

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة 1

Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك

Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Présenté par

GRINOU Ali

&

TAAZOUNT Mohamed Lokman

# Etude et simulation d'un système de communication optique DWDM

Proposé par : Mr. ABED Ahcène

Année Universitaire 2021-2022

*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 *Mr ABED Alcène* pour la qualité de son encadrement et pour tous les conseils précieux qu'il nous a prodigués.*

## *Dédicaces*

*Tout d'abord, nous rendons grâce à Dieu pour nous avoir aidés à réaliser ce présent travail.*

*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 et ma famille*

*Tous mes amis zakı choukı sofiane faycal chaaraf walid arbi takı younes*

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

*Taazount mohamed lokman*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents Pour leur soutien, leurs sacrifices et tous les efforts qu'ils ont faits  
pour moi.*

*Amon frère et ma famille et Tous mes amis zakı sofiane wael cherif billal walid*

*GRINOU ALI*

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

---

## ملخص :

يمكن أن يتأثر أداء نظام إرسال الألياف الضوئية من نوع SMF بشكل أساسي بسبب توهين وتشتت الإشارة الضوئية في وقت إرسال بيانات اليوم ، أصبح تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي الكثيف (DWDM) ضرورياً لزيادة معدل إرسال الخدمات وأيضاً زيادة استغلال عرض النطاق الترددي للألياف البصرية.

من ناحية أخرى، تم اقتراح معلومات الارتباط البصري DWDM في المحاكاة بموجب برنامج OptiSystem ، مثل معدل خطأ (BER)، وعامل الجودة عامل (Q) ومخطط العين وفقاً لمسافة الارتباط البصري ومعدل الإرسال في وجود ظروف التوهين والتشتت اللوني للإشارة الضوئية المرسلة.

## كلمات المفاتيح:

SMF ، DWDM ، برنامج OptiSystem ، أداء BER وعامل الجودة Q ، مخطط العين.

---

## Résumé:

Les performances du système de transmission par fibre optique SMF peuvent être principalement perturbées par l'atténuation et la dispersion du signal optique au moment de transmettre les données de signal.

Aujourd'hui, le multiplexage par répartition en longueur d'onde dense (DWDM) devient nécessaire pour augmenter le débit de transmission des services et également augmenter l'exploitation de la bande passante de la fibre optique.

D'autre part, les paramètres de la liaison optique DWDM proposée dans la simulation sous le logiciel OptiSystem, tels que le taux d'erreur binaire (BER), le facteur de qualité (facteur Q) et le diagramme de l'œil sont analysés en fonction de la distance de liaison optique et le débit de transmission en présence des conditions d'atténuation et de dispersion chromatique du signal optique transmis.

## Mots clés :

SMF, DWDM, logiciel OptiSystem , performances de BER et facteur de Qualité , le diagramme de l'œil .,

---

## Abstract :

The performance of the optical fiber SMF in the transmission system can be mainly disturbed by the attenuation and dispersion of the optical signal at the time of transmitting the signal data.

Today, Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) becomes necessary to increase the transmission rate of services and also increase the bandwidth exploitation of fiber optics.

On the other hand, the parameters of the DWDM optical link proposed in the simulation under the OptiSystem software, such as bit error rate (BER), quality factor (Q factor) and eye diagram are analyzed according to the link distance. optic and the transmission rate in the presence of the conditions of attenuation and chromatic dispersion of the transmitted optical signal.

## Keywords:

SMF, DWDM, OptiSystem software, BER performance and Quality factor, the eye diagram.

---

# Table des matières

<b>Introduction Générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1      <i>  </i> Système de transmission par fibre optique.....</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction.....	4
1.2 Chaîne de transmission par fibre optique .....	4
1.2.1 Bloc d'émission.....	5
1.2.2 Bloc de transmission.....	11
1.2.3 Bloc de réception.....	19
1.3 Technologies de transmission .....	21
1.3.1 Technologie PDH (plesiochronous Digital Hierarchy).....	21
1.3.2 Technologie SDH/SONET.....	22
1.3.3 Passage du SDH vers WDM .....	22
1.4 Avantages de système de transmission Optique .....	23
1.5 Conclusion .....	23
<b>Chapitre 2      <b>Technique de multiplexage en longueur d'onde (DWDM) .....</b></b>	<b>25</b>
2.1 Introduction.....	26
2.2 Multiplexage de longueur d'onde WDM.....	26
2.2.1 Principe de la WDM.....	26
2.2.2 Types de systèmes WDM .....	27
2.2.3 Comparaison entre CWDM et DWDM .....	28
2.3 Composants d'un système DWDM.....	30

2.3.1 Émetteurs/récepteurs optiques.....	30
2.3.2 Filtres Mux/DeMux DWDM.....	31
2.3.3 Multiplexeurs optique d'ajout/extraction .....	32
2.3.4 Amplificateurs optiques .....	32
2.3.5 Transpondeurs (Convertisseurs de longueurs d'onde) /OEO.....	33
2.4 Architecture et fonctionnement du système DWDM .....	34
2.5 Applications du DWDM dans un proche avenir .....	35
2.6 Avantages et inconvénients de DWDM .....	36
2.7 Conclusion .....	37
<b>Chapitre 3 Simulation sous OptiSystem .....</b>	<b>38</b>
3.1 Introduction.....	39
3.2 Présentation de logiciel de simulation OptiSym .....	39
3.2.1 Interface de l'Optisystem.....	39
3.2.2 Création et lancement d'une simulation .....	40
3.2.3 Critère de qualité d'une transmission .....	42
3.2.4 Avantages du logiciel OptiSystem .....	43
3.3 Simulation d'un système de transmission optique .....	44
3.3.1 Partie d'émission .....	44
3.3.2 Ligne de transmission .....	44
3.3.3 Partie de réception .....	45
3.4 Simulation d'un système DWDM à 8 canaux.....	46
3.4.1 Paramètres de simulation .....	47
3.4.2 Influence de la longueur de la fibre optique.....	48
3.4.3 Influence de l'amplificateur optique.....	51
3.4.4 Influence du débit binaire .....	56
3.5 Conclusion .....	59
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>60</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>61</b>

# Liste des Abréviations et acronymes

APD	: Avalanche Photo Diode
ATM	: Asynchronous Transfert Mode
BER	: Bit Error Rate
CDMA	: Code Division Multiple Acces
CWDM	: Coarse Wavelength Division Multiplexing
CATV	: Community Antenna Television
DEL	: Diode Électroluminescente
DL	: Diode Laser
DEMUX	: Demultiplexer.
DSL	: Digital Subscriber Line
DWDM	: Dense Wavelength Division Multiplexing.
EDFA	: Erbium Doped Fiber Amplifier.
EOE	: Electronique Optique Electronique
FDMA	: Frequency Division Multiple Acces
FM	: Frequency Modulation
FO	: Fibre optique.
ITU-T	: Union International des Télécommunications secteur Télécommunication.
ITU	: International Télécommunication Union.
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
GSM	: Global System Mobile
G692	: système et support de transmission, système et réseau numériques
Laser	: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
LED	: Light Emetting Diode
LAN	: Local area network
MUX	: Multiplexer
MRT	: Multiplexage a Répartition Temporelle

NRZ : Non-return to Zero  
OADM : Optical Add-Drop Multiplexer  
Optisystem : Optical Communication System Design  
PMD : Polarization Mode Dispersion  
PIN : Positive Intrinsic Negative  
PN : Positive Negative Photodiodes.  
PDH : Plesiochronous Digital Hierarchy  
QEO : Electro Optique Quadratique  
Q : Qualité de facteur  
RZ : Return-to-Zéro  
SDH : Synchronous Digital Hierarchy  
SONET : Synchronous optical network  
SMF : Single-Mode Fiber.  
TCP : Transmission Control Protocol  
TDM : Time Division Multiplexing.  
TDMA : Time Division Multiple Access.  
UIT : Union International de Télécommunication.  
UDWDM: ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing  
WAN : Wide Area Network  
WDM : Wave Length Division Multipling

# Liste des Figures

Figure 1.1 Schème synoptique d'une chaîne de transmission .....	4
Figure 1.2 LED.....	5
Figure 1.3 Principe de fonctionnement d'un MUX .....	6
Figure 1.4 Principe de la technique FDMA.....	7
Figure 1.5 Principe de la technique CDMA .....	8
Figure 1.6 Principe de la technique TDMA .....	8
Figure 1.7 Configuration-de-base-dun-amplificateur-optique-a-semi-conducteur.....	10
Figure 1.8 Schéma de principe d'un amplificateur optique à Fibre dopée à l'erbium .....	11
Figure 1.9 Structure d'une fibre optique.....	12
Figure 1.10 Schéma d'une fibre à gradient d'indice .....	13
Figure 1.11 Schéma d'une fibre à saut d'indice.....	14
Figure 1.12 Schéma d'un amplificateur de ligne .....	19
Figure 2.1 Schème de principe de fonctionnement WDM .....	27
Figure 2.2 Différence entre CWDM et DWDM.....	29
Figure 2.3 Schéma de fonctionnement d'un MUX/DEMUX DWDM bidirectionnel .....	31
Figure 2.4 Schéma de fonctionnement d'OADM.....	32
Figure 2.5 Schéma de fonctionnement de transpondeur .....	33
Figure 2.6 Architecture de système DWDM.....	34
Figure 3.1 Bibliothèque de logiciel OptiSystem.....	39
Figure 3.2 Editeur de layout .....	40
Figure 3.3 Fenêtre de description .....	40
Figure 3.4 Création de nouveau fichier.....	40
Figure 3.5 WDM MUX.....	41
Figure 3.6 Interface de définition du WDM MUX .....	41
Figure 3.7 Fenêtre montre les procédés de lancement de la simulation.....	41
Figure 3.8 Affichage de Diagramme de l'œil d'un signal.....	42
Figure 3.9 Schéma d'une liaison optique point à point.....	44
Figure 3.10 Partie d'émission de la liaison optique.....	44
Figure 3.11 Partie de transmission de la liaison optique.....	45
Figure 3.12 Partie de réception de la liaison optique .....	45
Figure 3.13 Eye Diagram de sa simulation .....	45
Figure 3.14 Schéma du système de communication à DWDM 8 canaux .....	46
Figure 3.15 Eye diagramme de canal 1 .....	48
Figure 3.16 Signal obtenu avec une distance de fibre optique $L = 40 \text{ Km}$ .....	48
Figure 3.17 Signal obtenu avec une distance de fibre optique $L = 70 \text{ Km}$ .....	49

Figure 3.18 Signal obtenu avec une distance de fibre optique $L = 100 \text{ Km}$ .....	49
Figure 3.19 Signal obtenu avec une distance de fibre optique $L = 130 \text{ Km}$ .....	50
Figure 3.20 Facteur de qualité Q en fonction de la longueur de F.O .....	50
Figure 3.21 ligne de transmission optique.....	51
Figure 3.22 Spectre d'un canal optique individuel avant et après l'amplification.....	51
Figure 3.23 Diagramme de l'œil de canal 130 Km après l'amplification .....	52
Figure 3.24 Diagramme de l'œil de canal 1 après l'amplification et avec une longueur de fibre $L = 150 \text{ Km}$ .....	52
Figure 3.25 Diagramme de l'œil de canal 1 après l'amplification et avec une longueur de fibre $L = 180 \text{ Km}$ .....	53
Figure 3.26 Diagramme de l'œil de canal 1 après l'amplification et avec une longueur de fibre $L = 200 \text{ Km}$ .....	53
Figure 3.27 Diagramme de l'œil de canal 1 après l'amplification et avec une longueur de fibre $L = 230 \text{ Km}$ .....	54
Figure 3.28 Facteur de qualité Q en fonction du la longueur de FO.....	54
Figure 3.29 Ligne de transmission optique avec deux EDFA .....	55
Figure 3.30 Ligne de transmission optique avec loop control.....	55
Figure 3.31 Diagramme de l'œil pour la première et la deuxième méthode .....	55
Figure 3.32 Diagramme de l'œil du canal 1 à 8 Gbit/s .....	56
Figure 3.33 Diagramme de l'œil du canal 1 à 40 Gbits/s.....	56
Figure 3.34 Diagramme de l'œil du canal 1 à 64 Gbits/s.....	57
Figure 3.35 Diagramme de l'œil du canal 1 à 80 Gbits/s.....	57
Figure 3.36 Diagramme de l'œil du canal 1 à 120 Gbits/s.....	58
Figure 3.37 Facteur de qualité Q en fonction du débit binaire .....	58

# Liste des Tableaux

Tableau 2.1 Comparaison entre les techniques de multiplexage WDM	28
Tableau 3.1 Paramètres de simulation pour le système	47
Tableau 3.2 Canaux du DWDM utilisés dans le système	47
Tableau 3.3 Influence de la longueur de F.O	50
Tableau 3.4 Influence de la longueur de la fibre optique	54
Tableau 3.5 Influence du débit binaire	58

# **Introduction Générale**

Les progrès réalisés dans le domaine des télécommunications sont importants et rapides et elles ont atteint un niveau de performances extraordinaires et ont 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

La capacité des systèmes WDM a récemment augmenté d'une manière incroyable, en raison de la multiplication du nombre de canaux. Pour atteindre de plus grandes capacités, il faudra augmenter le débit binaire par canal, rapprocher les canaux et élargir la bande passante optique exploitée. DWDM n'a pas encore atteint ses limites, De nouvelles techniques se développant vont permettre de multiplier encore plus les capacités des systèmes optiques.

L'étude de ce projet a comporté trois chapitres,

Dans le premier chapitre nous avons rappelé les notions de base d'un système de transmission par fibre optique, Quelles sont ses parties principales et de quoi est composée chaque partie de ce système (les trois parties sont l'émission, la réception et la ligne de transmission), en suite nous avons mentionné les technologies de transmission comme PDH SDH et WDM et en a terminé par les Avantages de système de transmission Optique

Deuxième chapitre est dédié pour la technique de multiplexage en longueur d'onde DWDM, en a commencé tout d'abord par définir la technique de multiplexage en longueur d'onde WDM et ces différents types (DWDM, UDWDM, DWDM), après Nous avons parlé profondément de la DWDM ces composants, principe de fonctionnement, l'architecture, ces applications et le futur de cette technique on termine par ces avantages et inconvénients

Le dernier chapitre est une partie expérimentales de notre projet dans lequel nous avons simulé un système de transmission optique à 8 canaux par la technique de multiplexage DWDM avec le logiciel OptiSystem.

# ***Chapitre 1***

## *Système de transmission par fibre optique*

## 1.1 Introduction

Le réseau de télécommunication est l'ensemble des moyens techniques mis en œuvre pour permettre à deux usagers un échange de données disponible et fiable quel que soit la distance qui les séparent en un délai aussi court que possible et avec un cout raisonnable.

La transmission optique est devenue une technique courante et éprouvée dans le domaine des télécommunications. La fibre optique est devenue un des moyens le plus fiable et le plus économique lorsqu'il s'agit de transporter des débits élevés sur des grandes distances.

Les system de transmission optiques constituent aujourd'hui l'infrastructure de base des systèmes de communications modernes, Comme tous les systèmes de communications, les liaisons optiques se basent sur des blocs fondamentaux pour effectuer le transfert des données, dans ce chapitre nous allons les définir et expliquer l'ensemble du système et des blocs.

## 1.2 Chaîne de transmission par fibre optique

La transmission optique est la diffusion des données entre deux extrémités, par un Signal lumineux en utilisant un canal lumineux. Tout système optique se base sur trois blocs nécessaires pour assurer le transfert des données :

Un bloc d'émission, un bloc de transmission et un bloc de réception.

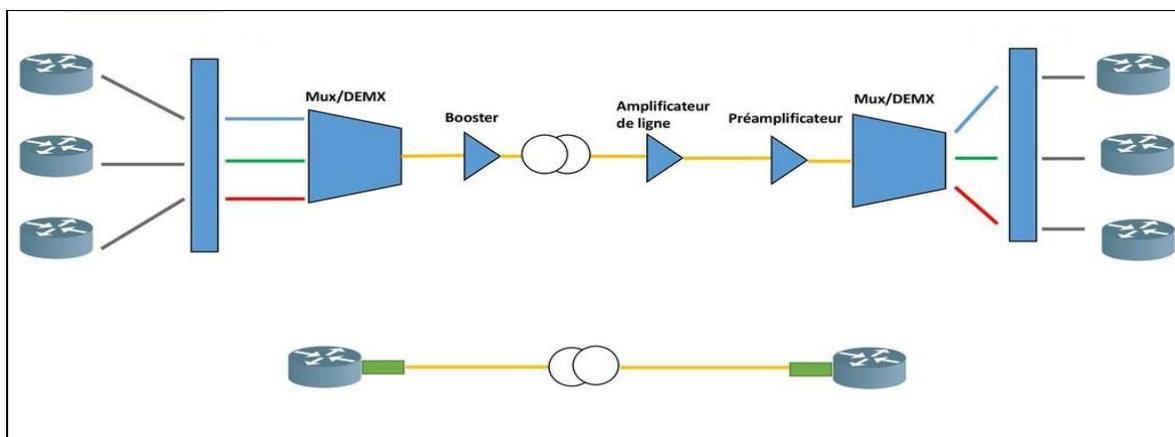


Figure 1.1 Schème synoptique d'une chaîne de transmission

### 1.2.1 Bloc d'émission

Ce bloc est constitué principalement d'une source optique et d'un modulateur, son rôle est de délivrer un signal à la fibre optique.

#### A. Sources optique (*Laser / Diode*)

Dans le domaine des télécommunications optiques, deux types de sources lumineuses utilisées : les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes LASER.

##### ✓ Diodes électroluminescentes (LED, Light Emitting Diode) :

Une diode électroluminescente (DEL en français, ou LED, en l'anglais : light emitting diode) est un dispositif optoélectronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique.

Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens et produit un rayonnement monochromatique ou polychromatique non cohérent par conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse.



Figure 1.2 LED

##### ✓ LASER

Le laser signifie Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. C'est une amplification de la lumière et une mise en cohérence des ondes lumineuses. Le résultat est un rayonnement hautement énergétique qui dégage une assez d'énergie.

La diode LASER se base sur trois processus fondamentaux pour effectuer la génération de la lumière. Ces processus sont l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. Pour obtenir l'effet LASER, il est nécessaire de favoriser l'émission stimulée ou empêcher les deux autres processus.

### **B. Modulateur optique**

La modulation du signal à l'intérieur de la fibre optique est essentielle. En effet, cela permet deux choses :

- Générer l'information binaire à partir d'un signal physique.
- Traduire l'information binaire en niveau de puissance du signal lumineux.

Le procédé de modulation peut être de deux types différents le type direct, et le type externe.

#### **✓ Modulation directe**

La modulation directe peut être assimilée à une technique de modulation de type "classique". En effet, on va ici moduler directement le courant injecté en entrée de la diode. A la suite de cette modulation de courant, l'intensité de la lumière produise par la diode sera affectée, Plus le courant reçu par la diode est important, plus l'intensité lumineuse qu'elle délivrera sera puissante. Cependant, cette méthode de modulation comporte un inconvénient majeur.

La modulation d'amplitude du courant affecte en effet la fréquence du signal émis. C'est pour cette raison qu'en général elle est peu utilisée, au profit de la modulation externe.

#### **✓ Modulation externe**

La modulation externe est-elle légèrement plus subtile. En effet, ici le courant injecté à la diode restera constant, mais on va utiliser un modulateur externe afin de parvenir à moduler le signal lumineux. [1]

### **C. Multiplexeur**

Le multiplexage est un ensemble de techniques qui permet la transmission simultanée des signaux multiples sur un seul support de transmission.

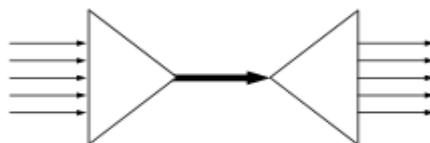


Figure 1.3 Principe de fonctionnement d'un MUX

On distingue 4 techniques principales de multiplexage :FDMA, TDMA, CDMA et WDM

#### ✓ **FDMA : Fréquence Division Multiple Access**

FDMA, est une technique d'accès multiple par répartition en fréquence. C'est une technologie par laquelle la bande passante totale disponible pour le système est divisée en fréquences. Cette division est faite entre des fréquences non superposées qui sont ensuite assignées à chaque paire communicante (2 téléphones) FDMA est principalement utilisé pour la transmission analogique.

En FDMA, tous les utilisateurs partagent le satellite simultanément mais chaque utilisateur transmet à une fréquence unique. Pour mieux comprendre cette technologie, imaginez simplement comment fonctionne la radio FM. Toutes les radios ont leurs propres bandes de fréquences et envoient leurs signaux aux fréquences uniques soigneusement assignées dans les bandes disponibles. [2]

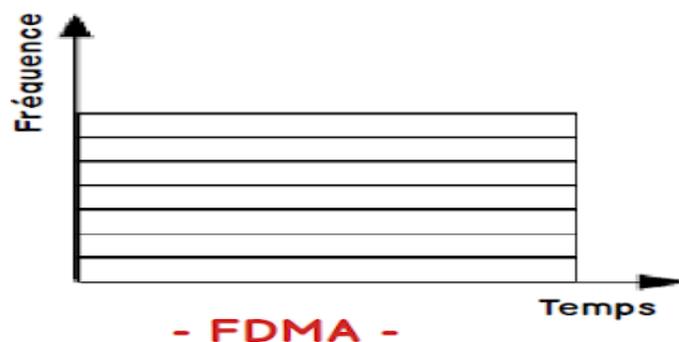


Figure 1.4 Principe de la technique FDMA

#### ✓ **CDMA : Code Division Multiple Access**

CDMA, est une technique d'accès multiple par répartition de code. Contrairement à FDMA, CDMA sépare les appels par code. Chaque bit d'une conversation est marqué avec un code spécifique et unique. Le système reçoit un appel, il alloue un code unique à cette conversation particulière, maintenant les données sont divisées en petites parties et sont marquées avec le code unique donné à la conversation dont ils font partie. Maintenant, ces données en petits morceaux sont envoyées sur un certain nombre de fréquences

discrètes disponibles pour une utilisation à tout moment dans la plage spécifiée. Le système à la fin réassemble la conversation à partir des bits codés et la renvoie. [2]

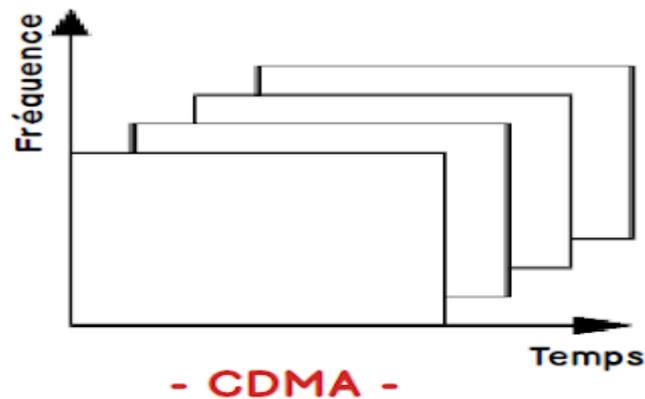


Figure 1.5 Principe de la technique CDMA

#### ✓ TDMA : Time Division Multiple Access

TDMA, est une technique d'accès multiple par répartition dans le temps. À la différence de FDMA et CDMA, dans TDMA la division des appels se produit sur la base du temps. Le système numérise d'abord les appels, puis combine ces conversations en un flux numérique unifié sur un seul canal radio. Maintenant, il divise chaque canal cellulaire en trois tranches de temps, ce qui signifie que trois appels sont mis sur une seule fréquence, puis un intervalle de temps est attribué à chaque appel pendant la conversation, un espace régulier dans un flux numérique. Les utilisateurs émettent successivement l'un après l'autre, chacun utilisant son propre intervalle de temps. Ceci permet à plusieurs stations de partager le même support de transmission (par exemple un canal de fréquence radio) tout en n'utilisant qu'une partie de sa capacité de canal.

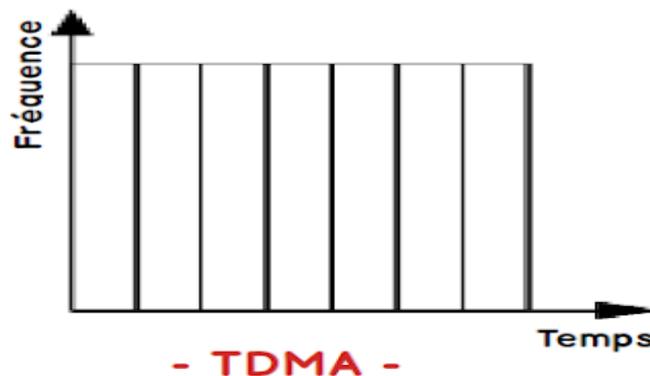


Figure 1.6 Principe de la technique TDMA

Cette technologie permet à trois utilisateurs différents d'utiliser une fréquence en même temps, TDMA achemine efficacement trois appels en même temps. Cette technologie est celle utilisée dans notre système GSM. [2]

#### ✓ **WDM : Wavelength Division Multiplexing**

Le WDM consiste à mixer plusieurs signaux optiques sur une même fibre optique pour multiplier sa bande passante. Les signaux sont ramenés par des longueurs d'ondes différentes.

### **D. Boosters**

Appelés aussi des répéteurs optoélectroniques sont insérés à des intervalles réguliers pour booster le signal optique qui tend à se dégrader. Un répéteur est constitué d'un récepteur un support électronique et d'un émetteur. Les amplificateurs optiques sont des dispositifs qui assurent l'amplification du signal tout en restant dans le domaine optique.

On va traiter prochainement deux types des boosters : Amplificateur optique à semi-conducteurs et Amplificateur optique à fibre dopée d'erbium

#### ✓ **Amplificateur optique à semi-conducteurs**

Sont à base des LAZER à semi-conducteurs, qui n'ont pas de miroirs aux extrémités, mais ils ont un revêtement antireflet dans le but de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit. De plus ils sont traversés par une lumière fournie par une source externe.

### **Fonctionnement**

La lumière incidente entre dans le circuit, elle est amplifiée, puis elle sort par l'autre bout pour être couplée dans la fibre. Idéalement, il n'y a pas de réflexion du signal vers l'amplificateur. Les pertes de couplage du faisceau incident dans l'amplificateur sont très élevées, car le diamètre du faisceau est supérieur à l'épaisseur de la couche active. En plus, le gain de l'amplificateur dépend de la polarisation de la lumière incidente.

### **Caractéristiques**

- Un gain élevé (jusqu'à 30 dB) selon le semi-conducteur, la longueur d'onde, le courant injecté et la puissance du signal incident.
- Une puissance de saturation en sortie autour de 5 - 10 mW.

- Une bande passante optique, de l'ordre de 5 THz (soit environ 40 nm autour de 1550 nm).
- Les pertes de couplage du faisceau incident dans l'amplificateur sont élevées, en raison de la supériorité du diamètre du faisceau sur l'épaisseur de la couche active d semi-conducteur.

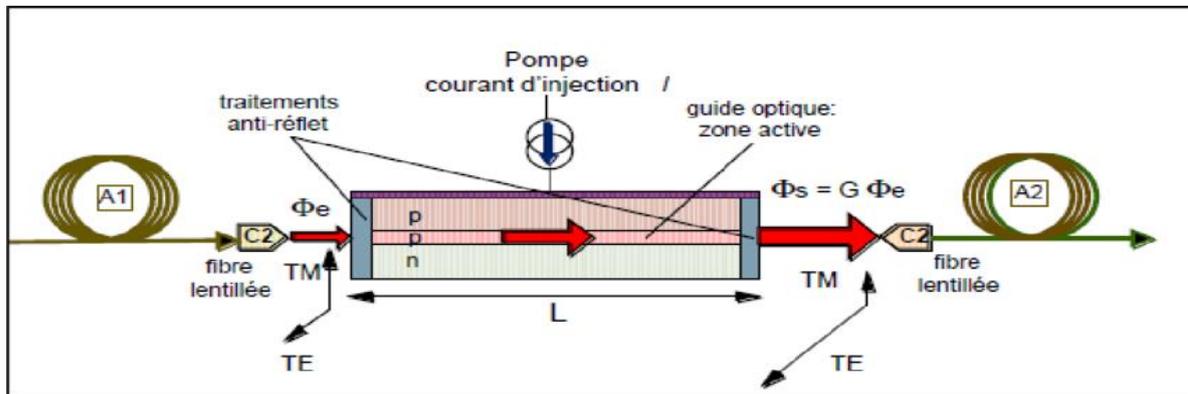


Figure 1.7 Configuration-de-base-dun-amplificateur-optique-a-semi-conducteur

### ✓ Amplificateur optique à fibre dopée d'erbium

Il comporte un morceau de fibre optique monomode dopée d'erbium, diode LAZER (source d'excitation), multiplexeur et des isolateurs.

#### Fonctionnement

La diode LAZER pompe une lumière de longueur d'onde de 980 nm ou de 1480 nm ces deux longueurs d'onde sont les mieux adaptées pour exciter les ions  $Er^{+}$  au niveau d'énergie supérieur, ce qui permet de plus les diodes lasers à des longueurs d'onde disponibles, qui sera couplé avec le signal à transmettre à l'aide de multiplexeur, celui-ci doit présenter une perte d'insertion faible aux deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système. Il est nécessaire de placer deux isolateurs, l'un à l'entrée et l'autre à la sortie afin que le dispositif s'engendre pas un effet laser.

#### Caractéristiques

- Un gain se situant dans la fourchette 25 à 45 dB
- Puissances de saturation allant de 1 à 10 mW (0 à 10 dBm).
- Le gain diminue avec la puissance d'entrée du signal, alors qu'il augmente avec la puissance de pompe.

- Le rendement, défini comme le rapport du gain (dB) à la puissance de pompe injectée dans la fibre (en mW).

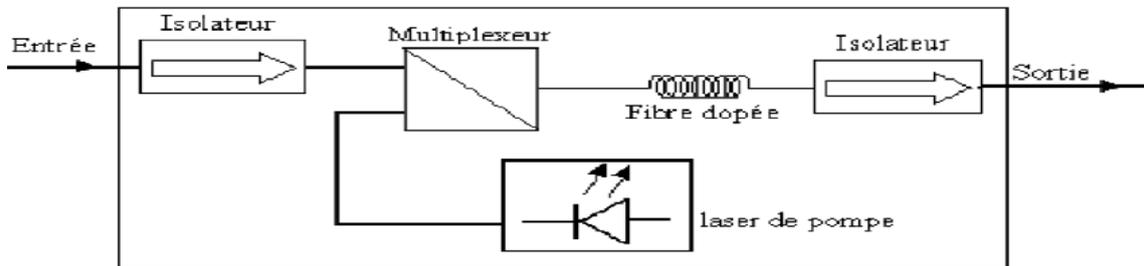


Figure 1.8 Schéma de principe d'un amplificateur optique à Fibre dopée à l'erbium

### 1.2.2 Bloc de transmission

Ce bloc sert à assurer la liaison entre le bloc émetteur et le bloc de réception. Le moyen de transmission utilisé dans un système optique est la fibre optique.

#### A. Fibre optique

Les fibres optiques sont des conducteurs de lumière. Elles se présentent sous forme de cylindres de verre ou de plastique transparent ayant généralement un diamètre de 125 microns pour les fibres en verre et un millimètre pour celles en plastique.

On les emploie dans des nombreux domaines tels que les télécommunications, les réseaux informatiques, le médical, l'automobile, l'avionique, ...

Dans le domaine de la communication, la fibre optique a été le média retenu, depuis des décennies, pour les transmissions de télécommunications de longues distances. Puis, elle a été considérée comme alternative aux câbles en cuivre pour des applications aux exigences particulières.

Désormais, les fibres optiques sont de plus en plus utilisées pour les centres informatiques (data center), le câblage des réseaux locaux des immeubles de bureaux ainsi que la desserte des domiciles des abonnés à Internet. Elles peuvent desservir l'ensemble des postes professionnels ou personnels en transportant des impulsions.

La fibre optique est composée des éléments de base suivants :

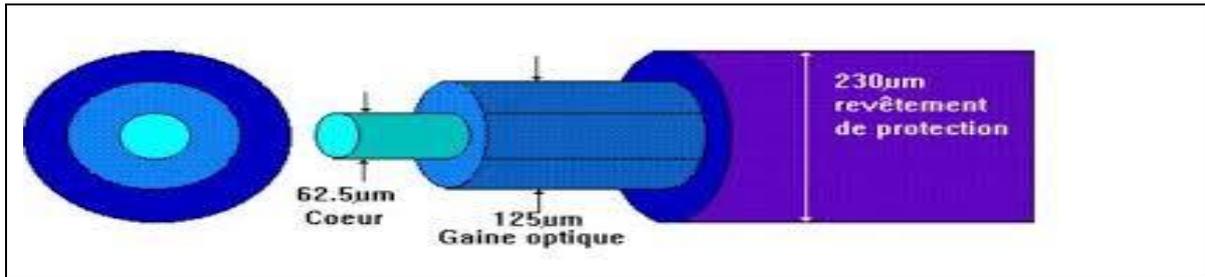


Figure 1.9 Structure d'une fibre optique

- **Cœur** : c'est dans cette zone, constituée de verre, que la lumière est guidée et se propage le long de la fibre.
- **Gaine**: couche de verre qui entoure le cœur. La composition du verre utilisé est différente de celle du cœur. L'association de ces deux couches permet de confiner la lumière dans le cœur, par réflexion totale de la lumière à l'interface cœur-gaine.
- **Couche de protection** : c'est un revêtement de protection mécanique généralement en PVC

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon leur diamètre et la longueur d'onde utilisée : Fibres monomodes et multimodes.

#### ✓ **Fibres optiques monomodes**

Les fibres monomodes ont un diamètre de cœur très faible (10 microns), l'onde se propage dans l'axe de la fibre sans dispersion modale. Ces fibres monomodes sont caractérisées par l'affaiblissement (dB) par unité de longueur (km), et une dispersion chromatique, ainsi que la dispersion des modes de polarisation (PMD), citons aussi la longueur d'onde de coupure. Ce type de fibre est dédié aux réseaux longs distances [3].

La figure (2.2) représente un schéma d'une fibre optique monomodes :

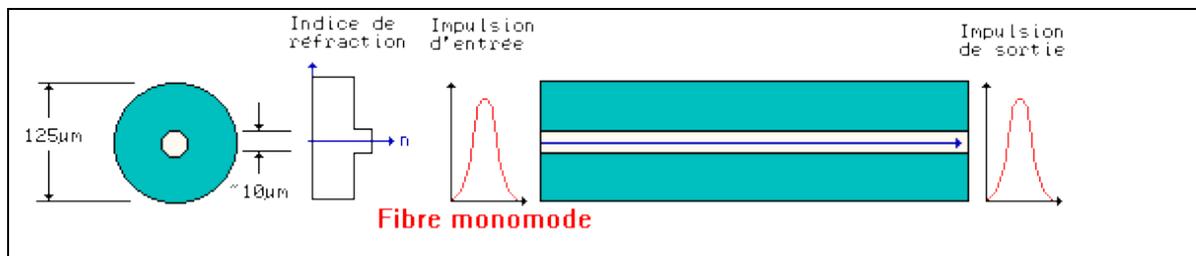


Figure1. 1: schéma d'une fibre optique monomodes

- Débit : environ 100 Gbit/s
- Portée maximale : environ 100 Km
- Affaiblissement : 0,5 dB/Km

### ✓ Fibres optiques Multimodes

Contient deux types les fibres à gradient d'indice et la fibre à saut d'indice. Dans cette famille de fibre, nous avons des fibres à saut d'indice (débit limité à 50 Mb/s) et les fibres à gradient d'indice (débit limité à 1 Gb/s) [4].

#### Fibres à gradient d'indice

Les fibres multimodes ont un cœur de grand diamètre (de 50 à 85 microns). Ceux-ci ont été les premières à être commercialisées, grâce aux réflexions totales qu'elles subissent à l'interface entre le verre du cœur et le verre de gaine, un rayon lumineux traversant le cœur de la fibre jusqu'à l'une de ses extrémités. On se propageant en longueur jusqu'à l'autre extrémité.

Ce type de fibre permet le passage de plusieurs longueurs d'ondes lumineuses (Plusieurs modes), les rayons arrivent avec des temps différents. Ce qui engendre une forte dispersion du signal lumineux, à cause de la multiplication des modes de propagations (dispersion modale). Les domaines d'utilisation de ces fibres sont principalement les réseaux locaux LAN (Local Area Network) et les réseaux de campus [5].

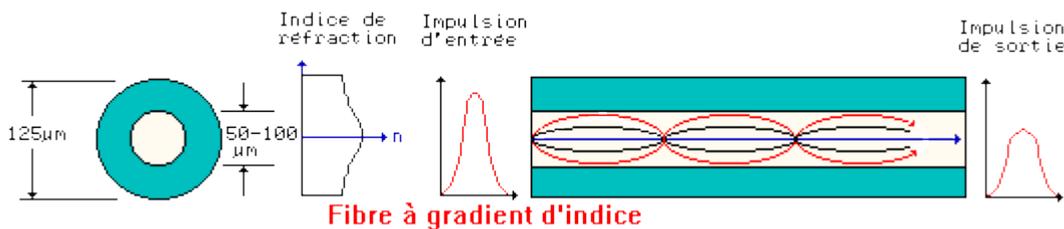


Figure 1.10 Schéma d'une fibre à gradient d'indice

- Débit: environ 1 Gbit/s
- Portée maximale: environ 2 Km
- Affaiblissement: 10 dB/Km

#### Fibres à saut d'indice

Dans les fibres optiques, la fibre à saut d'indice est une fibre dont l'indice de réfraction est uniforme dans le cœur et fortement réduit dans l'interface cœur-gaine en raison d'un indice de réfraction plus faible dans la gaine. Pour la fibre multimode à saut d'indice, la lumière se propage le long de l'axe de la fibre en zigzag selon le principe de la réflexion totale. La lumière qui pénètre dans la fibre sous différents angles d'incidence empruntera des chemins différents. Bien que les lumières incidentes se propagent à la même vitesse

simultanément à l'entrée, le temps nécessaire pour atteindre la sortie de la fibre est différent, ce qui entraîne une dispersion temporelle appelée dispersion modale [6].

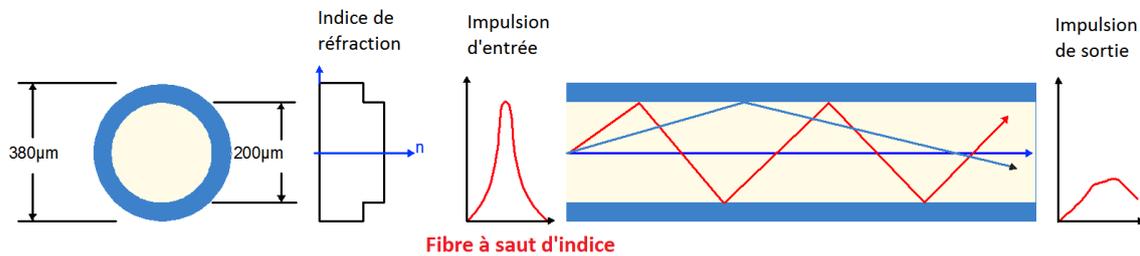


Figure 1.11 Schéma d'une fibre à saut d'indice

- Débit: environ 100 Mbit/s
- Portée maximale: environ 2 Km
- Affaiblissement: 10 dB/Km

#### ✓ Caractéristiques de F.O (effet linéaire et non linéaire)

Comme chaque support de transmission, la fibre optique possède des défauts de transmission qui se résument dans les effets linéaires et non linéaires qui influent sur la transmission du signal dans la fibre optique.

#### Effets linéaires

Dans la théorie linéaire de propagation des ondes lumineuses dans les fibres optiques, l'atténuation les pertes et la dispersion sont les principaux paramètres à prendre en compte lors de l'étude de l'évolution de ces signaux dans la fibre. Ces paramètres sont considérés comme indépendants de la puissance optique des signaux se propageant dans une même fibre, et aucune interaction n'est prise en compte.

#### Dispersion

Ce terme regroupe en fait deux types de dispersion :

##### Dispersion modale

Lorsqu'on utilise une fibre multi-mode, la lumière peut prendre plusieurs chemins (modes) lorsqu'elle se propage dans la fibre. La distance parcourue par certains modes est donc différente de la distance parcourue par d'autres modes. Lorsqu'une impulsion est envoyée dans la fibre, elle se décompose selon les différents modes. Certaines composantes (modes) arrivent donc avant d'autres et l'impulsion s'étale.

Ce phénomène de dispersion modale n'apparaît bien sûr qu'avec les fibres multimodes.

Dans le cas d'une fibre multi-mode à saut d'indice, seule la longueur du trajet de chaque mode varie, la vitesse de chacun des modes reste identique.

Les fibres multi-mode à gradient d'indice ont précisément été développées pour répondre au problème de la dispersion modale. Puisque l'indice de réfraction n'est pas constant, la longueur du trajet et de la vitesse de propagation de chaque mode va varier. Les modes d'ordre élevé empruntent des trajets plus longs (assez éloignés de l'axe optique) où l'indice de réfraction est plus faible qu'au voisinage de l'axe optique mais avec une vitesse plus importante que les modes d'ordre moins élevés qui se propagent au voisinage de l'axe optique, donc sur des trajets plus courts mais plus lentement. La dispersion modale d'une fibre à gradient d'indice est comparativement plus faible que celle d'une fibre à saut d'indice.

Dans le cas d'une fibre monomode, la dispersion modale n'existe pas (en pratique, elle est quasiment nulle). Le mode de propagation étant unique (une ligne droite), il n'y a pas de dispersion dû au fait qu'un signal peut prendre plusieurs chemins différents. [7]

### **Dispersion chromatique**

La dispersion matériau : les lasers et les LED ne sont pas des sources monochromatiques. Ils produisent de la lumière dans une gamme de longueur d'ondes. Une impulsion lumineuse issue de source optique est donc composée de plusieurs longueurs d'onde. L'indice de réfraction des fibres étant différent selon la longueur d'onde de la lumière, chaque longueur d'onde se propage dans la fibre à une vitesse spécifique. Certaines longueurs d'ondes arrivent donc avant d'autres et l'impulsion s'étale (s'élargit).

La dispersion guide : Ceci est dû au fait que la lumière n'est en fait pas strictement confinée dans le cœur. Les champs électrique et magnétique constituant l'impulsion lumineuse s'étendent en fait (légèrement) à l'extérieur du cœur, donc dans la gaine. Le champ électromagnétique "déborde" dans la gaine d'autant plus que la longueur d'onde est grande. L'indice de réfraction vu par l'onde est donc une moyenne entre de l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine. Les longueurs d'ondes les plus petites auront donc tendance à se propager plus lentement que les longueurs d'ondes plus grande, d'où un élargissement de l'impulsion lumineuse.

Cet effet est quasiment négligeable avec les fibres multimodes (qui n'ont un rayon de cœur relativement grand) mais ne l'est pas avec les fibres monomodes (pour lesquelles le rayon du cœur est quasiment de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde) [7].

### Atténuation

L'atténuation est une caractéristique essentielle qui a une double origine intrinsèque, et extrinsèque. L'atténuation intrinsèque est due principalement aux matériaux utilisés ainsi qu'aux impuretés dans la fibre. Le deuxième type d'atténuation est essentiellement dû aux imperfections des techniques de fabrication ainsi qu'aux raccordements. Lorsqu'une onde électromagnétique pénètre dans la matière, il y a une interaction entre les photons et les particules chargées constituant la matière. Les interactions entre les photons et les vibrations moléculaires entraînent la présence de bandes d'absorption, d'autre part le verre possède toujours un certain nombre d'impuretés qui fournissent aussi des sources supplémentaires de pertes provenant de transition d'électrons entre divers niveaux d'énergie.

En outre, les charges se trouvent dans la matière et qui ont vu leur état de vibrations modifié peuvent réémettre de la lumière car les charges accélérées rayonnent de l'énergie. Tous ces phénomènes, particulièrement complexes, amènent à soustraire de l'énergie au rayon incident, il y a absorption. Ces phénomènes dépendent de la longueur d'onde de la source incidente. L'atténuation est exprimée en unités appelées décibels (dB).

Si l'atténuation est liée à la puissance du signal, la formule est donnée par :

$$A (\text{puissance}) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_s}{P_d} \right) \quad (1.1)$$

- $P_s$  = puissance à la source
- $P_d$  = puissance à destination

La formule de l'atténuation en tension :

$$A (\text{tension}) = 20 \log_{10} \left( \frac{V_s}{V_d} \right) \quad (1.2)$$

- $V_s$  = tension à la source
- $V_d$  = tension à destination

L'atténuation est souvent exprimée en dB par pied, mètre, kilomètre, etc. Plus la valeur d'atténuation est faible sur toute mesure de distance donnée, plus le câble est efficace.

Lorsque des signaux sont transmis sur de plus grandes distances, il peut être nécessaire d'inclure des répéteurs pour augmenter la puissance du signal et réduire l'effet de l'atténuation.

## **Pertes**

### **Pertes intrinsèques**

Les pertes intrinsèques sont dues principalement aux matériaux utilisés, et on compte :

- Absorption : Perturbation du photon de lumière par un électron d'un atome d'impureté.
- Diffusion: Cette diffusion est due à la variation locale de l'indice de réfraction du cœur de la fibre, ainsi qu'aux changements de densité ou de compositions dans la matière.

Ce sont des pertes inévitables que l'on retrouve dans toutes les fibres. On parlera de diffusion de Rayleigh qui dépend de la longueur d'onde utilisée, cette diffusion diminue rapidement lorsque la longueur d'onde du rayon incident augmente. [8]

### **Pertes extrinsèques**

L'épissage des fibres optiques est un autre type de perte dans la fibre optique. En joignant deux fibres optiques bout à bout, l'épissure vise à assurer que la lumière qui la traverse est presque aussi forte que la fibre vierge elle-même. Mais peu importe la qualité de l'épissure, la perte d'épissure est inévitable. Les pertes d'épissage par fusion de la fibre multimode sont de 0,1-0,5 dB, 0,3 dB étant une bonne valeur moyenne. Pour la fibre monomode, la perte d'épissure par fusion peut généralement être inférieure à 0,05 dB.

La courbure est le problème commun qui peut causer des pertes de fibre optique générées par une mauvaise manipulation de la fibre optique. Il existe deux types de base. L'un est la micro-courbure et l'autre est la macro-courbure. La macro flexion se réfère à une grande flexion de la fibre (avec un rayon supérieur à 2 mm). [8]

### **Effets non linéaires**

Une onde optique de forte intensité se propageant dans une fibre optique uni-modale, peut générer un grand nombre d'effets non linéaires, Parmi ceux-ci, nous pouvons citer : l'effet de Kerr, l'effet de Brillouin, l'effet de Raman. Il est possible de classer les non linéarités en deux catégories :

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

### **Effet Kerr**

L'effet Kerr, également appelé électro-optique quadratique (QEO) effet, un changement dans l'indice de réfraction d'un matériau en réponse à une application de champ électrique . L'effet Kerr est distinct de l'effet Pockels en ce que le changement d'indice induit est directement proportionnel au carré du champ électrique au lieu de varier linéairement avec lui. Tous les matériaux présentent un effet Kerr, mais certains liquides le montrent plus fortement que d'autres [9].

### **Diffusion Brillouin**

Sous l'effet de la température, les molécules constituant le milieu, subissent l'agitation thermique et effectuent de petits déplacements autour de leur position d'équilibre. Les phonons créés se couplent entre eux et modifient l'indice de réfraction du milieu créant des ondes acoustiques de très faibles amplitudes. Par conséquent, lorsqu'une onde électromagnétique se propage, elle est diffusée dans toutes les directions.

### **Effet Raman**

C'est un effet quantique observé lorsque la lumière arrive sur un matériau. Les photons qui composent la lumière d'un laser ont tous une longueur d'onde identique (on parle de lumière monochromatique), mais ils peuvent subir quatre phénomènes différents :

1. Soit, ils sont transmis, c'est-à-dire qu'ils traversent la matière.
2. Soit, ils sont absorbés, c'est-à-dire que leur énergie est totalement transformée en chaleur par les atomes du matériau.
3. Soit, ils sont réfléchis, c'est-à-dire qu'ils frappent la matière et en ressortent, comme sur un miroir.
4. Soit, ils frappent la matière et continuent leur route, mais en ayant pris ou cédé un peu d'énergie aux atomes qu'ils ont impacté. Leur énergie ayant changé, ces photons ont vu se modifier leur longueur d'onde, à la hausse ou à la baisse : ils ont subi l'effet Raman ! Cet effet est utilisé dans l'industrie des télécommunications pour amplifier les signaux optiques [10].

## B. Amplificateur de ligne

L'amplificateur en ligne ; placé sur une ligne de transmission, son rôle est d'amplifier le signal après une certaine distance de propagation pour lui permettre de parcourir une autre distance. Il doit avoir un faible facteur de bruit et un gain important.

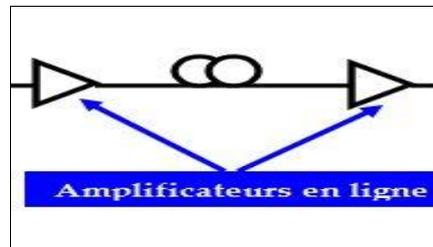


Figure 1.12 Schéma d'un amplificateur de ligne

### 1.2.3 Bloc de réception

Le rôle du bloc récepteur est de convertir le signal optique en signal électrique il est constitué de :

#### A. Préamplificateur

Placé juste avant le module de réception pour permettre au signal d'avoir une puissance suffisante pour être détecté dans des bonnes conditions. Il doit amplifier le signal utile qui a accumulé beaucoup de bruit et subi une forte atténuation. Par conséquent le facteur de bruit doit être le plus faible possible.

#### B. Photodiode

Un récepteur optique ou photodétecteur convertit le signal optique reçu à l'extrémité de la fibre optique en un signal électrique. Cet étage de photo détection peut être suivi par un étage d'amplification qui peut lui être intégré comme le cas d'un amplificateur, on a deux types de photodiode APD (Avalanche Photo Diode) et PIN.

##### ➤ Photodiode APD (Avalanche Photo Diode)

Les photodiodes à avalanche sont des diodes dotées d'un mécanisme d'amplification interne. Comme pour la diode standard, les photons génèrent des paires électron-trou, qui subissent alors une telle accélération induite par la tension appliquée de l'extérieur, que des électrons supplémentaires sont introduits dans la bande de conduction par l'ionisation par

impact électronique. À leur tour, les électrons supplémentaires absorbent suffisamment d'énergie pour introduire d'autres électrons dans la bande de conduction. Il est ainsi possible d'atteindre un coefficient multiplicateur de plusieurs centaines. Les photodiodes à avalanche sont principalement utilisées lorsque le signal optique est très faible. Les applications impliquant des fréquences de modulation élevées utilisent également des APD. Le bruit généré par l'effet d'avalanche à partir de fréquences d'environ 60 MHz est généralement plus faible que le bruit d'une combinaison de photodiodes classiques avec un amplificateur électronique externe [11].

#### ➤ Photodiode PIN

La photodiode est un composant actif qui génère une tension électrique (effet photovoltaïque) ou un photocourant lorsqu'il est éclairé. La base physique de ce fonctionnement est la jonction p-n dans le semi-conducteur silicium. Si les photons sont absorbés avec suffisamment d'énergie dans le détecteur, des porteurs de charge (paires électron-trou) se forment. Ceux-ci sont séparés dans la zone de charge d'espace, ce qui crée le photocourant. La séparation de charge se produit même sans tension appliquée de l'extérieur, mais peut être accélérée par une telle tension de blocage. Le photocourant reste linéaire à la quantité de lumière incidente sur plusieurs ordres de grandeur, si la diode ne fonctionne pas dans un état de saturation. L'état de fonctionnement en tant qu'élément ou en tant que diode dépend du circuit externe. Lorsqu'elle fonctionne en tant qu'élément, la diode est connectée directement au consommateur sans source de tension externe. Avec ce mode de fonctionnement, aucun courant d'obscurité ne circule, ce qui facilite la détection d'intensités minimales. Lorsqu'elle fonctionne en tant que diode, une source de tension externe est connectée en série avec le consommateur, ou la tension est appliquée en sens inverse. Ce mode de fonctionnement est idéal pour les applications nécessitant une réponse rapide du signal. L'inconvénient majeur est le courant d'obscurité qui augmente de façon exponentielle avec la température [11]

### C. Démultiplexeur

Un démultiplexeur est un circuit logique combinatoire avec une ligne d'entrée  $2^n$  lignes de sortie et  $n$  lignes de sélection. Il achemine les informations présentes sur la ligne d'entrée vers l'une des lignes de sortie. La ligne de sortie qui obtient les informations présentes sur la ligne d'entrée est déterminée par l'état des bits des lignes de sélection. Un décodeur est un cas particulier de démultiplexeur sans ligne d'entrée.

## 1.3 Technologies de transmission

L'avènement de nouvelles technologies de transmission telles que la PDH, SDH et WDM, pousse les opérateurs à déployer et segmenter leur réseau en fonction des différents besoins en débit, en bande passante, en distance de transmission, pour garantir et assurer la disponibilité des services.

### 1.3.1 Technologie PDH (plesiochronous Digital Hierarchy)

La hiérarchie numérique plésiochrone (PDH) est une technologie de transmission de réseau de télécommunications conçue pour le transport de gros volumes de données à travers des réseaux numériques à grande échelle. Le terme plésiochrone signifie "presque synchrone".

La conception PDH permet le streaming de données sans avoir d'isochrones (horloges fonctionnant à des heures identiques, parfaitement synchronisées) pour synchroniser les échanges de signaux. Les horloges PDH fonctionnent très près, mais pas exactement dans le temps les unes avec les autres, de sorte que lors du multiplexage, les heures d'arrivée des signaux peuvent différer car les vitesses de transmission sont directement liées à la fréquence d'horloge.

PDH permet à chaque flux d'un signal multiplexé d'être bourré de bits pour compenser les différences de synchronisation afin que le flux de données d'origine puisse être reconstitué exactement tel qu'il a été envoyé.

PDH prend en charge un taux de transmission de données de 2048 Kbps. Le débit de données est contrôlé par une horloge dans l'appareil qui génère les données. Avec les signaux de multiplexage, la fréquence d'horloge sur chaque flux dans le multiplex peut varier très légèrement. Cela peut se produire pour un certain nombre de raisons et est parfois appelé "gigue". Lorsqu'un flux multiplexé arrive, il doit y avoir un mécanisme pour reconstituer les différents flux dans la forme de signal d'origine. Avec des signaux arrivant à différentes heures de fin, il doit y avoir un moyen de les rendre tous disponibles pour le multiplexage inverse de manière simultanée, de sorte que PDH bourre les signaux jusqu'à ce qu'ils soient tous de la même longueur, à quel point il peut être démultiplexé avec succès. Les morceaux farcis sont ensuite jetés. [12]

### 1.3.2 Technologie SDH/SONET

A la fin des années 80, une nouvelle hiérarchie de transmission appelée la hiérarchie numérique synchrone (SDH) est apparue. Cette technologie est fondée sur les concepts de l'optique synchrone Network (SONET), elle présente un standard international pour les télécommunications haut débit dans les réseaux optiques. Cette hiérarchie est basée sur la technique de multiplexage TDM, elle est conçue pour générer les communications en mode circuit de bout en bout, comme elle est utilisée pour transporter des flux IP, ATM, DSL et PDH.....etc.

La technologie SDH offre la possibilité de transmettre dans une même trame des services de types et débits différents, tels que les conversations téléphoniques, les données informatiques, notamment Internet, et la vidéo numérique. La technologie SDH peut être déployée dans les différents niveaux de réseaux de transport : les réseaux d'accès, les réseaux métropolitains et les réseaux de cœur. La plupart de ces réseaux de transport se basent principalement sur une infrastructure à fibre optique, qui permet des capacités de transmission importantes de l'ordre de dizaines de Gb/s [13].

### 1.3.3 Passage du SDH vers WDM

Le débit transporté dans les réseaux de télécommunications ne cesse d'augmenter, le transport de la voix et des données en sont les causes principales de plus avec l'expansion de l'Internet à l'échelle mondiale.

L'introduction du multiplexage en longueurs d'onde était dans le but d'augmenter les capacités de transmission et d'acheminement ainsi que la flexibilité et la rentabilité des systèmes qui conduisent de plus en plus à une optimisation des systèmes existants et à une meilleure intégration de systèmes de nouvelles générations et c'est là que le WDM est introduit et remplace le SDH petit à petit.

Les réseaux optiques ont commencé avec WDM (Wavelength Division Multiplexing) puis ont évolué vers DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) ces technologies fournissent de la capacité additionnelle sur les fibres existantes. Les réseaux optiques sont basés sur l'utilisation de multiples longueurs d'ondes qui sont transmises, assemblées mises sur le réseau. Un réseau optique (réseau de photons) peut pourvoir aux besoins d'IP &

ATM et les transporter sur le réseau SDH ou PDH ainsi chacun de ces protocoles peut être associé à une longueur d'onde.

Le réseau optique futur sera constitué d'une couche de transport optique sur laquelle s'interconnecteront les services IP, ATM. L'élimination de certains protocoles de la couche transport (SDH...) conduira à réduire le nombre d'interface spécifique [14].

De plus, il est clair que ce réseau mondial n'aurait jamais pu se développer sans l'existence de systèmes de transmission à très grande capacité et offrant des coûts de transmission très faibles.

## 1.4 Avantages de système de transmission Optique

- Une plus grande bande passante et une vitesse plus élevée. Le câble à fibre optique prend en charge une bande passante et une vitesse extrêmement élevée ; jusqu'à 10 Gbps. La quantité d'informations qui peut être transmise par unité de câble à fibre optique est son avantage le plus significatif.
- Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la fibre optique est bon marché. Plusieurs kilomètres de câble à fibre optique peuvent être fabriqués pour moins cher ; que des longueurs équivalentes en fil de cuivre.
- Les fibres optiques sont aussi plus minces et plus légères. Ainsi, cela leur permet d'offrir un meilleur ajustement, là où l'espace est un problème.
- La fibre optique offre moins de dégradation du signal. En effet, la perte de signal dans la fibre optique est inférieure à celle du fil de cuivre. En découle une meilleure qualité pour votre connexion internet.
- La fibre optique a une meilleure durée de vie. Les fibres optiques ont généralement un cycle de vie plus long ; plus de 100 ans. C'est pour cela que les fournisseurs d'accès internet investissent autant dans le déploiement de la fibre.

## 1.5 Conclusion

L'objectif de la transmission est de faire transporter les données (voies, images,...etc.) d'une source vers une destination, avec des débits le plus élevé possible et en minimisant

au maximum les pertes, C'est pour cela que le système de transmissions optique est la plus approprié et utilise actuellement.

## **Chapitre 2**

Technique de multiplexage en longueur d'onde  
(DWDM)

## 2.1 Introduction

Alors que les systèmes de transmission sur fibres optiques ne reposaient que sur l'utilisation du multiplexage temporel (ou TDM pour Time Division Multiplexing), une nouvelle génération de systèmes est apparue au début des années 90, mettant en œuvre le multiplexage de longueurs d'onde (ou WDM pour Wavelength Division Multiplexing).

Le Multiplexage en longueur d'onde est une Technique de multiplexage utilisée sur les réseaux à fibres optiques, qui consiste à envoyer sur une même fibre optique plusieurs signaux de couleurs (longueurs d'onde) différentes en même temps (ce qui multiplie évidemment la quantité d'information transmise) .

Traditionnellement les systèmes WDM ont été adoptés par les opérateurs et les fournisseurs de services. Les systèmes de grande envergure, conçus pour des infrastructures nationales sont trop coûteux et trop complexes pour l'utilisation d'un réseau privé. Ces dernières années les choses ont changé. La technologie évolue encore plus rapidement aujourd'hui.

Des solutions de réseaux WDM sont disponibles aujourd'hui pour répondre aux besoins des entreprises et des centres de données privées. Les solutions sont plus simples et plus rentables que les solutions traditionnelles des opérateurs.

## 2.2 Multiplexage de longueur d'onde WDM

La technique de multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing ou WDM) permet de combiner plusieurs canaux sur le même signal optique, chaque canal utilisant une longueur d'onde différente. La bande passante disponible dans une fibre peut être alors considérablement étendue.

### 2.2.1 Principe de la WDM

Le principe repose sur la transmission simultanée de plusieurs signaux, provenant de sources diverses et chacun véhiculé par une longueur d'onde différente, sur une même fibre. Les systèmes actuels autorisent 4, 8, 16, 32 et 64 canaux optiques différents, chacun pouvant supporter 2,5Gbits/s par exemple ; on obtient alors des débits de 10, 40, 80 et 160 Gbits/s. A partir de différentes sources émettant chacune à une longueur d'onde propre,

Cette technique permet de regrouper et d'injecter ces canaux dans une seule fibre sans qu'il y ait de chevauchement entre eux au cours de la propagation. Il suffit à l'extrémité de la fibre, de séparer ces longueurs d'ondes et de les envoyer sur autant de détecteurs différents pour retrouver les signaux électriques initiaux. Il est à noter qu'il existe des sources émettant plusieurs longueurs d'onde simultanément, et que la capacité des systèmes de transmission WDM a augmenté parallèlement avec l'augmentation du débit par canal en multiplexage temporel (TDM) de 2,5 à 40 Gbits/s. ITU-T G692 est la norme définissant la plage de longueurs d'onde dans la fenêtre de transmission "1530-1565 nm" [15].

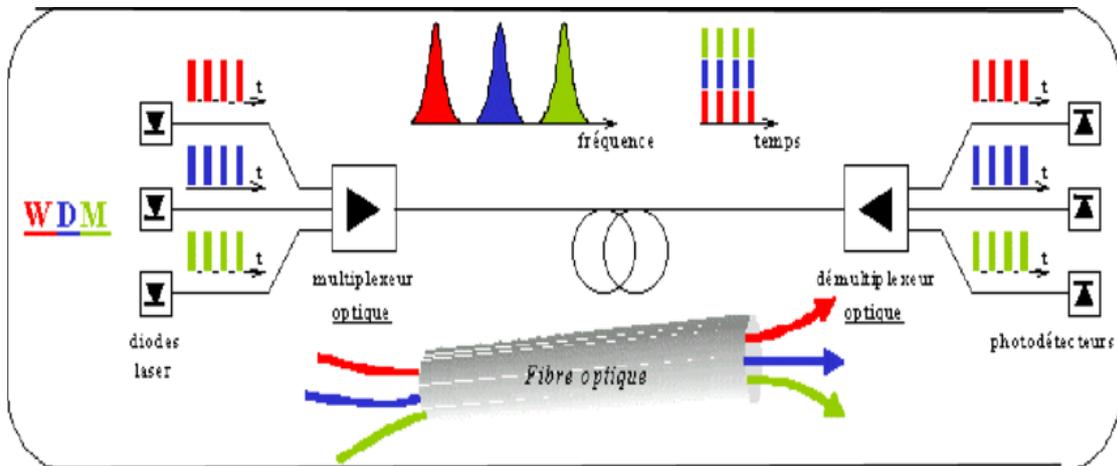


Figure 2.1 Schème de principe de fonctionnement WDM

### 2.2.2 Types de systèmes WDM

Il existe plusieurs types de WDM en fonction des longueurs d'ondes utilisées :

WDM, DWDM, CWDM, UDWM

Elles restent identiques par leur principe mais se différencient uniquement par le nombre de canaux exploités dans une fibre.

La technologie WDM est dite dense (D-WDM) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 100 GHz. Des systèmes à 50 GHz (0,4 nm) et à 25 GHz (0,2 nm) permettent d'obtenir respectivement 80 et 160 canaux optiques.

Pour des espacements encore plus faibles, on parlera d'U-WDM : Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing. Ainsi, des systèmes à 10 GHz (0,08 nm) permettent d'obtenir 400 canaux optiques.

Les systèmes WDM / DWDM les plus commercialisés aujourd'hui comportent 8, 16, 32, 80 canaux optiques, ce qui permet d'atteindre des capacités de 80, 160, 320, 800 Gb/s en prenant un débit nominal de 10 Gb/s. On peut atteindre une capacité de 4 000 Gb/s (4 Tera b/s) avec 400 canaux optiques à 10 Gb/s, en technologie U-DWDM. [7].

Types	Fenêtres	Espacement	Canaux	Débit potentiel
CWDM	2eme	20	0 – 16	2,5 - 5 GHz
WDM	3eme	8	32	320 GHz - 1,28 T
DWDM	3eme	0.2 - 0.8	80 – 160	3 - 12 T
UWDM	3eme	0,08	400	10 - 40 T

Tableau 2.1 Comparaison entre les techniques de multiplexage WDM

### 2.2.3 Comparaison entre CWDM et DWDM

- CWDM : Coarse Wavelength Division Multiplexing
- DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing

Les deux technologies fonctionnent de manière identique, la seule différence est le nombre de canaux.

Le DWDM utilise un espacement entre 0.2 et 0.8 nanomètre contre 20 nanomètres pour le CWDM, ce qui permet d'avoir un nombre de canaux normalisés beaucoup plus important (de 96 pour la bande C à 160 théorique, contre 8 ou 18).

DWDM utilise des longueurs d'onde autour de 1550nm. La tranche de fréquence la plus utilisée est la bande C (Conventionnelle) : 191,560 à 195,942 THz (de 1 565 à 1 530 nm).

Sur la courbe caractéristique de la silice, l'atténuation dans la bande passante (1 530 nm - 1 565 nm) est de 0,2 dB/km. C'est la plus faible. Avec des lasers et des fibres optiques de nouvelle génération, il est possible de couvrir des distances de + 80km.

CWDM utilise principalement des longueurs d'onde entre 1470 et 1610nm (8 longueurs d'onde ; 18 au total ont été normalisées de 1270 à 1610nm). A certaines longueurs d'onde, l'atténuation est beaucoup plus élevée +0.3db/km. CWDM est adapté pour des distances moyennes.

Bien entendu cet espacement réduit (appelé également "pas") pour le standard DWDM nécessite des lasers et des "MUX/DEMUX" beaucoup plus précis et donc beaucoup plus onéreux.

L'autre différence notable entre ces deux technologies est la distance maximale et le débit que l'on peut atteindre. La distance atteignable est fonction de ce qu'on appelle le budget optique :

$$\text{Budget optique} = \text{Puissance émetteur} - \text{Sensibilité récepteur} \quad (2.1)$$

Ce budget optique doit être supérieur à l'atténuation totale de la fibre optique. Les équipements DWDM possèdent des optiques plus précises que celles de CWDM, et peuvent donc atteindre de plus longues distances pour un débit équivalent ou supérieur.

Pour simplifier, on peut dire que CWDM convient pour une distance inférieure à 40km à 1Gb/s, tandis que DWDM est capable d'atteindre 80km à 10Gb/s, et même plus avec l'ajout d'amplificateurs tous les 80 kms.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, CWDM a été développé après DWDM, justement pour proposer une solution plus économique mais beaucoup plus limitée également.

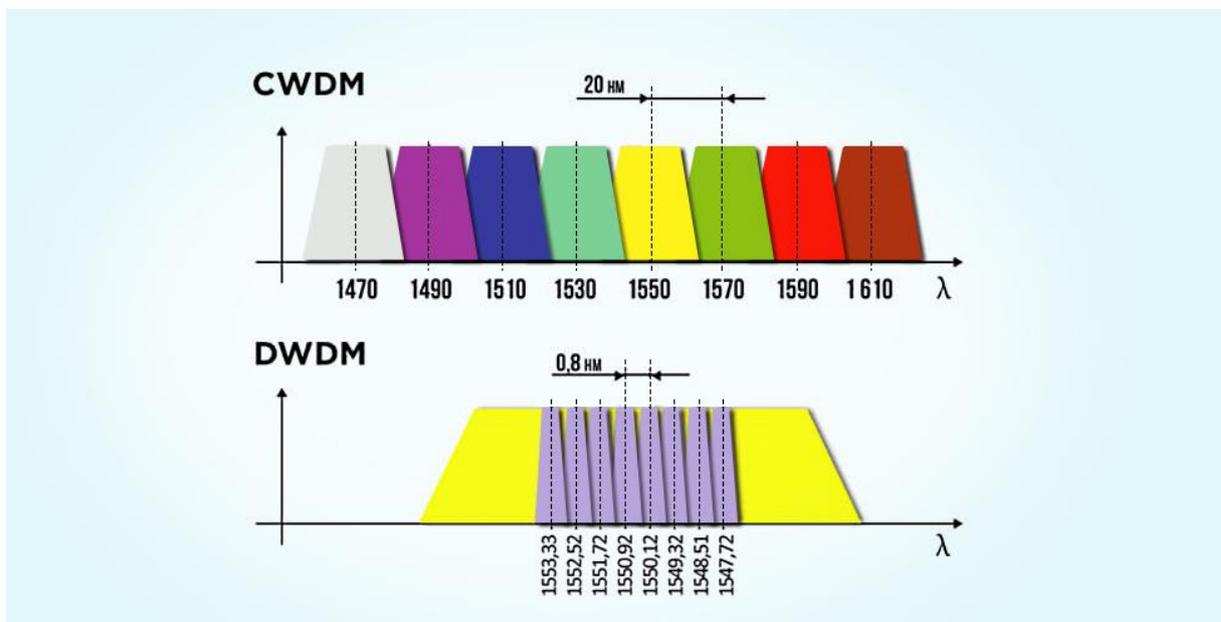


Figure 2.2 Différence entre CWDM et DWDM

## 2.3 Composants d'un système DWDM

Un système DWDM se compose généralement de cinq composants : Émetteurs/Récepteurs Optiques, Filtres Mux/DeMux DWDM, Multiplexeurs Optiques d'Ajout/Extraction (OADM), Amplificateurs Optiques, Transpondeurs (Convertisseurs de Longueur d'Onde).

### 2.3.1 Émetteurs/récepteurs optiques

Les émetteurs sont décrits comme un composant DWDM car ils fournissent les signaux lumineux qui sont ensuite multiplexés. Les caractéristiques des émetteurs optiques utilisés dans les systèmes DWDM sont très importantes pour la conception du système. Multiples émetteurs optiques sont utilisés comme sources lumineuses dans un système DWDM. Les bits de données électriques entrants (0 ou 1) déclenchent la modulation d'un flux lumineux (par exemple, un flash de lumière = 1, l'absence de lumière = 0). Les lasers créent des impulsions de lumière. Chaque impulsion lumineuse a une longueur d'onde exacte ( $\lambda$ ) exprimée en nanomètres (nm).

Dans un système basé sur une porteuse optique, un flux d'informations numériques est envoyé à un dispositif de couche physique, dont la sortie est une source de lumière (une LED ou un laser) qui se connecte avec un câble à fibre optique. Cet appareil convertit le signal numérique entrant de la forme électrique (électrons) en forme optique (photons) (conversion électrique en optique, E-O). Les uns et les zéros électriques déclenchent une source de lumière qui envoie (par exemple, lumière = 1, peu ou pas de lumière = 0) la lumière dans le cœur d'une fibre optique. La conversion E-O n'affecte pas les données. Le format du signal numérique fondamental est inchangé. Les impulsions de lumière se propagent sur la fibre optique par réflexion interne totale. A l'extrémité de réception, un autre capteur optique (photodiode) détecte les impulsions lumineuses et convertit le signal optique entrant en une forme électrique. Une paire de fibres connecte généralement deux appareils (une fibre de transmission, une fibre de réception).

Les systèmes DWDM nécessitent les longueurs d'onde précises de lumière pour fonctionner sans distorsion et diaphonie entre les canaux. Plusieurs lasers individuels sont généralement utilisés pour créer les canaux individuels d'un système DWDM. Chaque laser fonctionne à une longueur d'onde légèrement différente. [16]

### 2.3.2 Filtres Mux/DeMux DWDM

De multiples longueurs d'onde (sur la bande de 1550nm) créées par multiples émetteurs fonctionnant sur différentes fibres sont combinées sur une fibre par un filtre optique (filtre Mux). Le signal de sortie d'un multiplexeur optique est appelé signal composite.

À l'extrémité de réception, un filtre d'extraction optique (filtre DeMux) sépare toutes les longueurs d'onde individuelles du signal composite sur des fibres individuelles. Les fibres individuelles transmettent les longueurs d'onde démultiplexés à autant de récepteurs optiques. Généralement, les composants Mux/DeMux sont placés dans le même boîtier.

Les appareils Mux/DeMux optiques peuvent être passifs. Les signaux composants sont multiplexés et démultiplexés optiquement, pas électroniquement, par conséquent aucune source d'alimentation externe n'est requise.

La figure ci-dessous montre le fonctionnement DWDM bidirectionnel.  $N$  impulsions lumineuses de  $N$  longueurs d'onde différentes transmises par  $N$  fibres différentes sont combinées par un Mux DWDM. Les  $N$  signaux sont multiplexés sur une paire de fibre optique. Un Demux DWDM reçoit le signal composite et sépare chacun des  $N$  signaux des composants et les transmet chacun à une fibre. Les flèches des signaux émis et reçus représentent l'équipement du côté client. Cela nécessite l'utilisation d'une paire de fibres optiques : une fibre pour la transmission, l'autre pour la réception. [16]

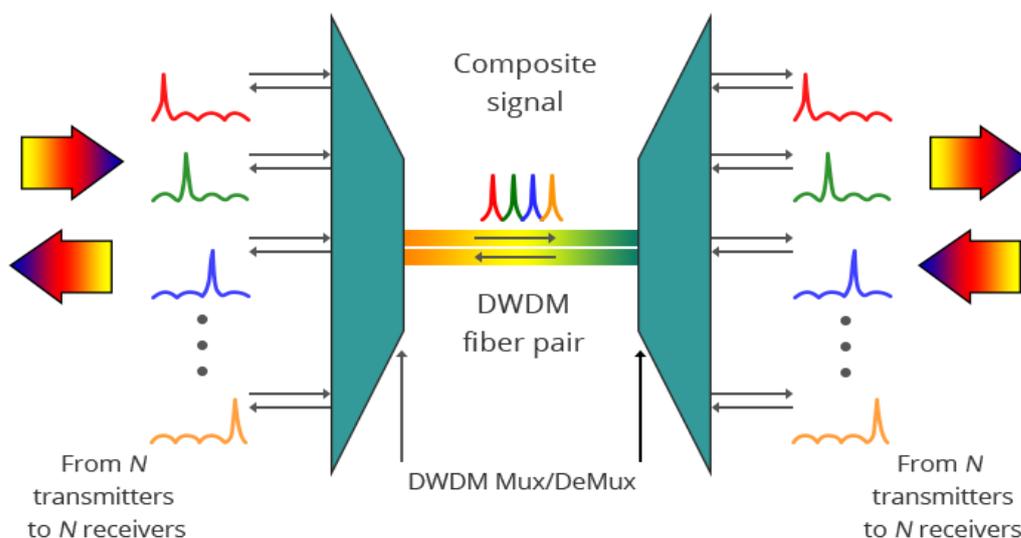


Figure 2.3 Schéma de fonctionnement d'un MUX/DEMUX DWDM bidirectionnel

### 2.3.3 Multiplexeurs optiques d'ajout/extraction

Les multiplexeurs optiques d'ajout/extraction (c'est-à-dire les OADM) ont une fonction différente d'« Ajouter/Extraire », par rapport aux filtres Mux/Demux. Voici une figure qui montre le fonctionnement d'un OADM DWDM à 1 canal. Cet OADM est conçu seulement pour ajouter ou extraire les signaux optiques avec une longueur d'onde particulière. De gauche à droite, un signal composite entrant est divisé en deux composants, extraire et passer. L'OADM extrait uniquement le flux de signal optique rouge. Le flux de signal extrait est transmis au récepteur d'un périphérique client. Les signaux optiques restants qui traversent l'OADM sont multiplexés avec un nouveau flux de signal d'ajout. L'OADM ajoute un nouveau flux de signal optique rouge, qui fonctionne à la même longueur d'onde que le signal déposé. Le nouveau flux de signaux optiques est combiné avec les signaux traversés pour former un nouveau signal composite. [16]

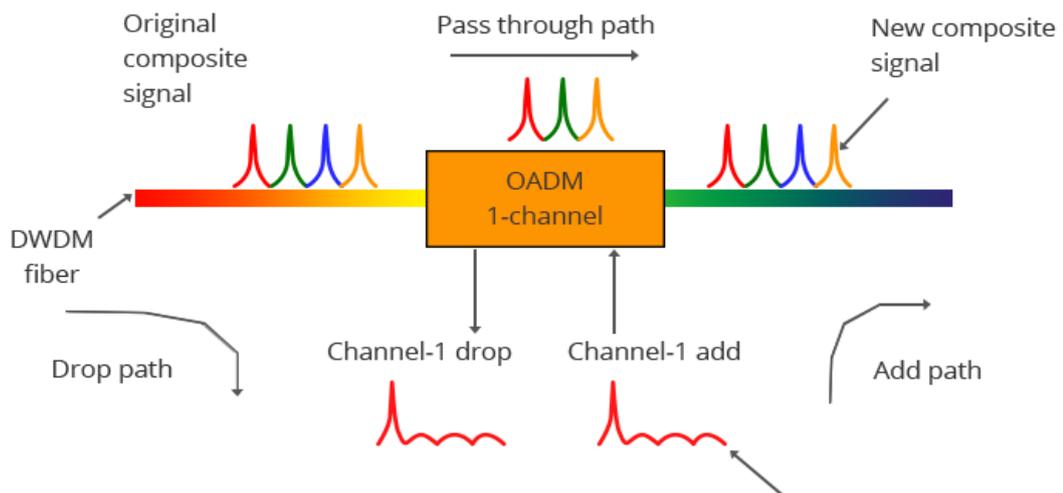


Figure 2.4 Schéma de fonctionnement d'OADM

### 2.3.4 Amplificateurs optiques

Les amplificateurs optiques augmentent l'amplitude ou ajoutent du gain aux signaux optiques passant sur une fibre en stimulant directement les photons du signal avec une énergie supplémentaire. Ce sont des dispositifs « en fibre ». Les amplificateurs optiques amplifient les signaux optiques sur une large gamme de longueurs d'onde. Il est très important pour l'application du système DWDM. Les Amplificateurs à Fibre Optique Dopée à l'Erbium (EDFA) sont le type d'amplificateurs optiques en fibre le plus utilisé

. Les EDFA utilisés dans les systèmes DWDM sont parfois appelés DWDM EDFA, comparés à ceux utilisés dans les systèmes CATV ou SDH. Pour étendre la distance de transmission de votre système DWDM, vous pouvez choisir parmi différents types d'amplificateurs optiques, y compris DWDM EDFA, CATV EDFA, SDH EDFA, EYDFA et Amplificateur Raman etc. [16]

### 2.3.5 Transpondeurs (Convertisseurs de longueurs d'onde) /OEO

Les transpondeurs convertissent les signaux optiques d'une longueur d'onde entrant à l'autre longueur d'onde sortant adaptée aux applications DWDM. Les transpondeurs sont des convertisseurs de longueur d'onde Optique-Électrique-Optique (O-E-O).

Un transpondeur effectue une opération O-E-O pour convertir les longueurs d'onde de la lumière, ainsi certaines personnes les ont appelés « OEO » en abrégé. Dans le système DWDM, un transpondeur convertit le signal optique du client en un signal électrique (O-E), puis exécute les fonctions 2R (Ré amplificateur, Remodeler) ou 3R (Ré amplificateur, Remodeler et Resynchroniser).

La figure ci-dessous montre le fonctionnement bidirectionnel du transpondeur. Un transpondeur est situé entre un appareil client et un système DWDM. De gauche à droite, le transpondeur reçoit un flux de débit optique activé à une longueur d'onde particulière (1310nm).

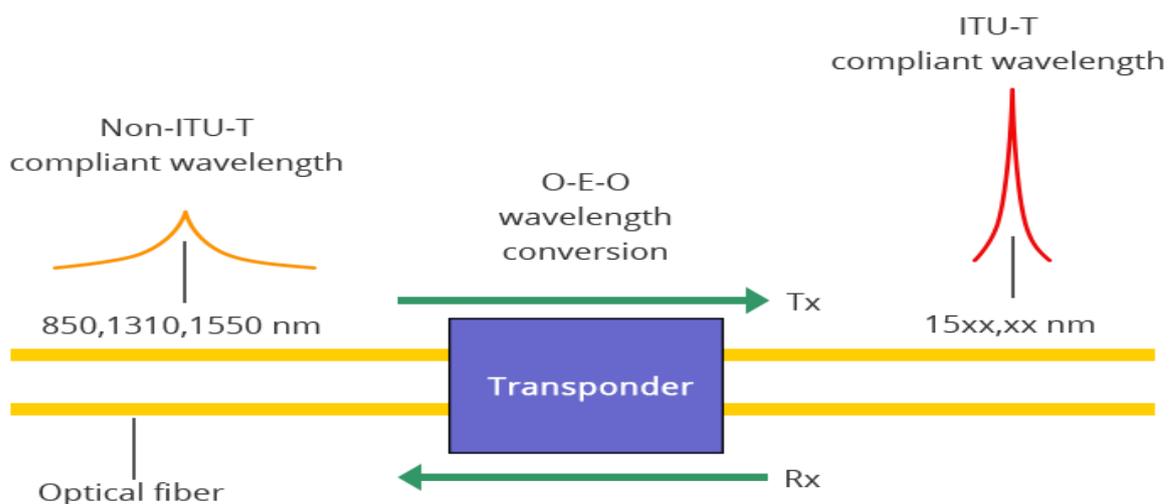


Figure 2.5 Schéma de fonctionnement de transpondeur

Le transpondeur convertit la longueur d'onde de fonctionnement du flux de débit entrant en une longueur d'onde conforme à l'UIT. Il transmet sa sortie dans un système DWDM. Du côté de la réception (de droite à gauche), le processus est inversé. Le transpondeur reçoit un flux de débit conforme à l'UIT et convertit les signaux à la longueur d'onde utilisée par le dispositif client. [16]

## 2.4 Architecture et fonctionnement du système DWDM

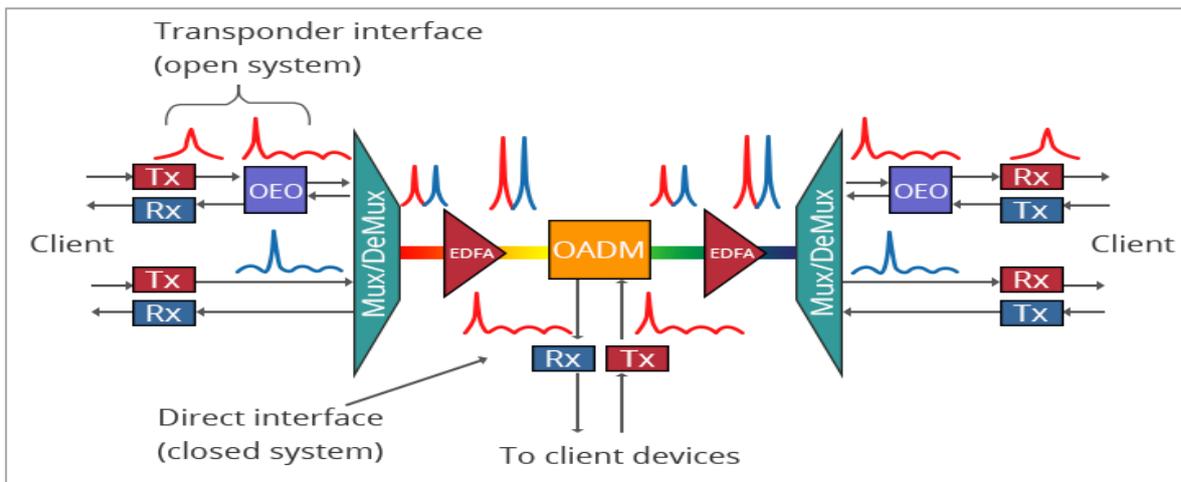


Figure 2.6 Architecture de système DWDM

Le système DWDM fonctionne comme suit :

1. Le transpondeur accepte une entrée sous la forme d'une impulsion laser standard monomode ou multimode. L'entrée peut provenir de différents supports physiques et de différents protocoles et types de débit.
2. La longueur d'onde du signal entrant de transpondeur est mise en correspondance avec une longueur d'onde DWDM.
3. Les longueurs d'onde DWDM du transpondeur sont multiplexées avec les signaux d'interface directe pour créer un signal optique composite qui est lancé dans la fibre.
4. Un préamplificateur (amplificateur booster) augmente la force de signal lorsqu'il quitte le multiplexeur.
5. Un OADM est utilisé à un emplacement distant pour extraire et ajouter des flux de débit d'une longueur d'onde spécifique.

6. Des amplificateurs optiques supplémentaires peuvent être utilisés le long de la longueur de la fibre (amplificateur en ligne) si nécessaire.
7. Un préamplificateur amplifie le signal avant qu'il n'entre dans le démultiplexeur.
8. Le signal entrant est démultiplexé en longueurs d'onde DWDM individuelles.
9. Les lambdas DWDM individuels sont soit mis en correspondance avec le type de sortie requis via le transpondeur, soit transmis directement à l'équipement du côté client.

## 2.5 Applications du DWDM dans un proche avenir

La première des applications du DWDM est la dorsale de transmission point à point, qui est actuellement déployée dans nombre de cas. On peut également l'appliquer à divers protocoles et structures de réseau, tels les réseaux optiques synchrones à circuits commutés (SONET, connu sous l'appellation hiérarchie numérique synchrone (SDH) en Europe), le réseau Internet fondé sur le protocole TCP/IP, le réseau intranet faisant appel au protocole TCP/IP ou à l'ATM, etc.

Les applications du DWDM point à point accroîtront la capacité de transmission des liaisons à fibres optiques existantes de manière spectaculaire, ce qui pourra réduire les coûts des réseaux. Le réseau de câblodistribution semble toutefois ne pas profiter de cette évolution du DWDM. Il serait possible de remplacer les câbles coaxiaux par des câbles optiques et d'exploiter un réseau DWDM pour les services de télédiffusion en transmettant la programmation d'une ou plusieurs chaînes sur une longueur d'onde, mais les coûts impliqués pourraient constituer le facteur déterminant.

Les technologies d'interconnexion entre les réseaux et protocoles existants, d'une part, et les dorsales DWDM point à point, d'autre part, en sont à l'étape de développement. Certaines d'entre elles sont déjà offertes à l'échelle commerciale. Nul obstacle technologique n'entrave l'érection d'une interface entre le réseau DWDM et la plupart des réseaux déjà en place. L'élaboration de produits suit son cours dans ce domaine.

La deuxième étape de l'application du DWDM consistera à ajouter des commutateurs/routeurs optiques aux dorsales DWDM. À cette étape, l'architecture et le protocole du réseau détermineront les coûts, voire la possibilité, de mise en place des commutateurs/routeurs. Compte tenu des mécanismes des réseaux actuels, y compris les réseaux SONET, Internet, ATM et de câblodistribution, SONET sera le fer de lance à cette

étape en raison de la simplicité de ses mécanismes de commutation et de multiplexage à répartition dans le temps (MRT) comparativement aux mécanismes des autres technologies.

On peut prévoir que les commutateurs électriques numériques et les multiplexeurs à répartition dans le temps seront remplacés par leurs équivalents de type optique, mais qu'il s'avérera beaucoup plus difficile de remplacer les routeurs d'Internet et les commutateurs des réseaux ATM puisque leur commande exige un niveau d'intelligence plus élevé pour faire fonctionner les protocoles.

Par conséquent, on peut s'attendre à un réseau SONET ou SDH entièrement optique dans un avenir assez rapproché, mais il faudra sans doute attendre plus longtemps pour voir un réseau à commutation de paquets entièrement optique [17].

## 2.6 Avantages et inconvénients de DWDM

Le DWDM présente le même avantage que le système WDM.

- Il répond aux besoins de débits et exploite largement la totalité de la bande passante à cause du petit espacement entre les canaux (0.4, 0.2, 0.1 nm), il permet donc la circulation de plusieurs longueurs d'ondes jusqu'à atteindre 160 canaux.
- Le DWDM minimise l'implantation des dispositifs ou des composants plus encombrants comme les répéteurs et les régénérateurs.
- On trouve plusieurs applications de ce type de multiplexage notamment l'utilisation dans le domaine sous-marin (longue distance), les réseaux WAN ainsi que le réseau dorsal (backbone).

Cette technologie présente des inconvénients, entre autres :

- La diaphonie entre les canaux à cause des petits espacements.
- Les effets non-linéaires.
- Les longues distances qui exigent plusieurs amplificateurs optiques en ligne tel que l'EDFA qui coûte cher.
- La gestion de la dispersion
- Le format de modulation RZ qui nécessite un spectre de fréquence plus grand par rapport à un format de modulation NRZ.[18]

## 2.7 Conclusion

La technologie du WDM est sans concurrence du point de vue de la capacité car le coût de la fibre et des matériaux ne cesse de baisser avec des portées toujours plus longues. L'accroissement de la capacité se fait de deux façons : en augmentant le nombre de canaux dans une fibre et en augmentant le débit par canal lors de l'émission. L'évolution du WDM a permis de battre de nouveaux records en matière de débit. Les innovations constantes dans les technologies de transmissions offrent de nouvelles possibilités d'économies.

L'objectif des systèmes WDM est d'atteindre des capacités encore plus grandes, pour ça la recherche aujourd'hui est concentrée sur le rapprochement des canaux et l'élargissement dans la bande passante optique exploitée tout en augmentant le débit binaire par canal

. On peut dire qu'aujourd'hui, la WDM/DWDM n'a pas encore atteint ses limites. On s'attend à de nouvelles techniques qui sont en cours de développement Pour avoir une liaison optique à haut débit, Plus l'utilisation la technologie WDM/DWDM, il est possible de générer des ondes impulsionnelles stables qui ont la propriété de pouvoir se propager sur de grandes distances dans un milieu non linéaire et dispersif sans grande modification et qui sont par conséquent idéales pour la transmission de données par fibres optiques.

De ce fait, en technologie WDM, un seul amplificateur optique se substitue aux N régénérateurs en chaque site de ligne, procurant ainsi une économie d'équipements croissante avec la longueur de la liaison et le nombre de canaux. Ce fut le véritable point de départ du développement des systèmes de transmission longue portée (typiquement entre 150 et 600 Km). La technologie WDM est dite dense lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'onde est égal ou inférieur à 100 GHz. On l'emploie désormais pour les transmissions longues distance. Dans la pratique, cela signifie que l'on fait passer dans une même fibre beaucoup de signaux portés par des fréquences très rapprochées les unes des autres.

# **Chapitre 3**

## Simulation sous OptiSystem

### 3.1 Introduction

Les systèmes de communication optique se développent rapidement, l'analyse de ces systèmes est très complexe et nécessite des outils logiciels avancés. OptiSystem est un de ces logiciels qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de communication optique.

Au cours ce chapitre, nous allons décrire le simulateur OptiSystem, et définir les éléments utilisés comme critères de qualité pour évaluer la qualité de la transmission des données des utilisateurs. Par la suite, nous présenterons l'étude et la conception d'un système de transmission optique. En utilisant la technique WDM précisément DWDM.

### 3.2 Présentation de logiciel de simulation OptiSystem

OptiSystem (Optical communication System Design Software) est un logiciel de simulation développé par une société canadienne qui permet aux chercheurs et ingénieurs de simuler, modéliser, analyser et concevoir n'importe quel module de système optique. Allant du dispositif le plus basique au système complet de communication, c'est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur très simple.

#### 3.2.1 Interface de l'Optisystem

L'interface Optisystem contient une fenêtre principale répartit en plusieurs parties une bibliothèque, un éditeur du layout et une fenêtre pour les Projets en cours.

- La bibliothèque : est une base de données qui contient tous les types de modèles qui permettent de réaliser les différents schémas modulaires.

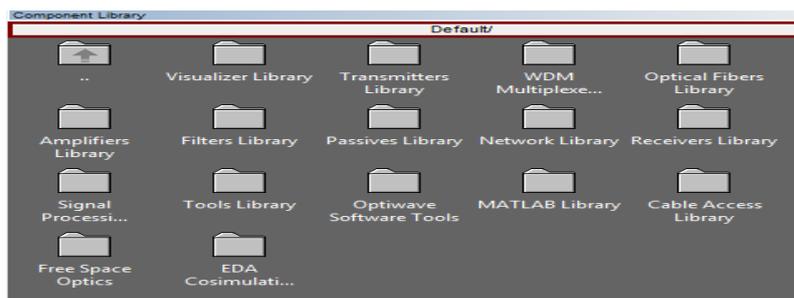


Figure 3.1 Bibliothèque de logiciel OptiSystem

- Editeur du layout : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de Conception.

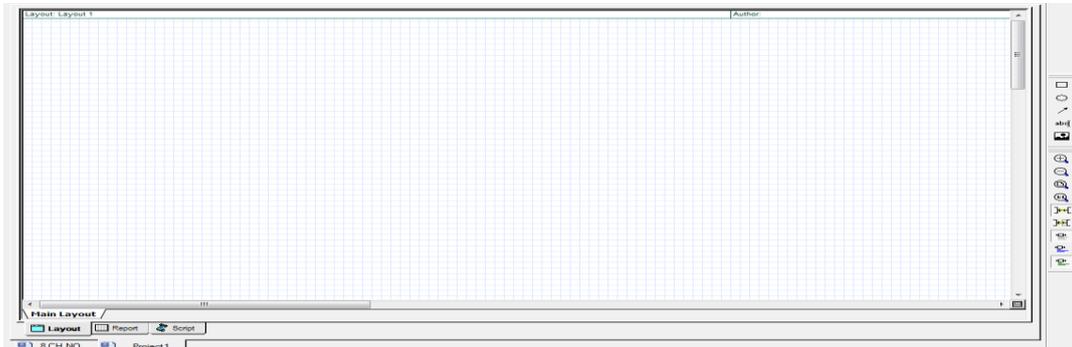


Figure 3.2 Editeur de layout

- Projet en cours (layout description): visualise divers fichiers et composants correspondants au projet en cours .

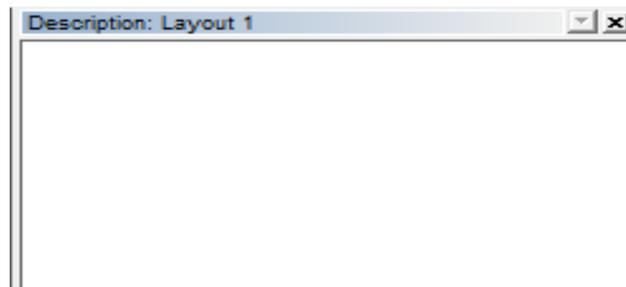


Figure 3.3 Fenêtre de description

### 3.2.2 Création et lancement d'une simulation

Pour créer un nouveau fichier cliquez sur FILE après NEW une nouvelle fenêtre apparaîtra (layout)

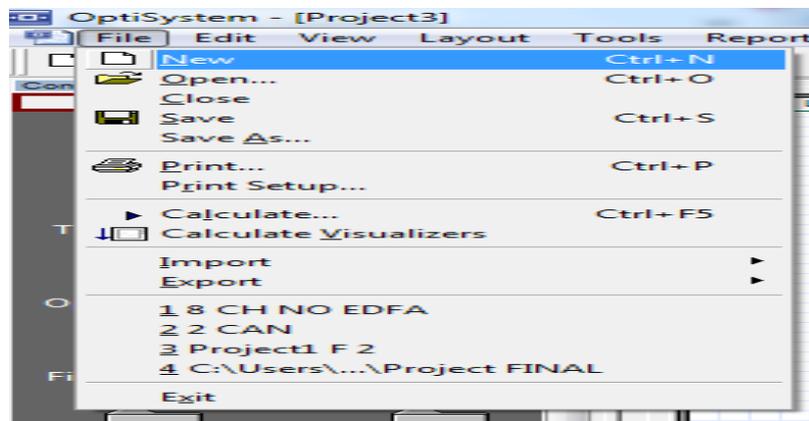


Figure 3.4 Création de nouveau fichier

Pour insérer un composant par exemple WDM multiplexeur de la bibliothèque OptiSystem, il suffit d'accéder au bloc Default, on choisit le fichier qui contient tous les déferents composants de multiplexage (WDM multiplexers library), puis on clique sur le multiplexers après on choisit WDM mux et on le glisse vers la fenêtre d'éditeur du layout.

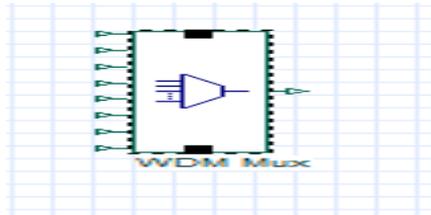


Figure 3.5 WDM MUX

Par deux clics sur ce composant utilisé, on obtient une fenêtre qui contient tous ces caractéristiques comme on peut changer ces paramètres.

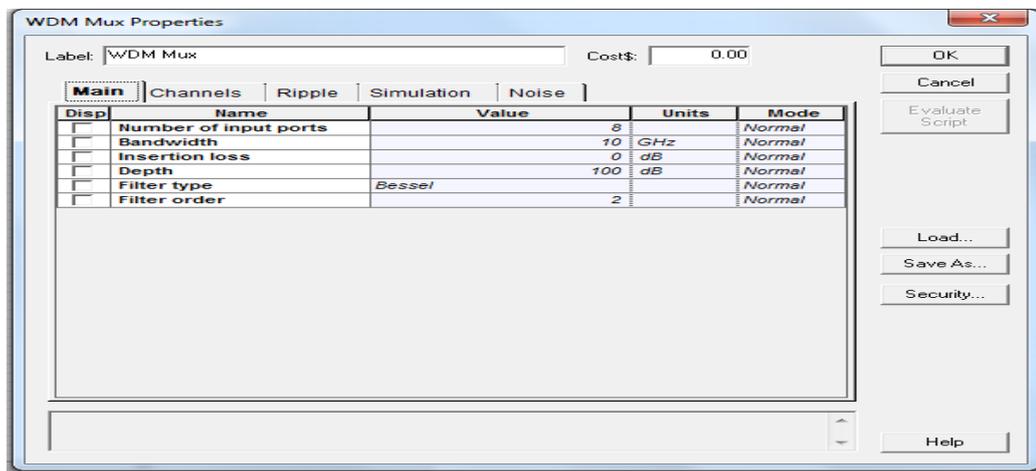


Figure 3.6 Interface de définition du WDM MUX

Pour exécuter une simulation, procédez comme montre dans la figure suivante

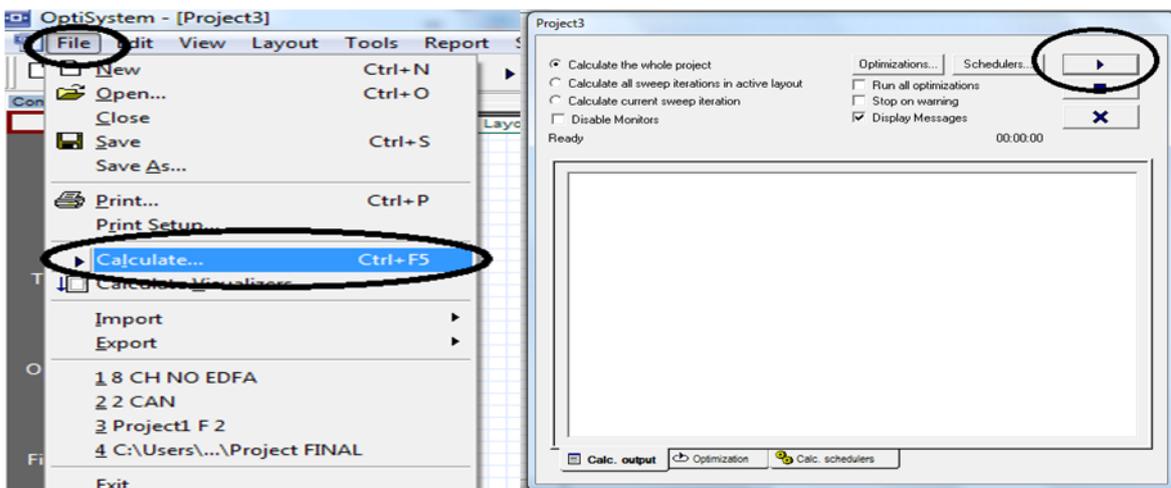


Figure 3.7 Fenêtre montre les procédés de lancement de la simulation

### 3.2.3 Critère de qualité d'une transmission

Pour définir la qualité d'une transmission optique, différents critères existent, Les trois principaux critères pour déterminer la qualité de transmission d'un signal sont :

Diagramme de l'œil (eye diagram), taux d'erreurs binaires (BER), facteur de qualité (Q)

#### A. Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est un moyen visuel efficace jugeant la qualité du signal il permet d'avoir une idée de la qualité du signal en termes de bruit d'amplitude, d'interférences entre symboles, de gigue temporelle, il est obtenu dans le domaine électrique après la détection par une photodiode et un filtre Le principe général plus le diagramme de l'œil est fermé Plus le signal est de mauvaise qualité. 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 [19].

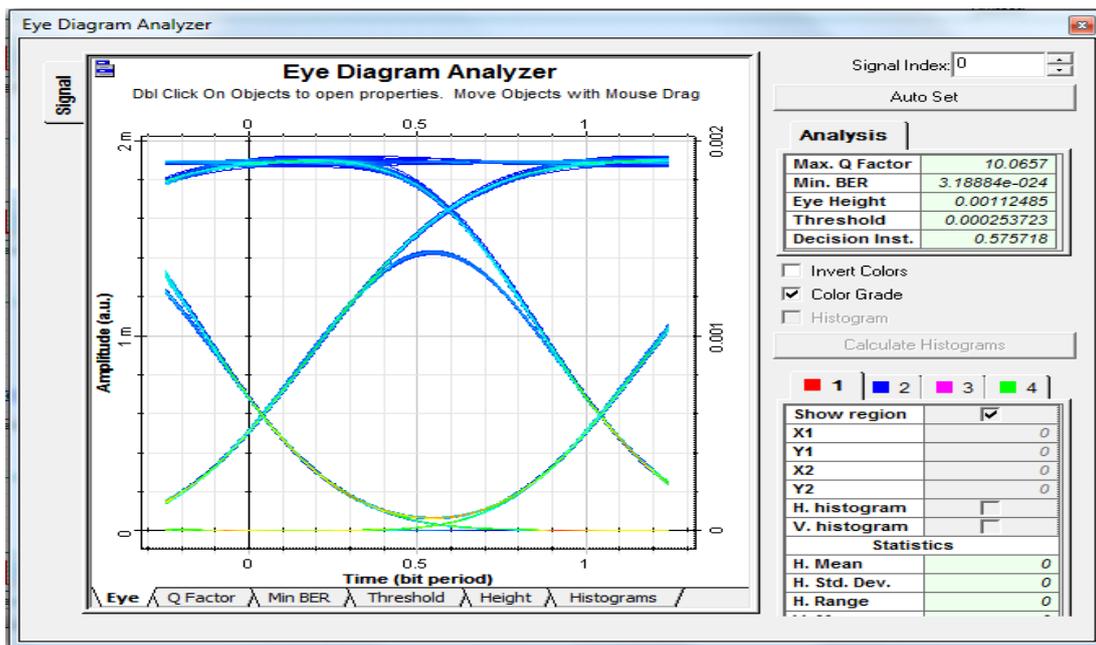


Figure 3.8 Affichage de Diagramme de l'œil d'un signal

#### B. Taux d'erreurs binaires (BER : Bite Error Rate)

Le taux d'erreur binaire BER est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits émis

$$\text{BER} = \frac{\text{Nombres de bits errone}}{\text{Nombres de bits transmis}} \quad (3.1)$$

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  $10^{-9}$  [20].

La mesure de qualité globale d'un système de canaux multiplexés en longueurs d'onde passe nécessairement par une mesure du BER de tous les canaux. Si un seul canal parmi plusieurs présentes des erreurs, BER du système global est proche de celui du canal présentant des erreurs.

### C. Facteur de qualité (Q Factor)

Facteur de qualité est un critère de qualité d'un signal optique, il est le rapport signal sur bruit électrique en entrée du circuit de décision du récepteur, il est défini par [21] :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\delta_1 - \delta_0} \quad (3.2)$$

Où  $\mu_0$  et  $\mu_1$  sont les valeurs moyennes qui représentent le signal utile  $\delta_0$  et  $\delta_1$  sont les écarts types des densités de probabilité des symboles 1 et 0.

Le facteur de qualité a une relation avec taux d'erreur binaire (TEB)

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.3)$$

Ou *erfc* la fonction erreur complémentaire définit par

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (3.4)$$

### 3.2.4 Avantages du logiciel OptiSystem

Optisystem Il présente de nombreux avantages, parmi lesquels :

- 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 [22].

### 3.3 Simulation d'un système de transmission optique

Dans cette partie nous allons faire l'étude sous le logiciel Optisystem d'un système de télécommunications optique le plus simple possible, Ce système est composé de trois parties l'émission, ligne de transmission et la partie de réception.

Son synoptique est donné par la chaîne suivante :

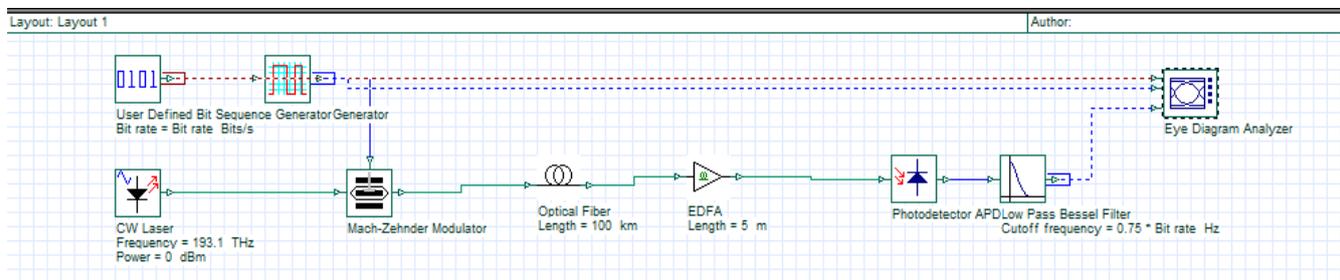


Figure 3.9 Schéma d'une liaison optique point à point

#### 3.3.1 Partie d'émission

Pour cette partie on est à un débit de 5 Gbit/s, une source laser continue qu'émettent à 193.1 THz et a puissance de 0 dBm, un générateur binaire NRZ et un modulateur Mach-Zehnder

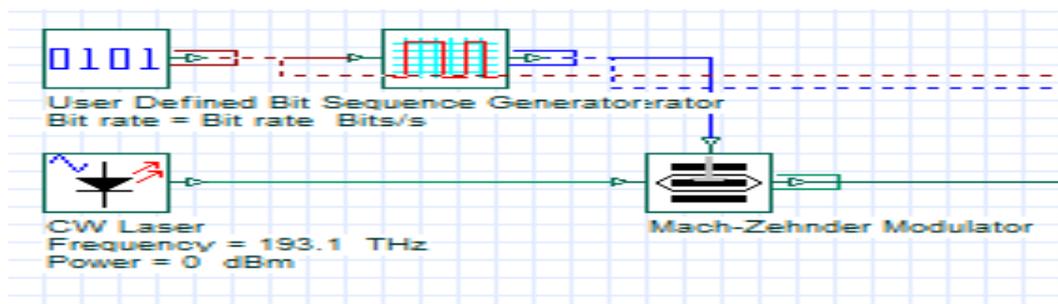


Figure 3.10 Partie d'émission de la liaison optique

#### 3.3.2 Ligne de transmission

Les composants utilisés pour construire une ligne de transmission optique sont :

- Une fibre monomode (SMF), caractérisée par une longueur de 100 km, une longueur d'onde égale 1550 nm et une atténuation de l'ordre de 0.2 dB/km
- Un amplificateur optique EDFA

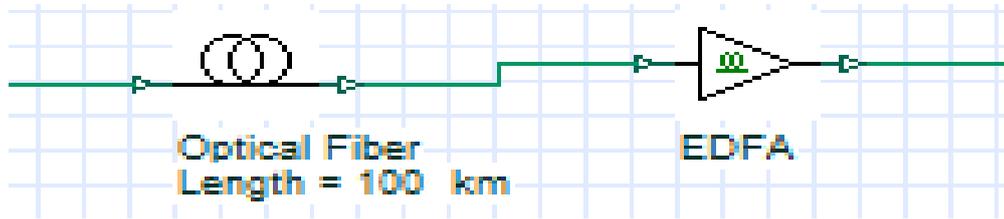


Figure 3.11 Partie de transmission de la liaison optique

### 3.3.3 Partie de réception

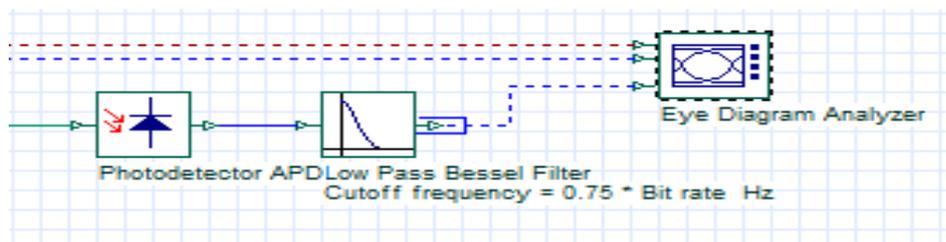


Figure 3.12 Partie de réception de la liaison optique

Dans cette partie pour le photodétecteur utilisé c'est une photodiode APD, Après le photodétecteur (conversion électrique) il y a un filtre de Bessel passe bas, laisse passer que le signal information. Sa fréquence de coupure est égale à :  $FC = 0.75 * \text{dB}$ .

Finalement Eye diagram analyzer qui contient 3 entrée la première relie avec 'User Defined Bit Sequence Generator' l'autre avec 'NRZ Pulse Generator' le dernier avec le 'filtre bessel pass bas', le diagramme l'œil nous permet de visualiser la qualité d'un signal dans le domaine temporel

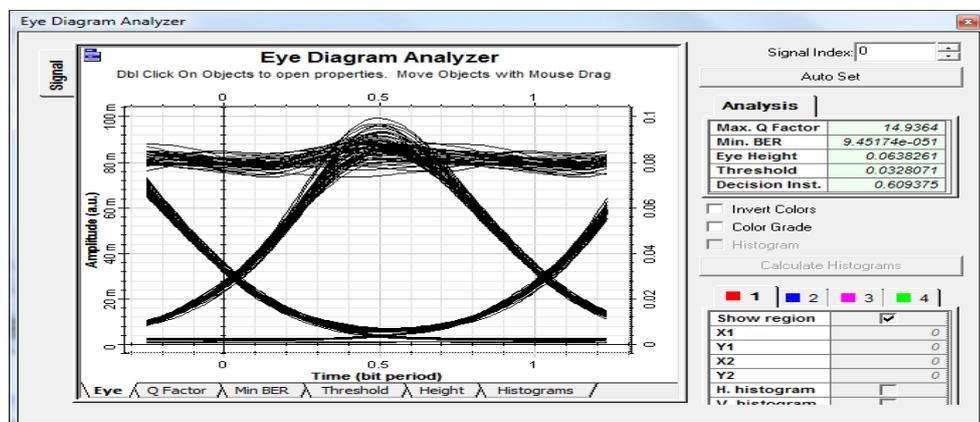


Figure 3.13 Eye Diagram de sa simulation

### 3.4 Simulation d'un système DWDM à 8 canaux

Dans cette partie nous allons faire l'étude d'un système DWDM à 8 canaux qui est basé sur la technique de multiplexage optique DWDM sous le logiciel Optisystem, Le schéma utilise est illustre dans la figure :

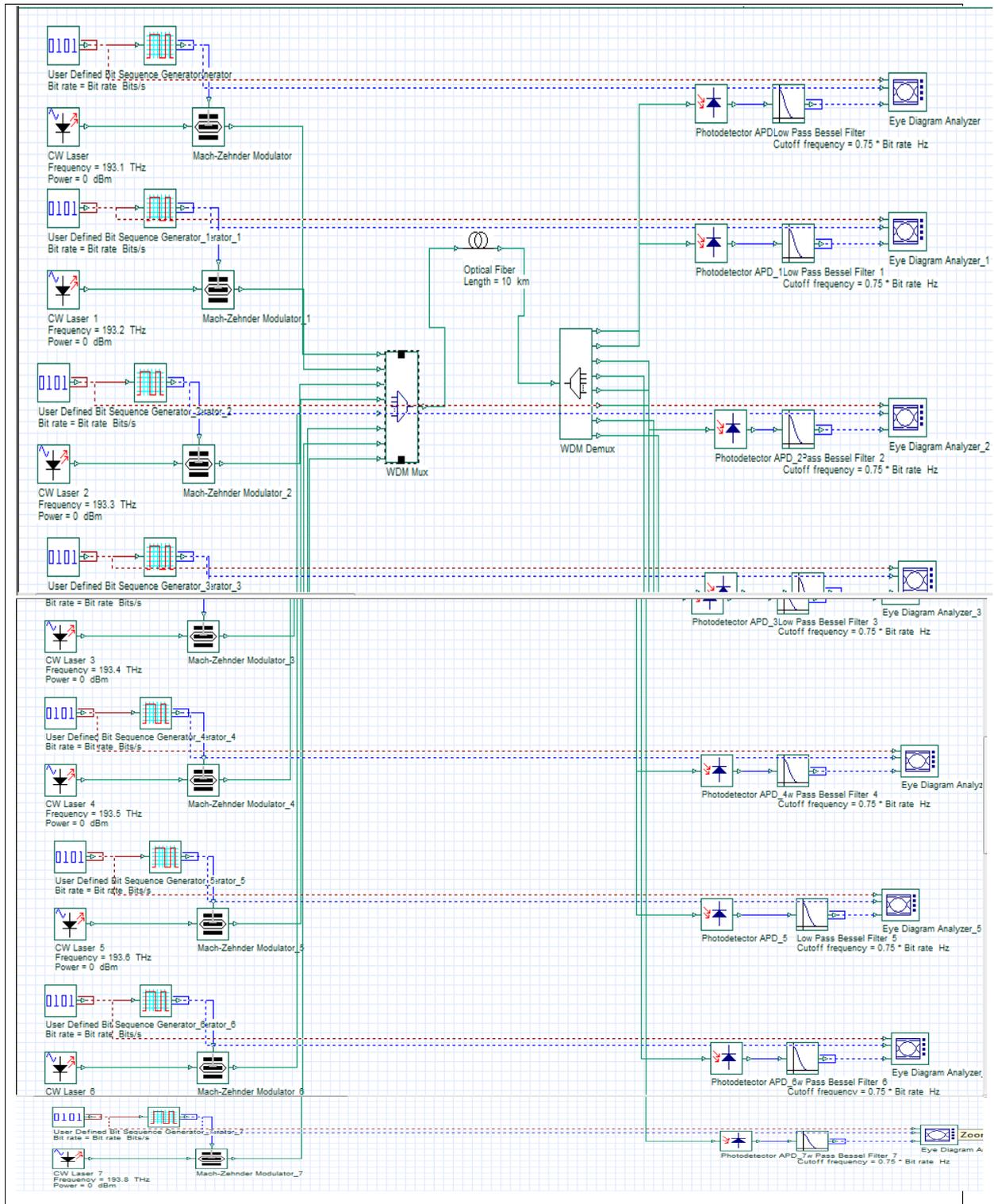


Figure 3.14 Schéma du système de communication à DWDM 8 canaux

### 3.4.1 Paramètres de simulation

Les Paramètres de cette simulation sont montrés comme suit :

Paramètres	Valeur
Débit binaire	40 Gbits/s
Générateur d'impulsions	NRZ
Emetteur	CW laser
Longueur de la fibre optique	10 KM
Atténuation de la fibre optique	0.2 dB/km
Puissance de Laser	0 dBm
Récepteur	APD
Plage de longueur d'onde de FO	[1565-1530] nm
Nombre de canaux	8

Tableau 3.1 Paramètres de simulation pour le système

Les canaux utilisés dans le système DWDM sont indiqués dans le tableau 3.2

Canal	Longueur d'onde (nm)	Fréquence (THz)
1	1553.58	193.1
2	1552.79	193.2
3	1551.99	193.3
4	1551.18	193.4
5	1550.38	193.5
6	1549.58	193.6
7	1548.78	193.7
8	1547.98	193.8

Tableau 3.2 Canaux du DWDM utilisés dans le système

Nous exécutons notre programme, le signal reçu s'affiche dans l'œil de diagramme.

Une ouverture claire de Diagramme de l'œil sur la figure ci-dessous (Figure 3.15) indique que le signal a été transmis avec succès. Le BER du récepteur égal à zéro ce qui signifiait que la transmission est parfaite

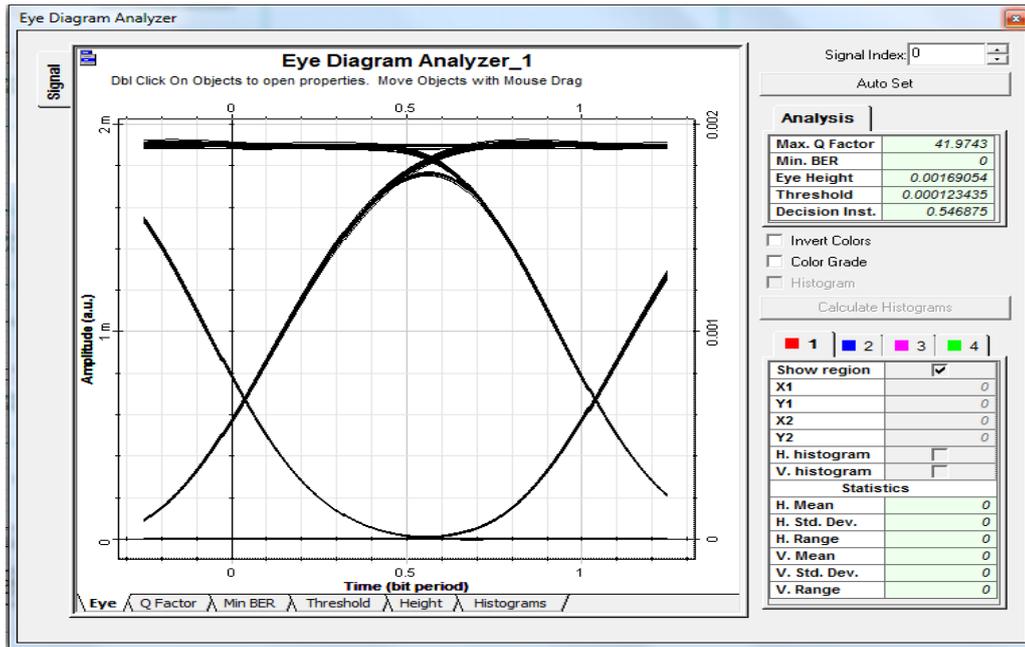


Figure 3.15 Eye diagramme de canal 1

### 3.4.2 Influence de la longueur de la fibre optique

Pour étudier l'influence de la distance sur le système DWDM, nous ferons une simulation au cours de laquelle nous modifierons la distance et observerons la qualité du signal reçu.

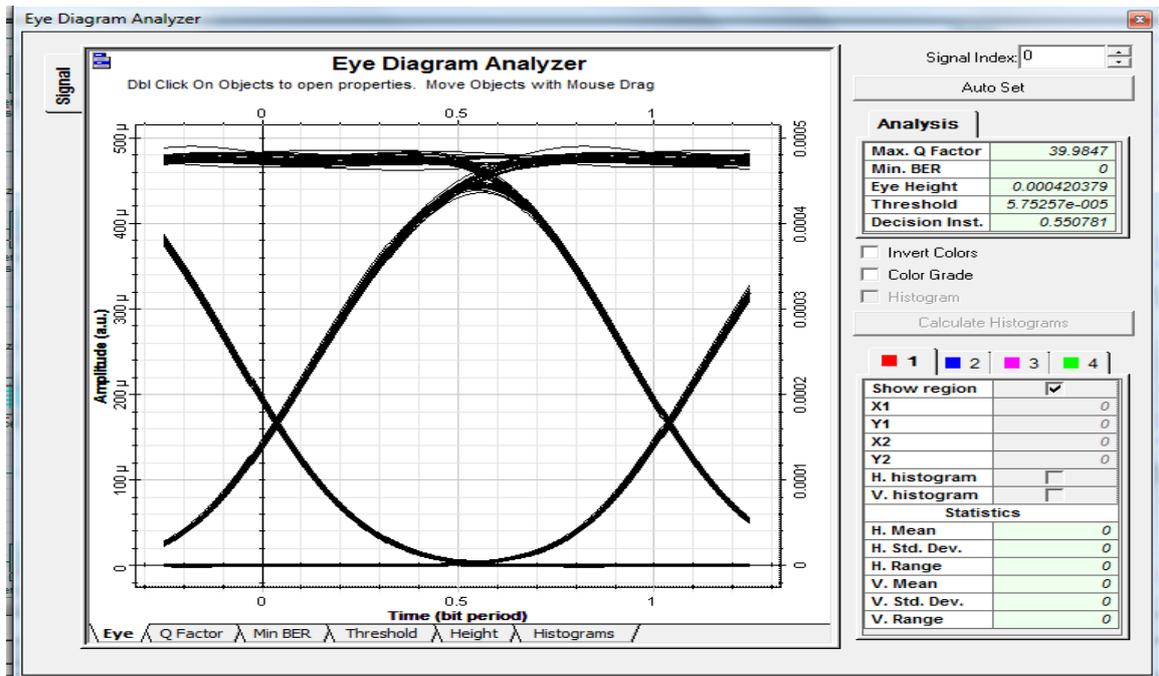


Figure 3.16 Signal obtenu avec une distance de fibre optique  $L = 40 \text{ Km}$

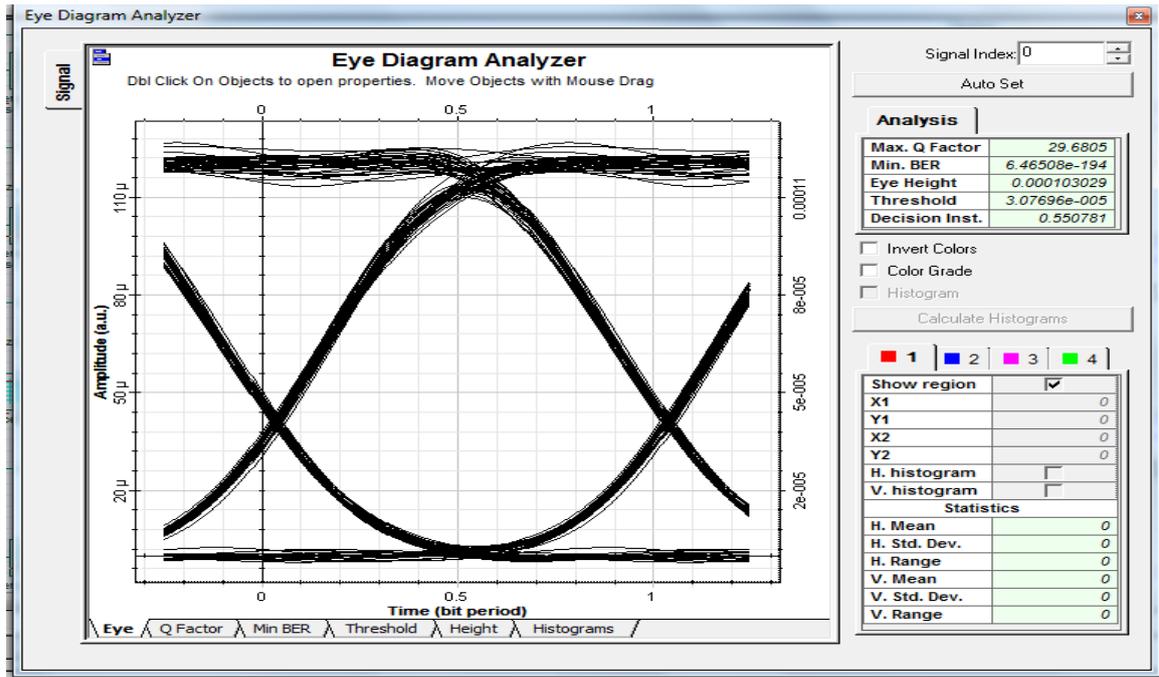


Figure 3.17 Signal obtenu avec une distance de fibre optique  $L = 70 \text{ Km}$

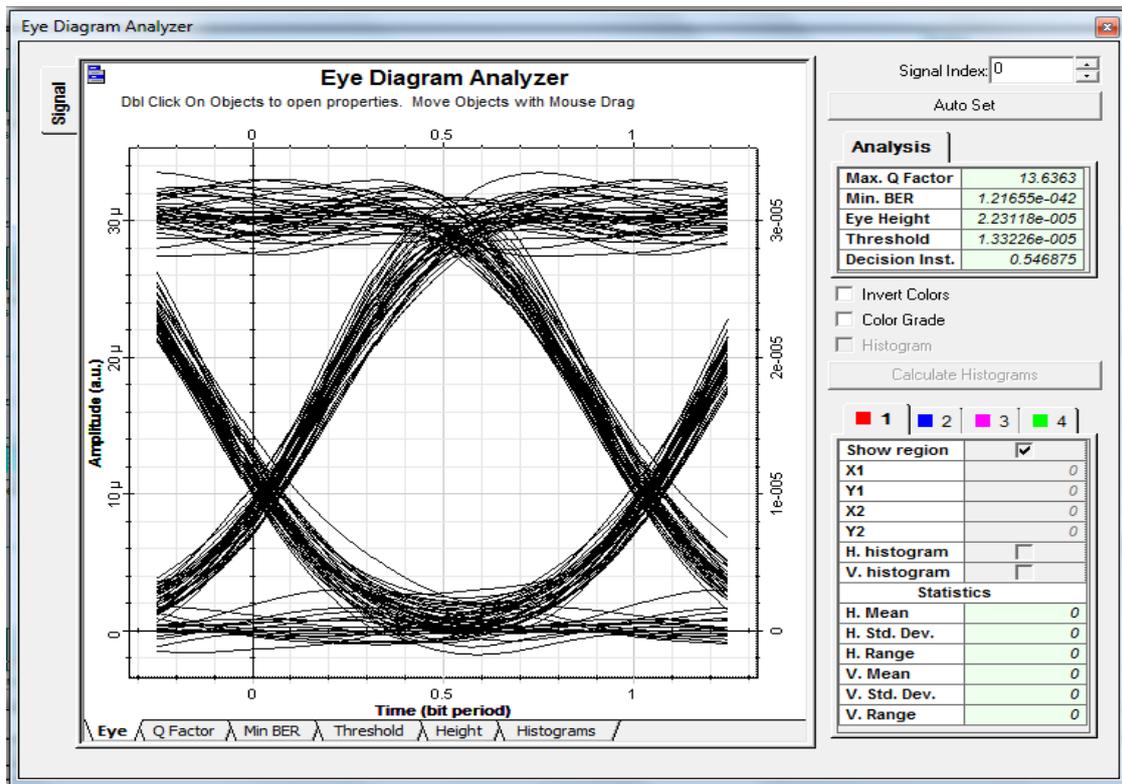


Figure 3.18 Signal obtenu avec une distance de fibre optique  $L = 100 \text{ Km}$

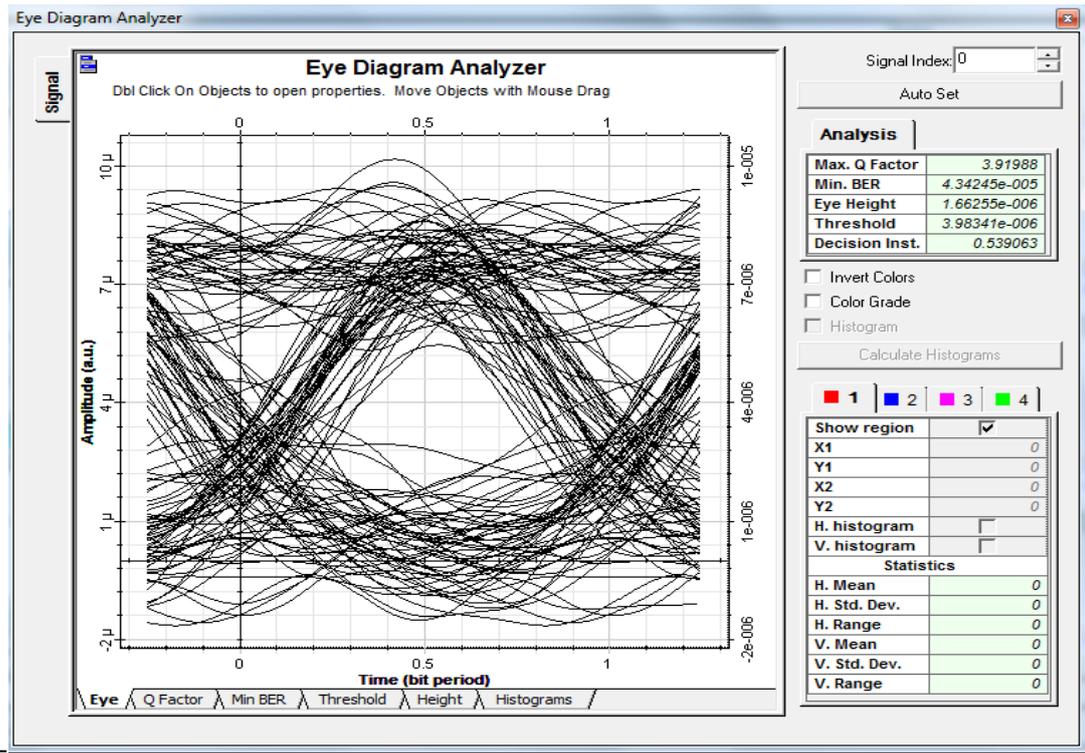


Figure 3.19 Signal obtenu avec une distance de fibre optique  $L = 130 \text{ Km}$

Nous transmettrons les résultats que nous avons dans le tableau suivant :

DISTANCE (KM)	10	40	70	100	130
Q FACTOR	44.39	39.98	29.68	13.68	3.91

Tableau 3.3 Influence de la longueur de F.O

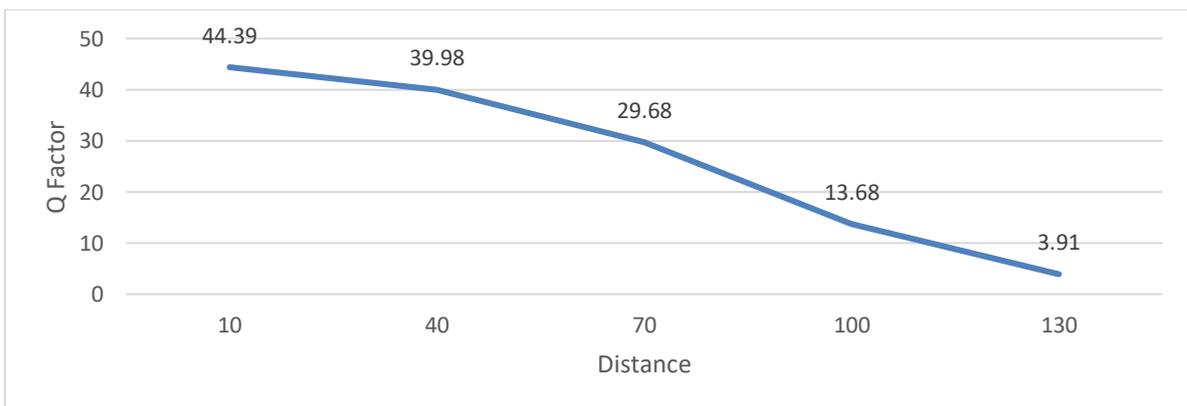


Figure 3.20 Facteur de qualité Q en fonction de la longueur de F.O

On constate que plus la longueur de fibre augmentée le facteur de qualité diminue, à cause des pertes d'informations qui se produisent à l'intérieur de la fibre dus aux phénomènes indésirables comme les pertes et l'atténuation de fibre.

Pour résoudre ce problème On doit ajouter un amplificateur optique EDFA dans la ligne de transmission

### 3.4.3 Influence de l'amplificateur optique

Pour mieux comprendre l'amplificateur optique nous allons faire une autre simulation dans laquelle en place un Optical Spectrum Analyzer avant et après un amplificateur pour voir ce qui est arrivé au signal au niveau de l'amplificateur

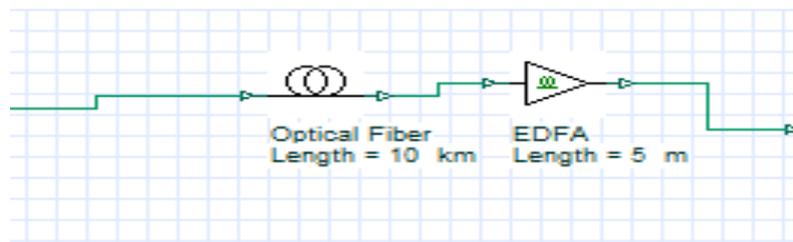


Figure 3.21 ligne de transmission optique

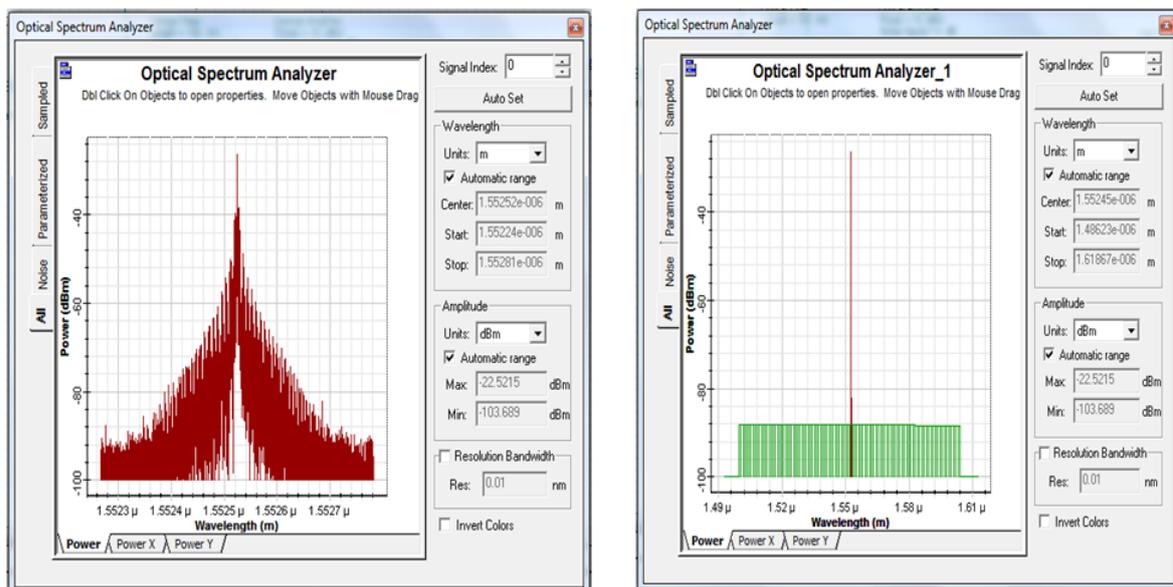


Figure 3.22 Spectre d'un canal optique individuel avant et après l'amplification

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.

Après avoir ajouté EDFA, nous simulons de nouveau avec la même longueur de fibre ( $L = 130 \text{ Km}$ ) et sans aucun changement des valeurs d'autre composant de notre system :

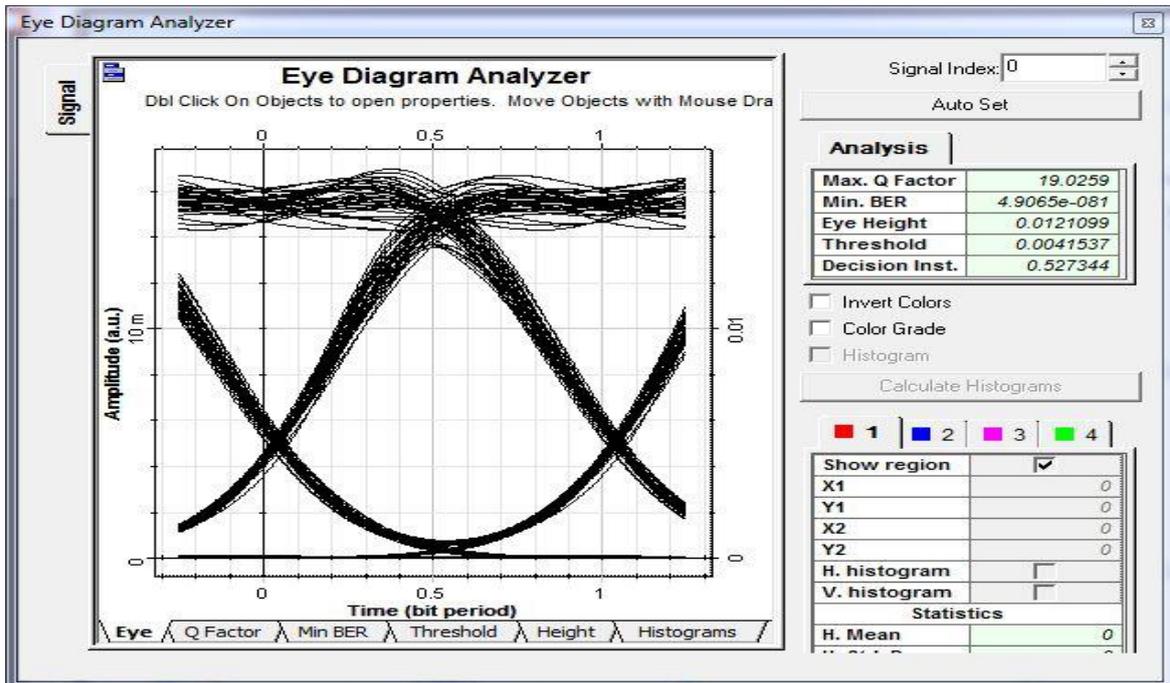


Figure 3.23 Diagramme de l'œil de canal 130 Km après l'amplification

On constate que le signal a été transmis par succès a 130 Km quand on ajoute un amplificateur, l'œil de diagramme est ouvert et le facteur de qualité augmente de 3.91 à 19.02.

Maintenant en continue a changé constamment la longueur des fibres optique

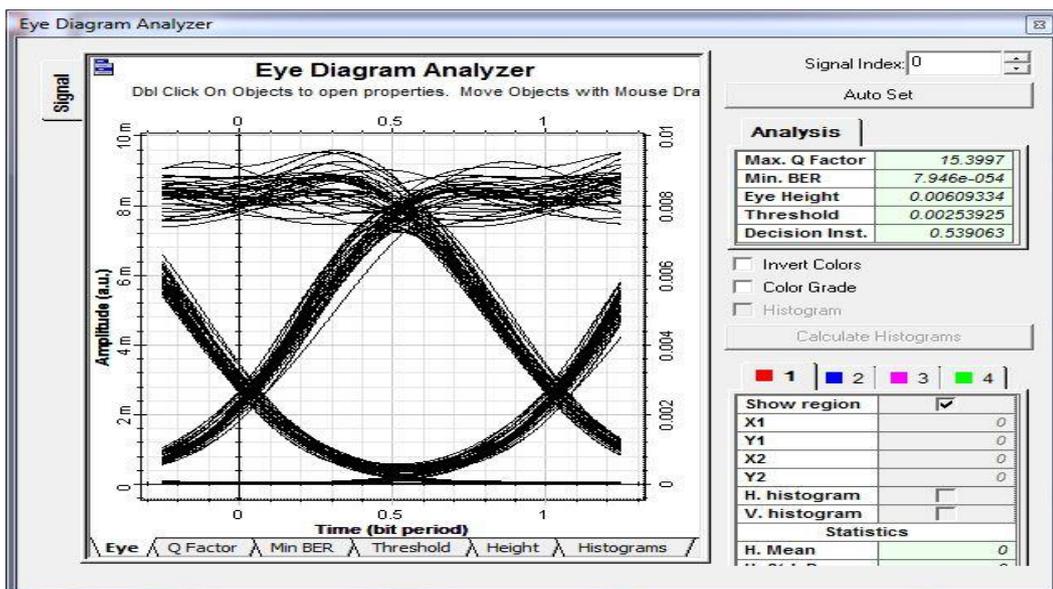


Figure 3.24 Diagramme de l'œil de canal 1 après l'amplification et avec une longueur de fibre  $L = 150 \text{ Km}$

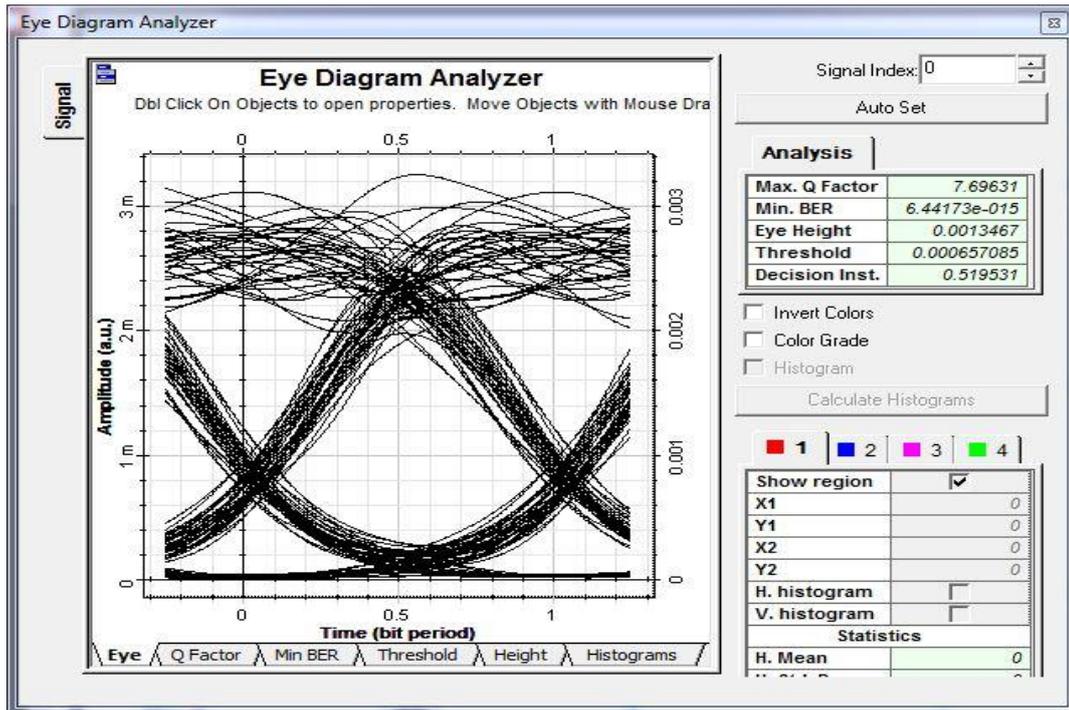


Figure 3.25 Diagramme de l'œil de canal 1 après l'amplification et avec une longueur de fibre  $L = 180 \text{ Km}$

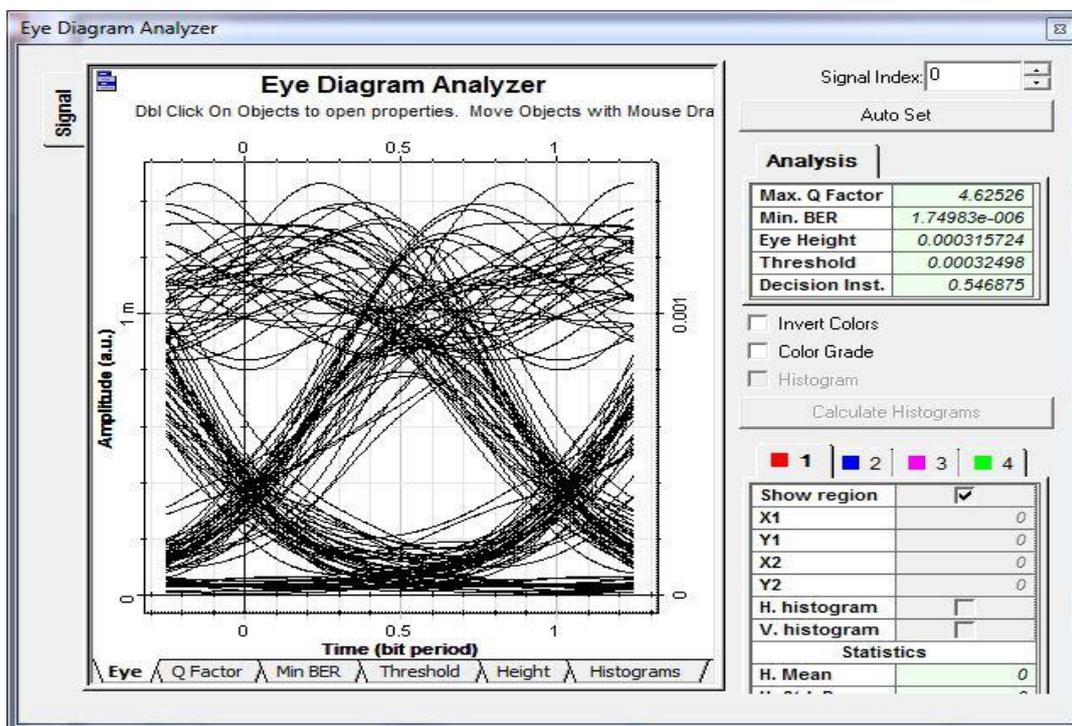


Figure 3.26 Diagramme de l'œil de canal 1 après l'amplification et avec une longueur de fibre  $L = 200 \text{ Km}$

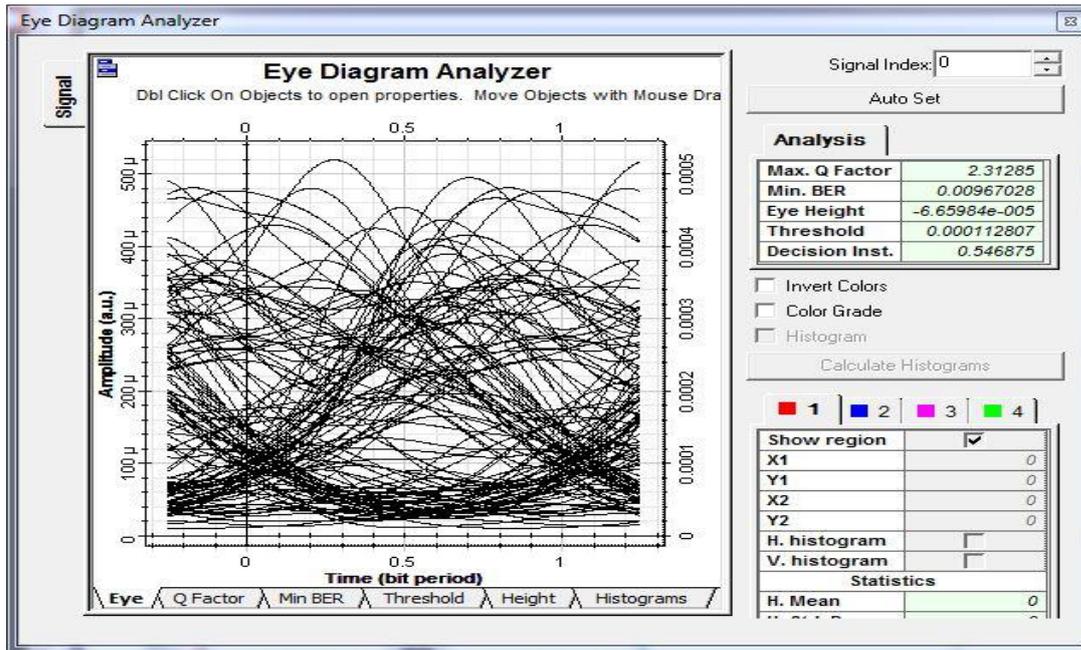


Figure 3.27 Diagramme de l'œil de canal 1 après l'amplification et avec une longueur de fibre  $L = 230 \text{ Km}$

- Nous allons transmettre les résultats que nous avons dans le tableau 3.4

longueur de F.O (Km)	130	150	180	200	230
Q FACTOR	19.02	15.39	7.69	4.62	2.31

Tableau 3.4 Influence de la longueur de la fibre optique

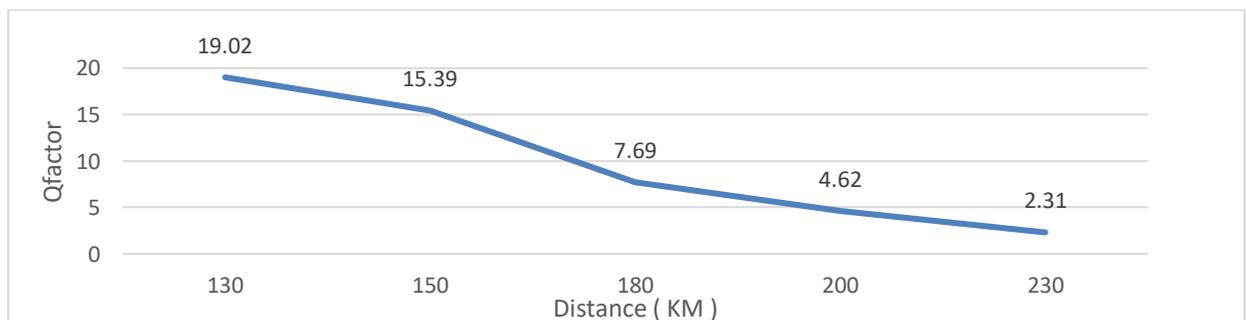


Figure 3.28 Facteur de qualité Q en fonction du la longueur de FO

A 230 Km on obtient un facteur de qualité  $Q = 2.31$ , œil de diagramme très ferme cela signifie que le signal reçu est déformé a cette distance et sous ces conditions, ça veut dire que nous nécessitons un amplificateur après a peu près chaque 100 Km pour bien reçu les donnes de signal transmis.

Pour simuler des grandes distances avec OptiSystem soit on ajoute un amplificateur après chaque fibre comme montre la figure ci-dessous :

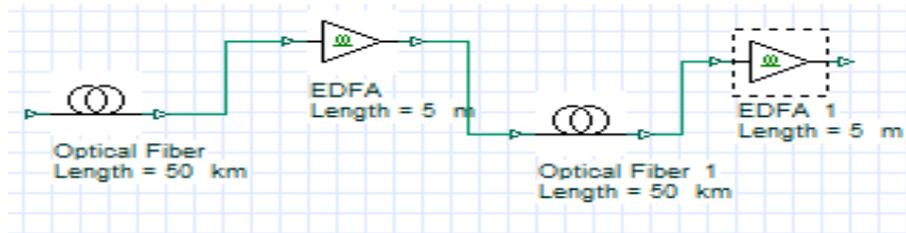


Figure 3.29 Ligne de transmission optique avec deux EDFA

Où nous utilisons un nouveau composant (loop control) ce bloc est utilisé pour simuler les grandes distances

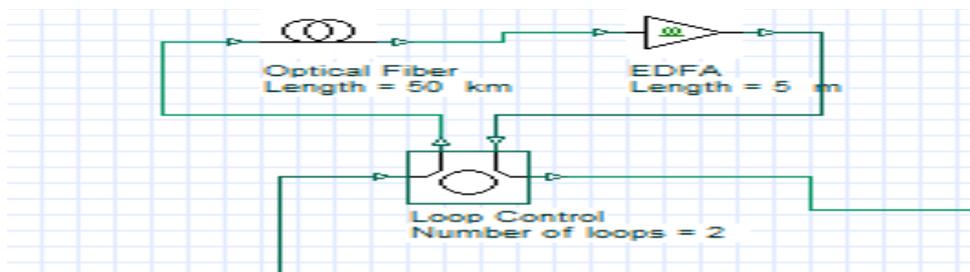


Figure 3.30 Ligne de transmission optique avec loop control

Comme le montre la figure ci-dessous Les résultats obtenus dans le diagramme de l'œil (Q factor, BER ...) sont identiques ( $Q = 28.3158$ ) pour les deux schémas.

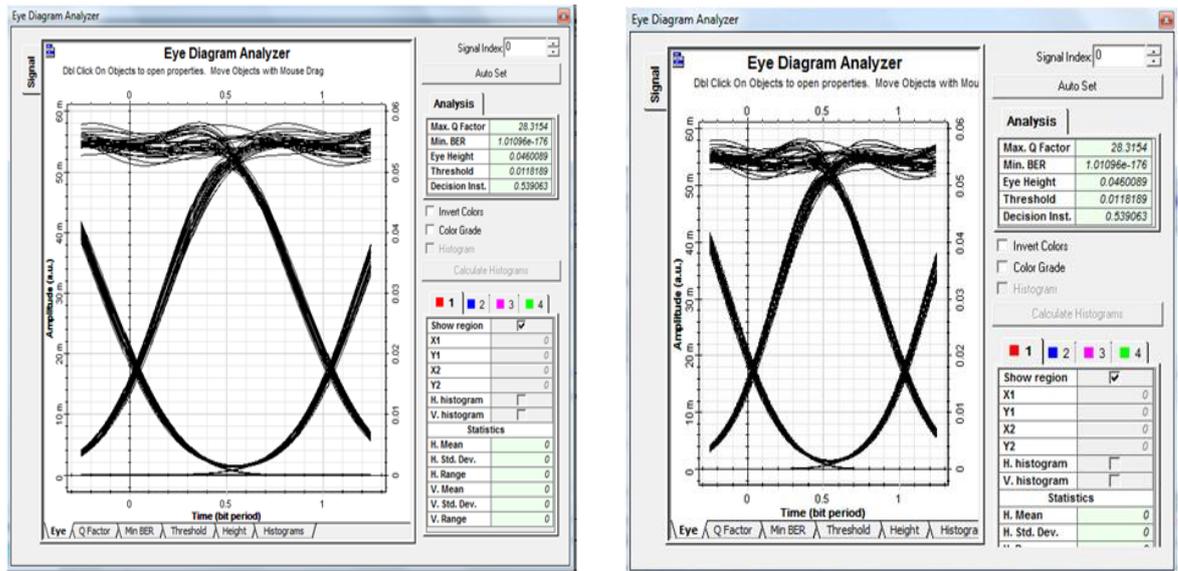


Figure 3.31 Diagramme de l'œil pour la première et la deuxième méthode

### 3.4.4 Influence du débit binaire

Il faut choisir un débit suffisamment élevé pour envoyer le maximum des informations dans un temps spécifique et pour étudier l'influence de débit binaire sur le système de transmission DWDM, nous allons faire varier le débit et analyser le signal reçu

-Pour un débit de 8 Gbits/s

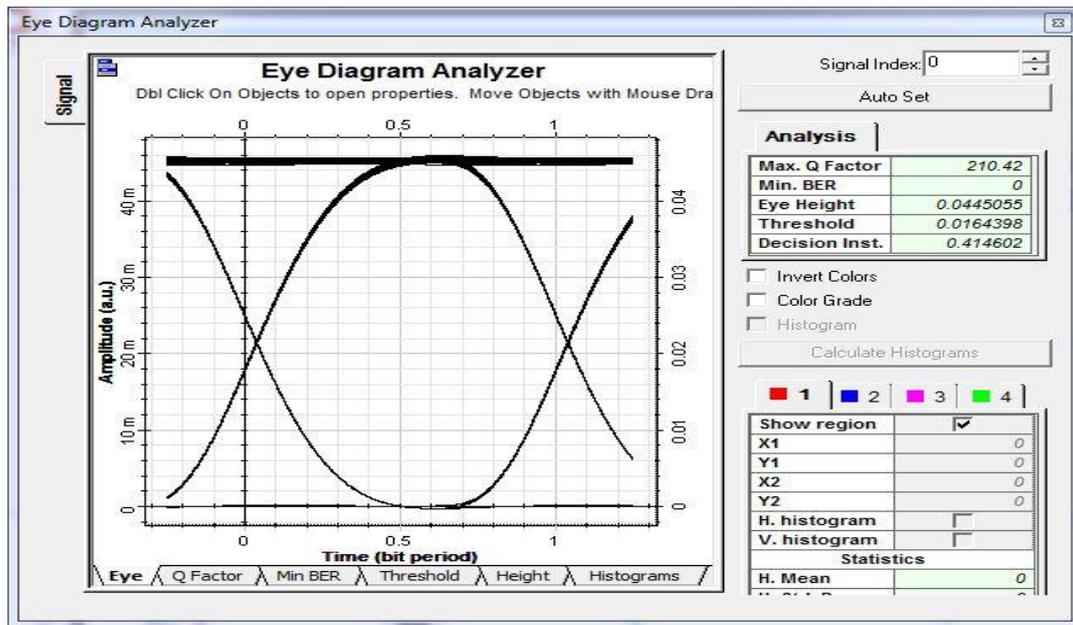


Figure 3.32 Diagramme de l'œil du canal 1 à 8 Gbit/s

Pour un débit de 40 Gbit/s

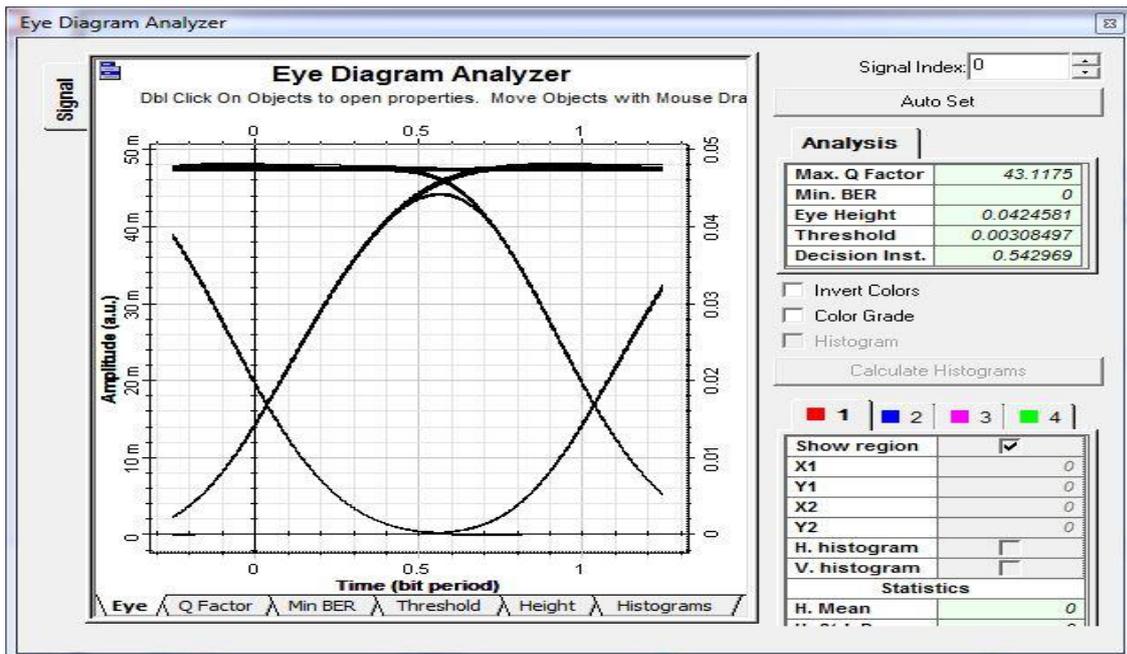


Figure 3.33 Diagramme de l'œil du canal 1 à 40 Gbits/s

Pour un débit de 64 Gbits/s

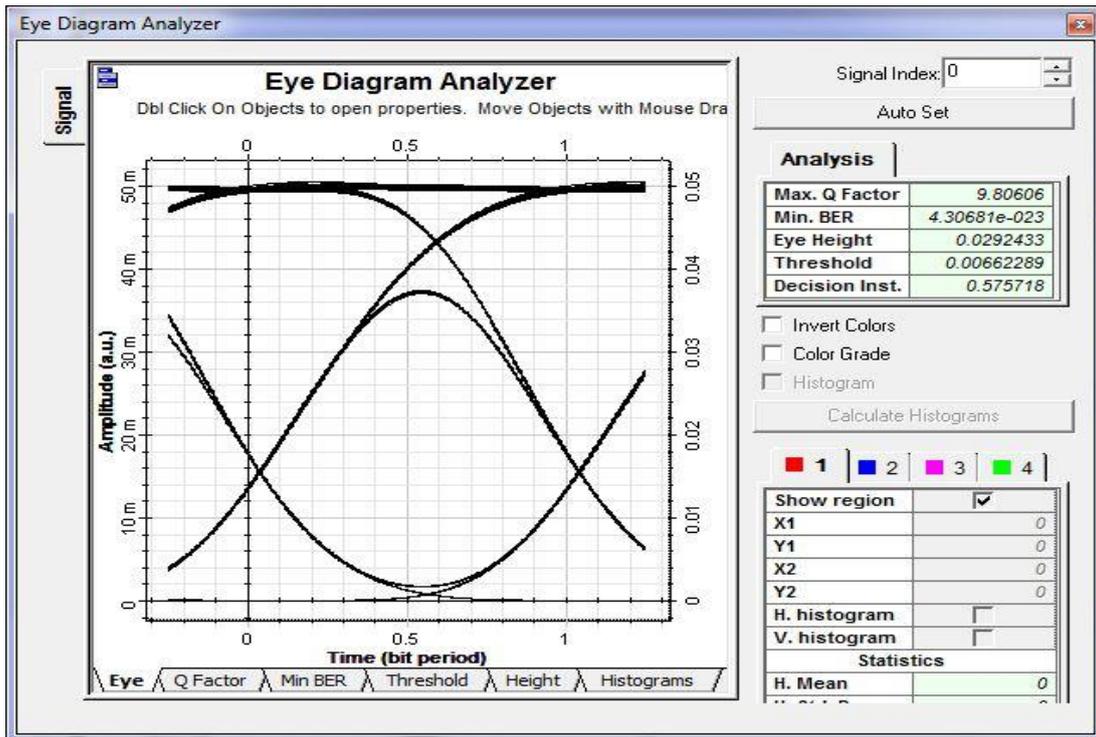


Figure 3.34 Diagramme de l'œil du canal 1 à 64 Gbits/s

Pour un débit de 80 Gbits/s

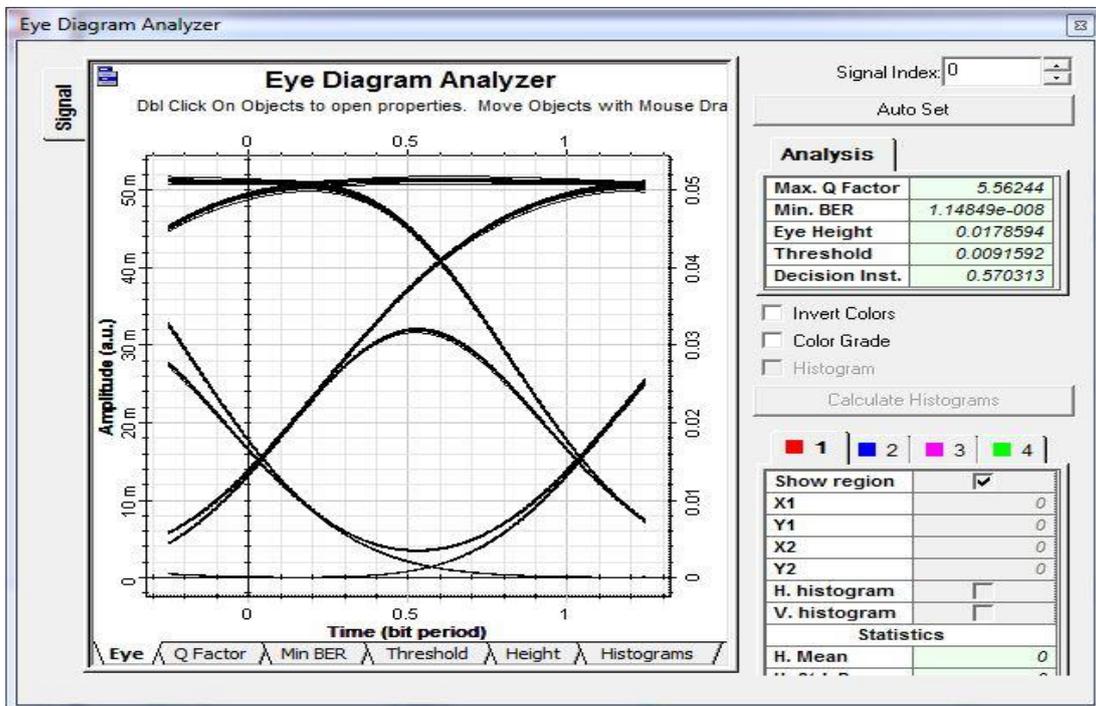


Figure 3.35 Diagramme de l'œil du canal 1 à 80 Gbits/s

Pour un débit de 120 Gbits/s

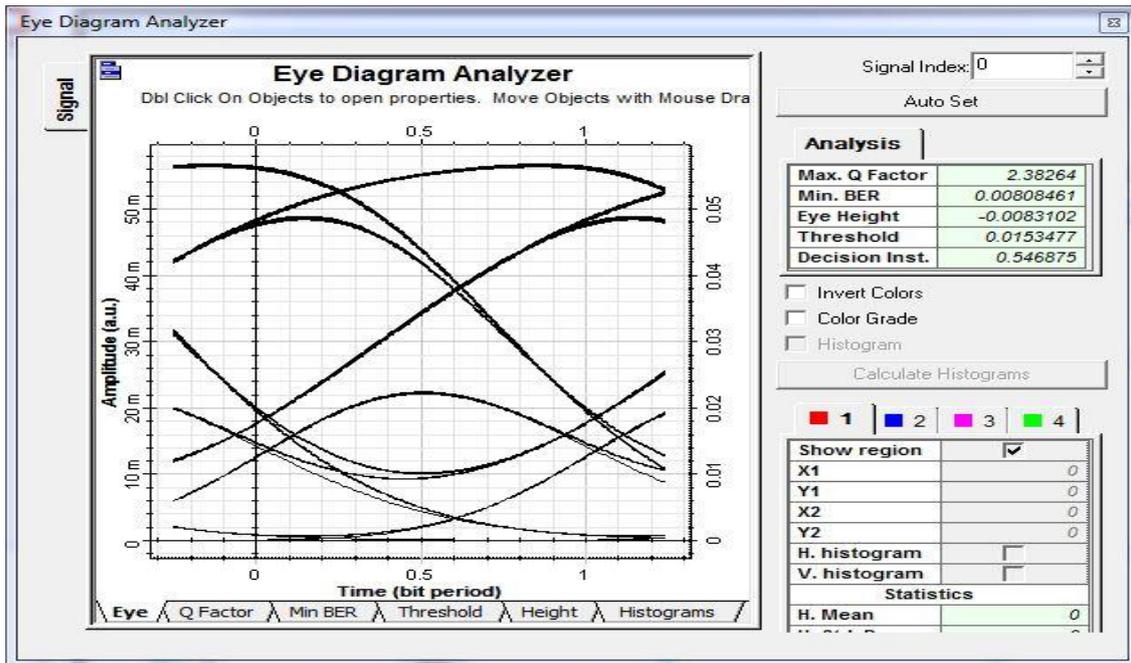


Figure 3.36 Diagramme de l'œil du canal 1 à 120 Gbits/s

On résume les résultats que nous avons eus dans ce tableau :

Débit (Gb/s)	8	40	64	80	120
Q FACTOR	210.42	43.11	9.8	5.56	2.38

Tableau 3.5 Influence du débit binaire

On traduit les résultats de ce tableau sous forme d'un graphe

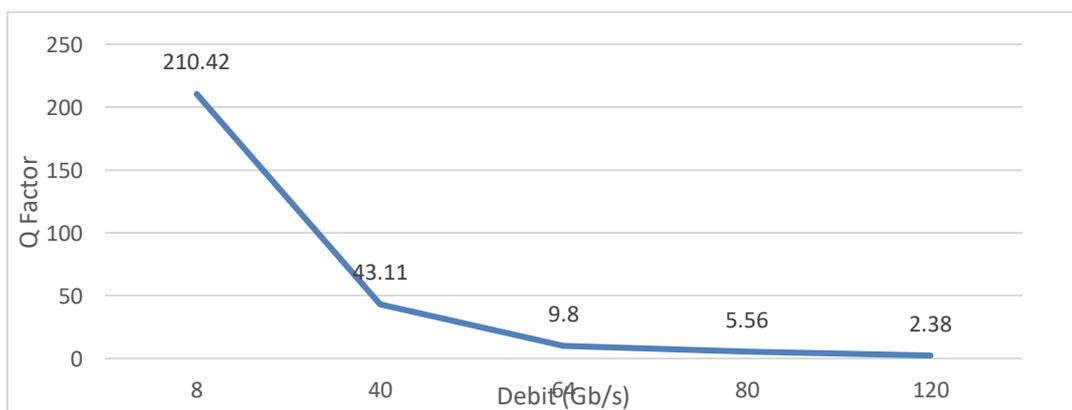


Figure 3.37 Facteur de qualité Q en fonction du débit binaire

On constate que plus le débit binaire d'émission est grand 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.

Donc 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.

### **3.5 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 et le facteur de qualité  $Q$ .

Dans la simulation On a étudié Influence du débit binaire et influence du la longueur et le rôle d'amplificateur EDFA, On constate que plus le débit binaire d'émission est élevé et plus la longueur est grande, plus le facteur de qualité est faible en raison de la perte d'information

## Conclusion Générale

- L'optique est aujourd'hui le support idéal pour la transmission dans les réseaux de télécommunication, en offrant la capacité nécessaire pour tout ce trafic d'informations qui circule dans les réseaux, L'optique a commencé aussi à apporter une flexibilité élémentaire, à travers commutateurs et sous-systèmes accordables.

- Le concept de multiplexage en longueur d'onde (WDM: Wavelength Division Multiplex), qui consiste à superposer sur une même fibre des signaux optiques ayant des porteuses de différentes longueurs d'onde. De plus, il permet également d'augmenter la capacité de transmission des informations au meilleur coût, et contribuer ainsi au développement croissant des télécommunications optiques.

- Les caractéristiques des télécommunications sur fibre optiques dépendent du support de transmission qui doit avoir des distorsions et des atténuations faibles valeurs et de type de dispositif électronique utilisé pour la transmission de la lumière et sa détection.

- Finalement avec plus de 10 millions de Km fabriqués chaque année, les fibres optiques sont désormais une technologie à maturité, qui se diffuse dans les domaines d'application de plus en plus vastes.

## Références Bibliographiques

- [1] Optique pour télécommunications - M.THUAL- IUT DE LANNION (Université de Rennes 1).
- [2] site web : waytolearnx URL : <https://waytolearnx.com/2018/07/difference-entre-fdma-tdma-et-cdma.html>
- [3] J.M.MUR, «Les fibres optiques Notions Fondamentales : câbles, connectique, composants, protocoles, réseau », France, 2012
- [4] R.SAIDI, « Etude d'une Structure de Liaison par Fibre Optique : Caractérisation de la Propagation et Bilan Energétique » Mémoire de magister En Electronique, Université Mohamed Kheider, Biskra, 18/03/2010.
- [5] H.ITGARETS, N.REZKELLAH, « Optimisation des Paramètres d'une Liaison à Fibre Optique », mémoire de master, Université A.MIRA, Bejaïa, 2015.
- [6] site web : Communauté FS URL : <https://community.fs.com/fr/blog/step-index-multimode-fiber-vs-graded-index-multimode-fiber.htm>
- [7] F.PLUMET, Cours de physique appliquée
- [8] ABEDELLI Farida, DERRADJI Nassima, « étude et application de la transmission DWDM par fibre optique à haut débit », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2010/2011.
- [9] Gilbert GRYNBERG, directeur de recherche au C.N.R.S laboratoire de spectroscopie hertzienne, blog, université de Paris-VI-Pierre-et Marie-Curie.
- [10] Michel DELHAYE, directeur d'institut au C.N.R.S., laboratoire de spectrochimie infrarouge et Raman (L.A.S.I.R.), blog, l'université des sciences et techniques de Lille

- [11] Siteweb :first sensor URL : <https://www.first-sensor.com/fr/produits/capteurs-optiques/detecteurs/photodiodes-aavalanche-apd/>.  
URL :<https://www.first-sensor.com/fr/produits/capteurs-optiques/detecteurs/photodiodespin/>
- [12] site web: Icy Science URL : <https://fr.theastrologypage.com/plesiochronous-digital-hierarchy>
- [13] François JANNIN, « sonet – SDH», Exposé – Informatique et Réseaux 3ème année , université marne la vallée paris-EST, Janvier 2010
- [14] Jean-Paul Gautier, les réseaux optiques, projet réseau académique parisien, société CADA ,1999
- [15] DELLIER.S, - « Contributions à la conception des circuits micro-ondes», Thèse de doctorat, l'Université de LIMOGES, 2005
- [16] site web : Fs community URL : <https://community.fs.com/fr/blog/an-overview-of-dwdm-technology-and-dwdm-system-components.html>
- [17] IEEE « Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens » Canadian Review - Summer / Été 1999
- [18] KHERICI Cheikh, «Etude comparative des différentes méthodes de multiplexage optique pour les télécommunications.», THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES, 2021
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] SÉRIE O: SPÉCIFICATIONS DES APPAREILS DE MESURE « Equipement de test du facteur Q pour l'évaluation des performances de

transmission des canaux optiques », Recommandation UIT-T O.201 le (07/2003)

- [22] 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.