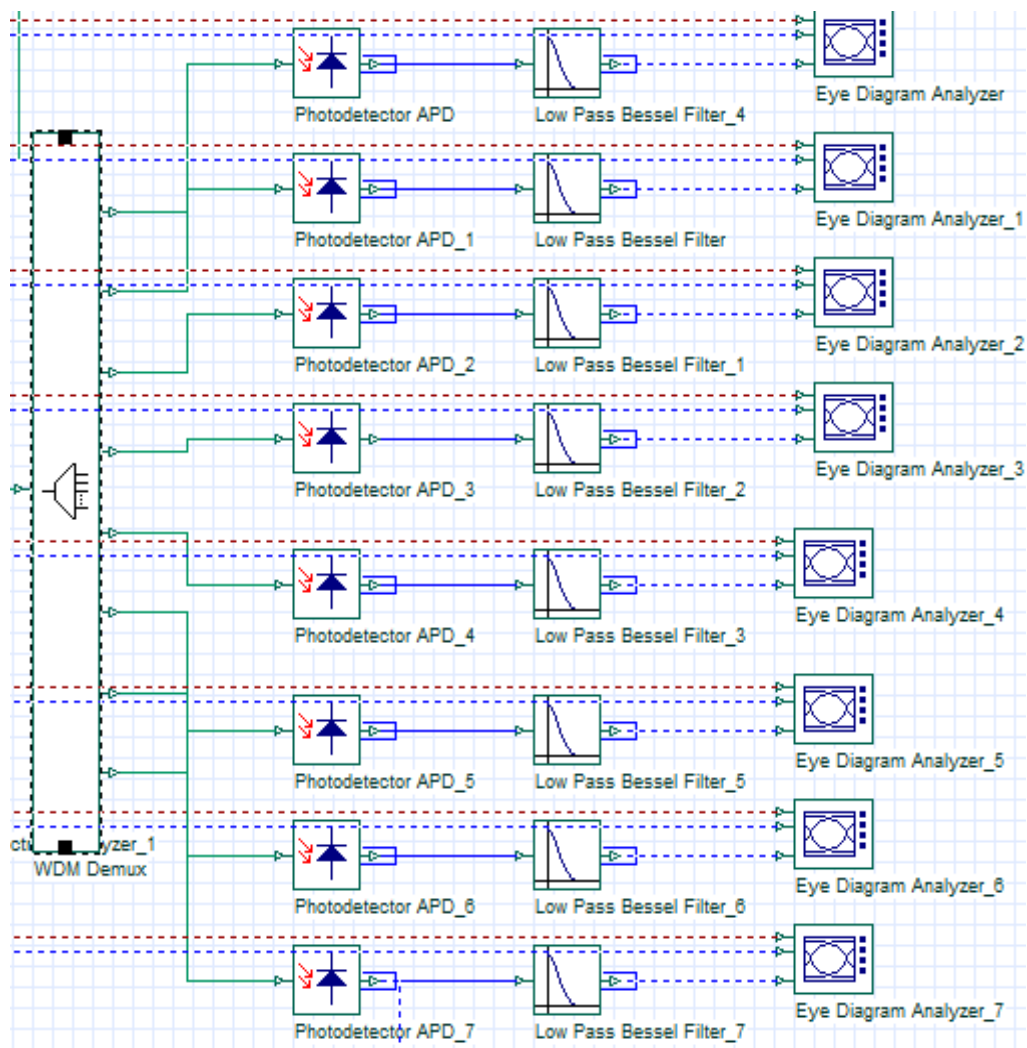
Le photodétecteur utilisé est une photodiode APD. Les paramètres de cette photodiode sont : une sensibilité égale à 1 A/W, un courant à l'obscurité de l'ordre de 10 nA. La sensibilité  $S$  reliant la puissance lumineuse  $P_{opt}$  au photo courant  $I_{ph}$ , qui augmente avec le courant de sortie  $I_{ph}$  de la photodiode est :

$$I_{ph} = S \cdot P_{opt}$$

IV. 5

Après conversion électrique, un filtre de Bessel passe bas, laisse passer que le signal information. Sa fréquence de coupure est égale à :  $f_c = 0.75 \cdot db$

Le partie de réception de la liaison optique est illustrées dans la figure IV.18.



**Figure IV. 18:** Partie de réception de la liaison optique.

La puissance du canal est contrôlée à l'aide de l'appareil de mesure de la puissance optique d'OptiSystem. La puissance de chaque canal est d'environ -13 dBm au niveau du détecteur APD. -13 dBm est beaucoup plus élevée que la puissance minimale (-33 dbm) requise pour détecter le signal avec un BER de  $10^{-12}$ . La sortie du wattmètre optique est illustrée dans la figure IV.19. Les performances de chaque canal sont analysées par le diagramme de l'oeil (Figs. 20-27)

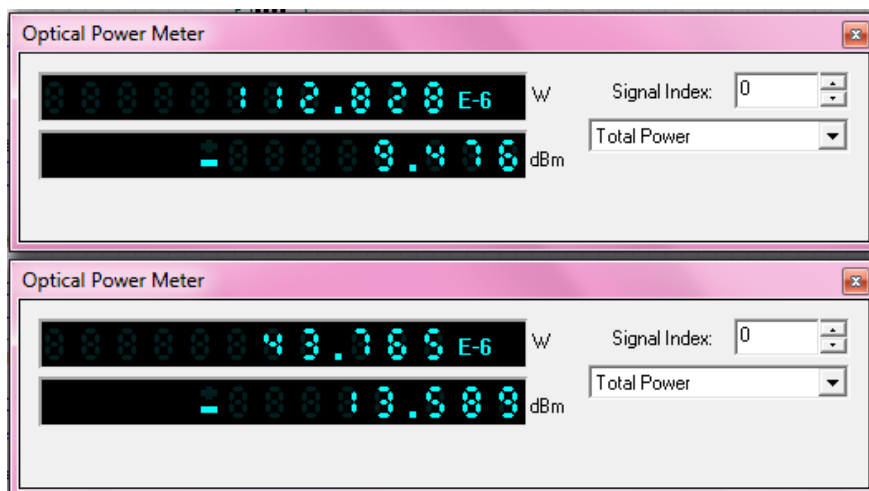


Figure IV. 19: Puissances de deux canaux au niveau du détecteur APD.

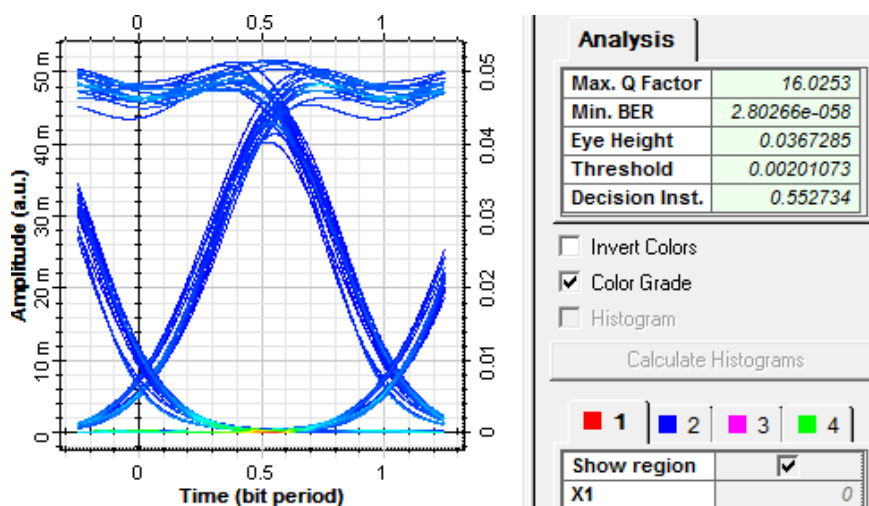


Figure IV. 20: Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 1

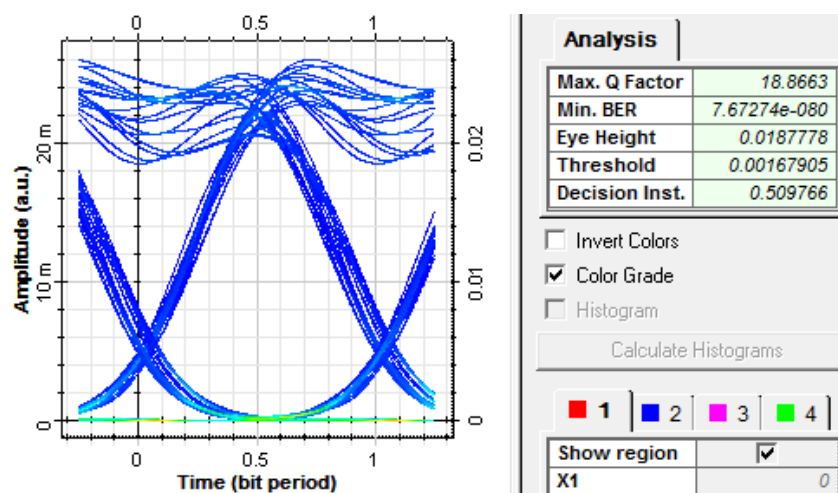


Figure IV. 21 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 2

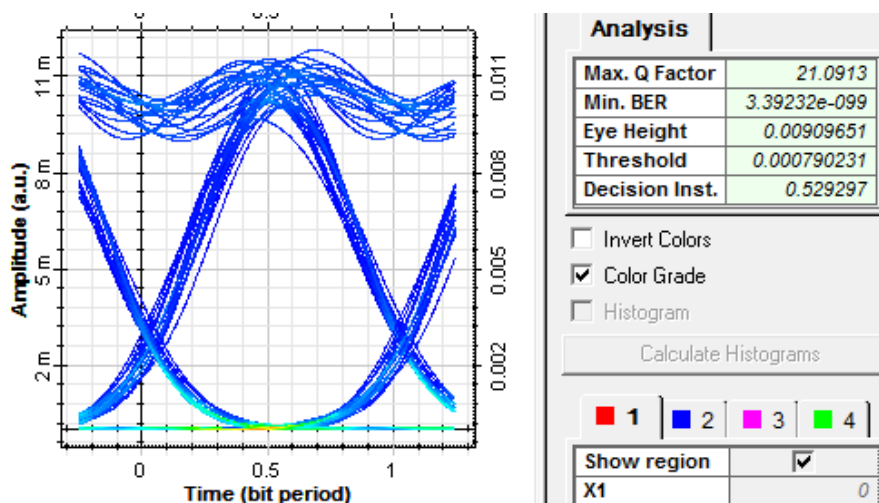


Figure IV. 22 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 3

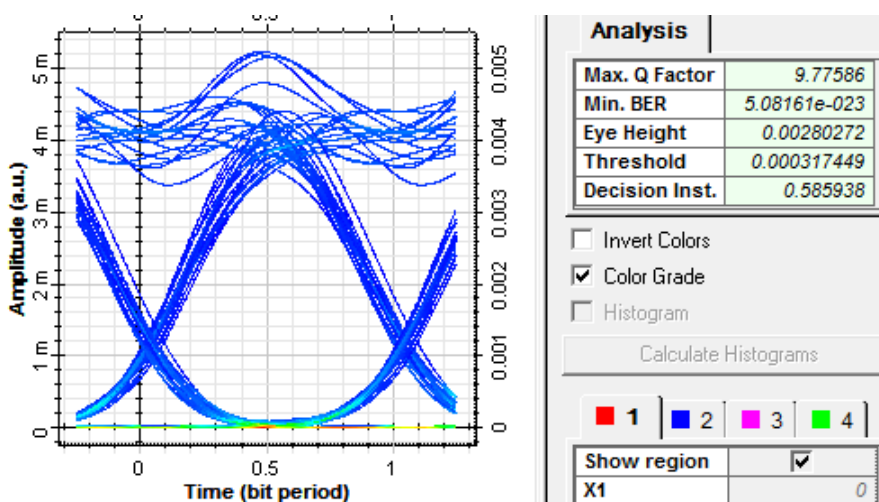


Figure IV. 23 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 4

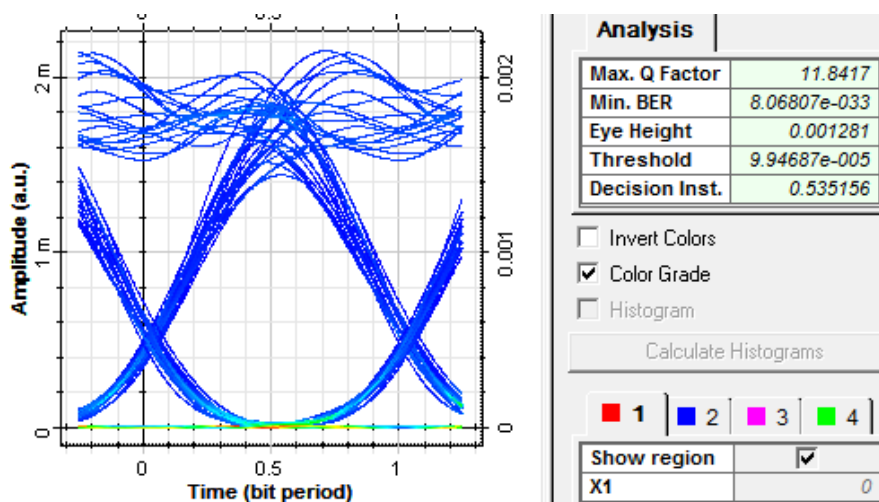


Figure IV. 24 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 5

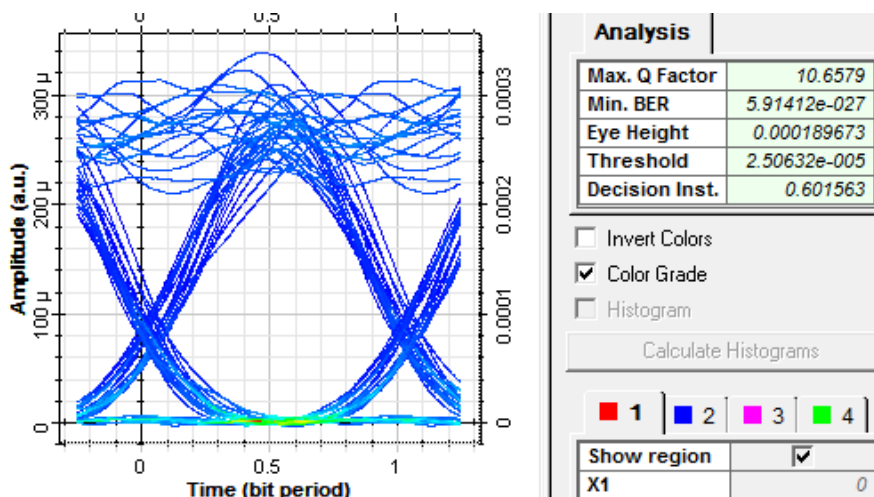


Figure IV. 25 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 6

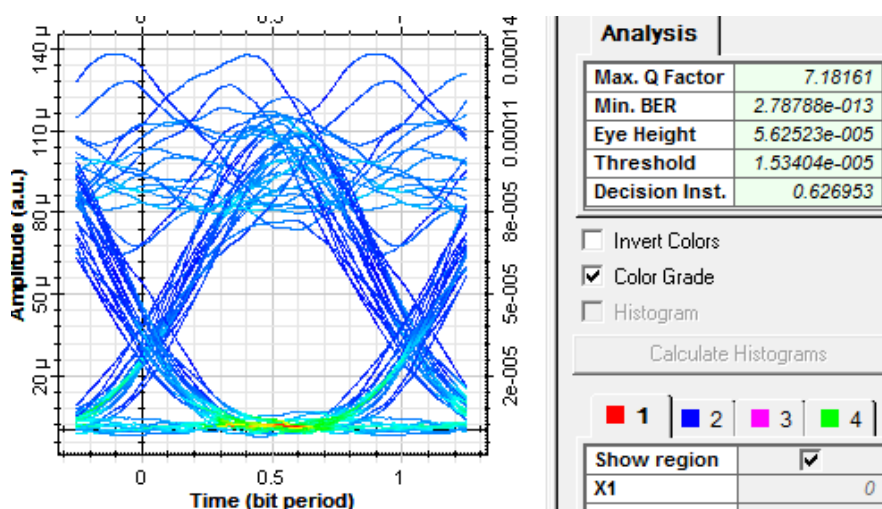


Figure IV. 26 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 7

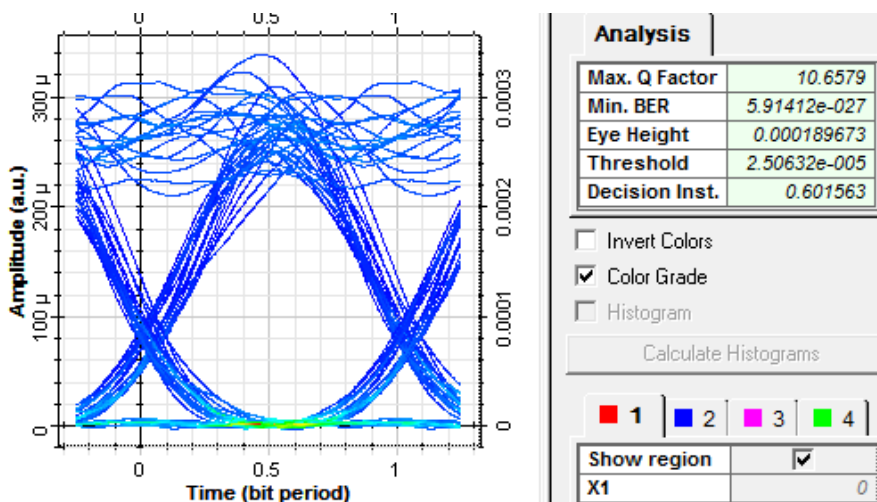


Figure IV. 27 : Diagramme de l'œil pour l'utilisateur numéro 8

Une ouverture claire de Diagramme de l'œil sur les figures ci-dessus indique que le signal a été transmis avec succès via le lien conçu. Le BER du récepteur est de  $2,80266^{-58}$ , ce qui est meilleur que le BER minimum requis de  $10e^{-12}$  pour une transmission de qualité. Le BER était considérablement inférieur au seuil maximal car la puissance reçue est considérablement supérieure à la sensibilité minimale de l'APD.

#### IV.7.4 Effets de non-linéarité des fibres

Le système a été simulé sans tenir compte des effets non linéaires des fibres optiques et en tenant compte de ces effets. Le spectre du signal optique multiplexé à la fin de la première tranche de la fibre avec des effets non linéaires et le spectre avec des effets non linéaires sont présentés dans Fig IV.28. Des composantes de fréquence supplémentaires ajoutées sont visibles dans le spectre.

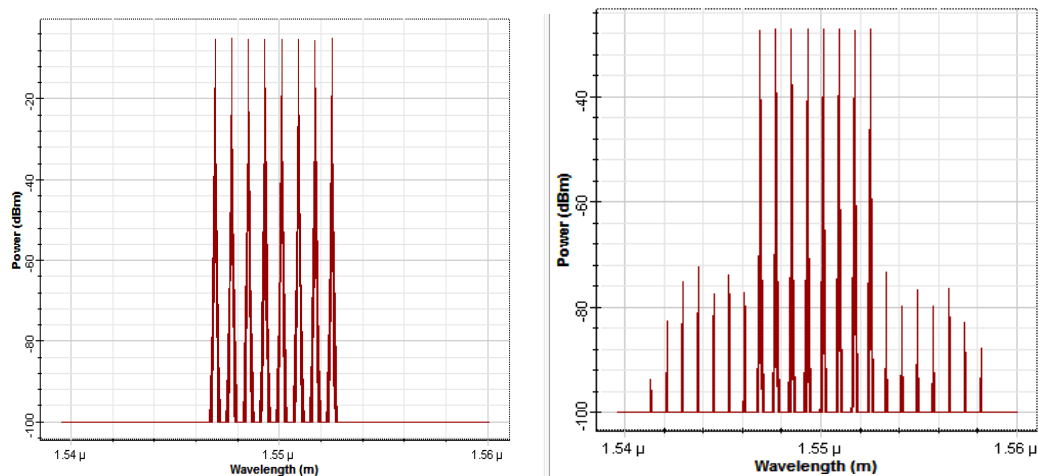


Figure IV. 28: Spectres sans et avec effets non linéaires

Le diagramme de l'œil sans et avec effets non linéaires est représenté dans Fig IV.29.

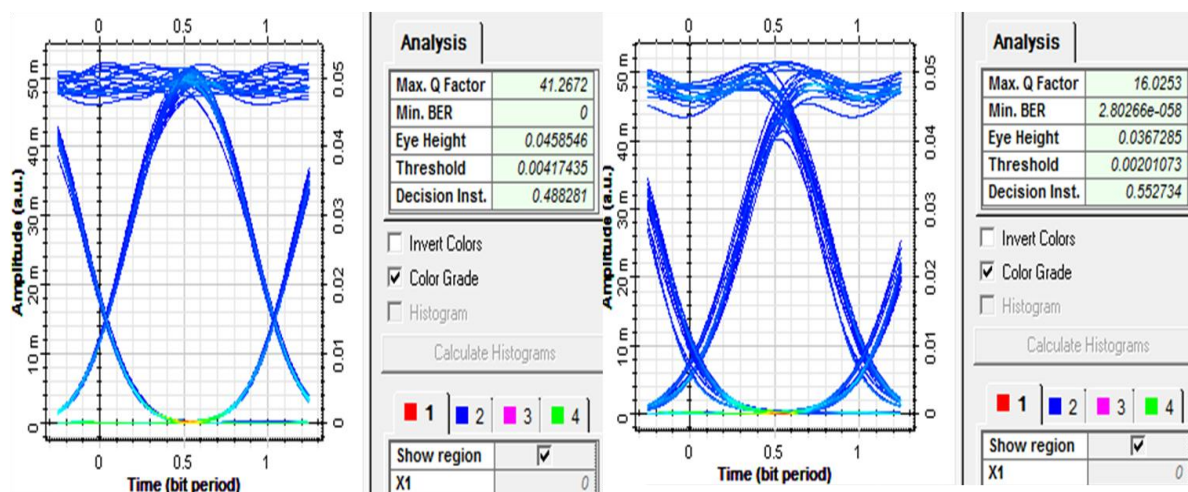
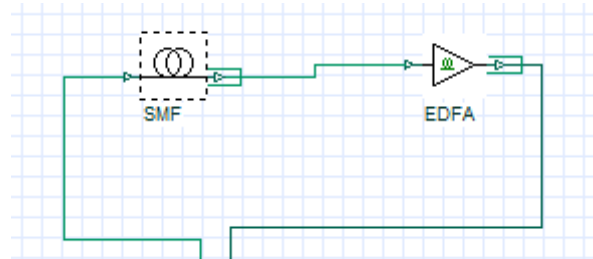


Figure IV. 29: Diagramme de l'œil sans et avec effets non linéaires

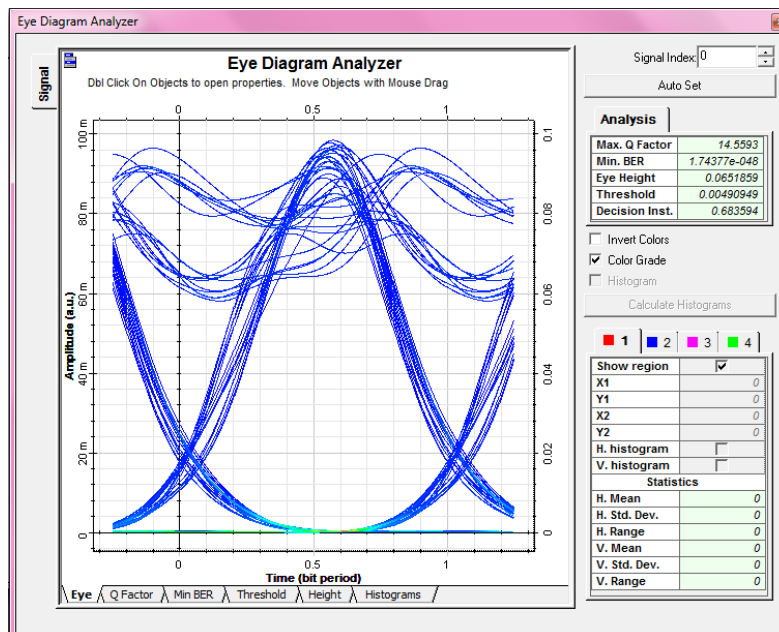
### IV.7.5 La dispersion

Due à la distance parcourue, on aura besoin de compenser la dispersion ; cette technique est considérée comme meilleure solution permettant de minimiser les pertes introduites par la dispersion chromatique.



**Figure IV. 30:**Schéma de simulation de la liaison DWDM avec EDFA et sans DCF.

Afin d'étudier les effets de l'ajout d'une compensation de dispersion (DCF) dans le montage, le système a été simulé sans DCF (voir Figure IV.30). Le diagramme de l'œil du canal 1 est illustré dans la figure IV.31 pour une distance maximale de 416 km et un débit 40Gbps.



**Figure IV. 31 :** Diagramme de l'œil du canal 1 sans DCF

Les performances du système se sont dégradées sans compensation de dispersion au-delà 416 km.

#### IV.7.6 Influence du débit binaire

Il faut choisir un débit suffisamment élevé pour envoyer le maximum d'informations mais pas trop élevé pour qu'il n'y est pas de saturation au niveau de la fibre. Le tableau suivant montre les résultats de simulation du facteur de qualité et du BER en fonction du débit binaire avec une distance de 936 Km.

Débit	Q factor	BER
8 Gbps	185,576	0
24 Gbps	25,7983	$2,77704e^{-147}$
40 Gbps	16,0253	$2,80266e^{-058}$
48 Gbps	5,69898	$5,04198e^{-009}$
56 Gbps	4,93806	$3,46758e^{-007}$
64 Gbps	4,61846	$1,48885e^{-006}$

**Tableau IV. 9 :** Influence du débit binaire

D'après le tableau IV.9 on constate que plus le débit binaire d'émission est grande plus le facteur de qualité diminue à cause des pertes d'informations qui se produisent à l'intérieure de la fibre dus aux phénomènes indésirables comme la dispersion modale et chromatique.

#### IV.7.7 Influence de la longueur de la fibre optique

La longueur de la fibre optique a une grande influence sur la qualité de la transmission et sur le facteur de qualité, pour cela on va augmenter au fur et à mesure la longueur de la fibre à 40 Gbit/s , le tableau suivant montre les résultats de la simulation pour différentes distances.



longueur de la fibre	Q factor	BER
200 km	38,3636	$1,77864e^{-332}$
400 km	20,2332	$5,76868e^{-141}$
600 km	19,832	$5,21018e^{-088}$
800 km	18,8352	$1,25172e^{-079}$
900 km	16,0235	$2,80266e^{-058}$
1000 km	4,11564	$1,77585e^{-005}$
1100 km	0	1

**Tableau IV. 10 :** Influence de la longueur de la fibre optique

D'après le tableau IV.10 on constate que plus la longueur de la fibre est grande plus le facteur de qualité diminue à cause des pertes d'informations qui se produisent à l'intérieure de la fibre dus aux phénomènes indésirables comme la dispersion modale et chromatique.

La distance limite et le débit maximal de notre chaine de transmission à DWDM sont 936 km et 40 Gbit/s respectivement. Au-delà de ces limites, notre système n'assure pas la transmission de données.

## IV.8 Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté et discuté les résultats d'étude par simulation numérique d'une chaîne de transmission sur fibre Optique à DWDM. En utilisant le logiciel OPTISYSTEM. On a étudié les paramètres de performance du système tels que le BER, le facteur Q. On a obtenu par simulation un débit maximal de 40 Gbits/s et une distance de 936 km. Les résultats indiquent qu'on a obtenu un très bon facteur de qualité et un taux binaire

plus de  $2,80266e^{-58}$  qui est inférieure à la valeur admise en télécommunications optiques (BER =  $10^{-12}$ ) ce qui exprime que la transmission du signal est accomplie avec succès.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

L'évolution des communications optiques a permis aux réseaux de télécommunications d'atteindre un niveau de performances extraordinaires et a ouvert les portes devant l'apparition de nouvelles disciplines qui visent l'amélioration de l'existant et la création de nouveaux dispositifs pour la transmission et le traitement du signal optique.

Des concepts de base et méthodes de conception du multiplexage par division de longueur d'onde dense moderne (DWDM) des liaisons de communication optiques ont été étudiées dans ce projet. Les limites des performances de ces systèmes de communication à ondes lumineuses de grande capacité a été étudiée et les méthodes pour compenser ces pertes ont également été discutées.

Le système de communication longue distance WDM (900 km) que nous avons simulé par Optisystem a été en mesure de transmettre avec succès des données avec un taux de 40 Gbits/s pour 8 canaux transmettant chacun à un débit de 5 Gbps.

Comme résultats, la distance maximale qui a été aboutie avec la présence de l'atténuation et de la dispersion chromatique du signal optique transmis, est égale à 936 km, le BER égale  $2,80266e^{-58}$  et le facteur Q égale 16,0235, la distance maximale qui a été aboutie sans la DCF est égale à 416 km, le BER égal  $1,74e^{-48}$  et le facteur Q égal à 14,55. on trouve que la puissance du signal au niveau du détecteur est égale -13 dBm est bien supérieure à la sensibilité de l'APD (-35dBm). Ceci est dû à l'amélioration de cette chaîne de transmission à travers l'insertion d'une fibre optique DCF et un amplificateur optique de ligne, type EDFA.

## Références

- [1] ItegaretsHalim , Rezkellah Nadir, « Optimisation des paramètres d'une liaison à fibre optique » Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en électronique, option: automatique, université Béjaia, 2015,p1,p12.
- [2] REDJDAL Kaci, «Etude d'une chaîne de télécommunication optique » Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, université Béjaia, 2013,p3-6,p19.
- [3] Nassima Boudrioua, « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD », thèse de doctorat en électronique, Université Paul Verlaine – Metz, 2007, p9, p11, p37, p41.
- [4] Jean-Louis Verneuil, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », thèse de doctorat en télécommunication Hautes Fréquences et Optique, Université de Limoges, 2003, p26, p65.
- [5] Wassila BERROUANE, «Etude de conception d'une chaîne de transmission optique à très haut débit à base de semi-conducteur du type III-Nitrides », thèse de doctorat en Réseaux Architecture et Multimédia, université SIDI BEL ABBES, 2018, p64 , p80.
- [6] Djellouli Mohamed,\_Hamouda Abdelmadjid, « L'amplification optique et son intérêt majeur dans les réseaux des télécommunications», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, 2016, Université Dr. Tahar Moulay- SAIDA, 2016, p7, p19, p22.
- [7] HADJERES Ismail, Noura Imad, «Etude et simulation de la technique CDMA appliqué aux transmissions optiques utilisant les réseaux de Bragg», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2016.
- [8] Medjdoub Fadila, « Optimisation par la Simulation Système d'une Chaîne de Transmission Numérique par Fibre Optique Haut Débit », Mémoire de Magister en Télécommunications, Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, 2010, p7, p29, p38.



[9] BENNAT Mohammed, « Effet de la dispersion et la modulation direct sur une liaison DWDM », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2018, p9, p10, p15.

[10] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre\\_optique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique)

[11] [https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode\\_8.html](https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_8.html)

[12] FARHAOUI Fatima Zohra, ZAIDI Fatima Zohra, «Etude et Simulation d'une Chaîne de Transmission Numérique sur Fibre Optique Haut Débit », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Dr. Tahar Moulay- SAIDA, 2017, p3,p 17, p30.

[13] Sarah Benameur, «La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable», », thèse de doctorat en électronique Optique / photonique. Université de Limoges, 2015, p41.

[14] Benzerdjeb Choukri ,Selka soufyane , « Encodage de l'amplitude spectrale pour OCDMA », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen,2013, p4, p17, p27.

[15] <https://www.tpelaser.wordpress.com>

[16] BENSADDEK Yasmin, OULD KADA Ikram, «Etude et simulation d'une chaîne de transmission optique avec le multiplexage en longueur d'onde WDM pour un débit de 40 Gbps », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Dr. Tahar Moulay- SAIDA, 2018.

[17] Mathieu LEFRANÇOIS. «Etude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 gbit/s», thèse de doctorat de l'université paris-sud . Présentée le 6 décembre 2007, p35, p69.

[18] BEDOUI Mohamed Amine, HORRI Omar, «Régénération tout-optique par similariton du signal OTDM à très haut débit», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université 8Mai 1945, Guelma, 2019, p10.

[19] Victor Girardin, «Etude et modélisation d'un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio sur fibre de signaux ULB aux fréquences centimétriques. Simulation système et caractérisation d'une liaison radio sur fibre à modulation externe », Electronique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016.



- [20] CHEDALA Latra & LABADI Hana, «Variantes de Format RZ et NRZ destinées aux systèmes de transmission optiques à haut débit», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2018, p22, p27.
- [21] RAHIL Kamilia, TOUTOU Thinhinane, «Analyse des performances des codes SAC-OCDMA dans la liaison de télécommunications optiques», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, université Béjaia, 2019, p7, p9.
- [22] MELLOUK Abdellatif et ZIANI Oualid Farid, «Analyse des performances d'un système de communication optique en utilisant différents canaux : FSO, OWC et SMF», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2017, p12.
- [23] BILLAMI Hanane, BENDAHMANE Raouida, «Etude d'un réseau optique ADM 10 Gbit/s », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2013, p8, p9.
- [24] HAMCHAOUI Massinissa, AMARA Serina, «Etude d'un système FTTH (Fiber To The Home) », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, université Béjaia, 2019.
- [25] Labeled Lyamine Nour El Islam, «Contribution par simulation aux différentes sources de bruits dans les détecteurs optiques », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2019.
- [26] Eric Cassan, « Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples», IEF, Université Paris-Sud Orsay, juin 2003.
- [27] DJEHICHE Hanane, TABET Yasmine, « Etude et simulation d'un réseau optique de transmission DWDM d'un réseau dorsal », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en Electronique option traitement de l'information et systèmes électroniques, université de BLIDA 1, 2015, p23.
- [28] Mohammed Amine MOKRETAR , Nabil NOURA, «Étude et Conception d'un Système de Transmission Optique en utilisant la Technologie WDM 4 x 20 Gbit/s», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, université de HASSIBA BENBOUALI de chlef, 2019, p7.

[29] BOULILA Rachid, HAUCHE Salim, «Etude des différents multiplexages dans les liaisons par fibre optique», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en Electronique option Réseaux & Télécoms, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2012, p41.

[30] Julien MAURY, «Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique », thèse de doctorat en Électronique des hautes fréquences et Optoélectronique, Université de Limoges, 2003, p23.

[31] KAHLOUCHE Ahmed, «Initiation à l'utilisation du logiciel OptiSystem», Travaux pratique de master en Electronique option STLC, Université de Mohamed Boudiaf de M'sila, 2019.