

*A mes parents,*

*A toute la famille...*

## **Résumé**

La transmission optique a pris le pas sur toutes les autres solutions comme technologie de transport grâce aux progrès en WDM. Dans les années à venir, les technologies optiques continueront de faire face à la demande croissante de capacité, conséquence inévitable de la généralisation de l'internet et des services multimédia. La technologie WDM a supplanté toutes les autres technologies de transport de communication, et en plus, l'intérêt de cette technologie est d'augmenter la capacité et limiter le coût d'un réseau optique.

Ce mémoire est consacré à l'étude et conception d'un système de transmission optique à très haut débit en utilisant la technologie WDM sous le logiciel OPTISYSTEM. Cette étude est axée sur trois types de scénarios:

- Une liaison simple.
- Une liaison WDM-P2P unidirectionnelle.
- Une liaison WDM-P2P bidirectionnelle.

Les indicateurs permettant de suivre les performances d'un réseau optique et de déterminer toute dégradation pouvant affecter la qualité de service de réseau ont défini comme suivants : le taux d'erreur binaire BER, le rapport signal sur bruit optique OSNR et le facteur de qualité Q.

**Mots clés :** Transmission optique, WDM, BER, OSNR, facteur de qualité Q.

# Remerciements

---

*Ce travail de recherche a été effectué au sein du laboratoire des Systèmes et Technologies de l'information et de la Communication (STIC) de la Faculté de Technologie à l'Université Abou-Bekr Belkaïd Tlemcen, sous la direction de Monsieur Mohammed FEHAM, Professeur à l'Université de Tlemcen.*

*On voudrait tout d'abord remercier sincèrement notre Encadreur Monsieur Samir KAMECHE, Maître de Conférences classe A à l'Université de Tlemcen, non seulement pour son encadrement actif mais aussi pour sa grande disponibilité, sa patience, ainsi que pour la générosité avec laquelle il a su partager ses connaissances et conseils.*

*Au terme de ce projet, on tient à remercier Monsieur Haroun Errachid ADARDOUR, Doctorant à l'Université de Tlemcen, pour la qualité de son Co-encadrement, son soutien et ses directives précieuses pendant toute la durée de ce travail.*

*Nos remerciements les plus respectueux s'adressent à Monsieur FEHAM Mohammed, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de présider le jury de ce Mémoire.*

*Nous exprimons également notre reconnaissance à Monsieur BORSALI Ahmed Riad, Maître de Conférences classe A à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner et de juger les travaux de ce Mémoire.*

*Enfin, que nos parents, nos familles et nos amis trouvent à travers ces quelques lignes l'expression de notre profonde gratitude pour leur soutien et leurs encouragements de tous les instants. On vous en remercie chaleureusement.*

# Table des matières

Résumé .....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	iii
Sigles et abréviation .....	vi
Liste des figures .....	ix
Liste des tableaux.....	xii
Introduction Générale.....	2

## Chapitre I : La Fibre Optique et leurs types

I.1 Introduction .....	5
I.2 Supports de Transmission .....	5
I.3 La fibre optique .....	5
I.3.1 Caractéristiques de la fibre optique.....	6
I.3.2 Pourquoi nous utilisons la Fibre Optique.....	6
I.4 Notions sur la fibre .....	7
I.4.1 Réflexion Totale .....	7
I.4.2 Ouverture Numérique (ON).....	7
I.4.3 Les Modes de Propagation.....	8
I.4.4 La Bande Passante .....	8
I.4.5 L'Atténuation .....	8
I.5 Les Différentes Fibres Optiques (FO).....	9
I.5.1 FO Multimode .....	10
I.5.2 FO Monomode.....	11
I.6 Les normes spéciales de la fibre optique.....	12
I.7 Quelques types de fibres monomodes.....	12
I.7.1 Fibre standard .....	12
I.7.2 Fibre à dispersion décalée.....	13
I.7.3 Fibre à dispersion décalée non nulle .....	13
I.8 Déploiement FTTx.....	14
I.9 Conclusion .....	15

## Chapitre II : La Technologie WDM

II.1 Introduction .....	16
II.2 Réseau d'accès optique .....	16
II.2.1 La terminologie du réseau d'accès .....	17
II.2.2 Différentes topologies d'architecture du réseau d'accès optique .....	18
II.2.2.1 Point à Point (P2P).....	19

II.2.2.2 Point à Multipoint Active (P2MA).....	19
II.2.2.3 Point à Multipoint Passive (P2MP où PON) .....	19
II.3 Multiplexage sur fibre optique.....	20
II.3.1 Le Multiplexage TDM.....	21
II.3.2 Le Multiplexage WDM .....	21
II.3.2.1 Le principe .....	21
II.3.2.2 Les types des systèmes WDM.....	22
a. Multiplexages à filtres .....	22
b. CWDM .....	23
c. DWDM .....	23
II.3.2.3 Les apports de la technologie WDM .....	24
II.3.2.4 Les limites de la technologie WDM.....	25
II.4 Conclusion.....	25

### **Chapitre III : Les Composants Optiques et les Critères de Qualité**

III.1 Introduction.....	27
III.2 Les composants optoélectroniques .....	27
III.3 Les transmetteurs .....	27
III.4 Modulation.....	30
III.5 Fenêtre de transmission et les bandes de fréquences optiques WDM.....	30
III.6 Multiplexeur/Démultiplexeur Optique .....	32
III.7 Transpondeur .....	33
III.8 Amplificateur optique .....	33
III.8.1 Les différents types d'amplificateurs .....	34
III.8.2 Comparaison des amplificateurs .....	35
III.9 Les récepteurs .....	35
III.10 Le rapport signal sur bruit optique (OSNR) .....	37
III.11 Conclusion .....	38

### **Chapitre IV : Résultats et Interprétations**

IV.1 Introduction.....	40
IV.2 Performance d'un système de transmission optique à haute débit.....	40
IV.3 Présentation du logiciel Optisystem .....	41
IV.3.1 Optiwave : un logiciel complet pour la simulation optique.....	41
IV.3.2 Les principaux avantages .....	41
IV.3.3 Edition et simulation.....	42
IV.4 Résultats de simulation et interprétations.....	44
IV.4.1 Le premier scénario : Résoudre le problème de la dispersion chromatique par des différentes configurations (une liaison simple) .....	44
IV.4.2 Le deuxième scénario : Application d'une configuration adoptée sur une liaison WDM- P2P à 4 canaux .....	47
IV.4.3 Le troisième scénario : Application d'un système 4 canaux WDM-PON P2P bidirectionnel .....	49
IV.5 Conclusion .....	54

Conclusion Générale .....	56
Bibliographie.....	59

**Sigles et abréviations****A**

<b>APD</b>	<b>Avalanche Photodiode.</b>
<b>ATM</b>	<b>Asynchronous Transfer Mode.</b>
<b>ASE</b>	<b>Amplifier Spontaneous Emission.</b>

**B**

<b>BER</b>	<b>Bit Error Rate.</b>
------------	------------------------

**C**

<b>CWDM</b>	<b>Coarse Wavelength Division Multiplexing.</b>
-------------	---

**D**

<b>DCF</b>	<b>Dispersion Compensating Fiber.</b>
<b>DEL</b>	<b>Diode Electroluminescent.</b>
<b>DFB</b>	<b>Distributed Feed-Back.</b>
<b>DL</b>	<b>Diode Laser.</b>
<b>DSF</b>	<b>Dispersion Shifted Fiber.</b>
<b>DSF</b>	<b>Dense Wavelength Division Multiplexing.</b>

**E**

<b>EDFA</b>	<b>Erbium Doped Fiber Amplifier.</b>
<b>ETDM</b>	<b>Electronic Time Division Multiplexing.</b>

**F**

<b>FDM</b>	<b>Frequency Division Multiple.</b>
<b>FWM</b>	<b>Four-Wave Mixing.</b>

**I**

<b>ITU</b>	<b>I</b> nternational <b>T</b> elecommunication <b>U</b> nion.
<b>IP</b>	<b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol.
<b>IT</b>	<b>I</b> ntervalle de <b>T</b> emps.

**N**

<b>NF</b>	<b>N</b> oise <b>F</b> igure.
<b>NRZ</b>	<b>N</b> on <b>R</b> eturn to <b>Z</b> ero.
<b>NZ - DSF</b>	<b>N</b> on <b>Z</b> ero <b>D</b> ispersion <b>S</b> hifted <b>F</b> iber.

**O**

<b>OC</b>	<b>O</b> ptical <b>C</b> arrier.
<b>OTDM</b>	<b>O</b> ptical <b>T</b> ime- <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing.
<b>OSNR</b>	<b>O</b> ptical <b>S</b> ignal-to- <b>N</b> oise <b>R</b> atio.

**P**

<b>PIN</b>	<b>P</b> ositive <b>I</b> ntrinsic <b>N</b> egative <b>P</b> hotodiodes.
<b>PMD</b>	<b>P</b> olarization <b>M</b> ode <b>D</b> ispersion.
<b>PN</b>	<b>P</b> ositive <b>N</b> egative <b>P</b> hotodiodes.

**R**

<b>RZ</b>	<b>R</b> eturn to <b>Z</b> ero.
-----------	---------------------------------

**S**

<b>SCOA</b>	<b>S</b> emi- <b>C</b> onductor <b>O</b> ptical <b>A</b> mplifier.
<b>SDH</b>	<b>S</b> ynchronous <b>D</b> igital <b>H</b> ierarchy.
<b>SMF</b>	<b>S</b> ingle <b>M</b> ode <b>F</b> iber.
<b>SPM</b>	<b>S</b> elf <b>P</b> hase <b>M</b> odulation.
<b>STM</b>	<b>S</b> ynchronous <b>T</b> ransport <b>M</b> odule.

## **T**

**TDM**            **T**ime **D**ivision **M**ultiple.

## **V**

**VCSEL**        **V**ertical **C**avity **S**urface **E**mitting **L**aser.

## **W**

**WDM**           **W**avelength **D**ivision **M**ultiplexing.

# Liste des Figures

## Chapitre I

Figure I.1. Structure d'une fibre optique .....	5
Figure I.2. Réflexion Totale .....	7
Figure I.3. Ouverture Numérique .....	7
Figure I.4. Types de Modes .....	8
Figure I.5. L'atténuation spectrale d'une fibre optique .....	9
Figure I.6. Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à saut d'indice .....	10
Figure I.7. Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à gradient d'indice .....	11
Figure I.8. Propagation des ondes dans une fibre optique monomode .....	11
Figure I.9. Dispersion chromatique des fibres monomodes .....	13
Figure I.10. Schémas de déploiement d'un réseau FTTA .....	14
Figure I.11. Schémas de déploiement d'un réseau FTTB, FTTD, FTTH et FTTO .....	14

## Chapitre II

Figure II.1. Réseau cœur, réseau métro et réseau d'accès .....	17
Figure II.2. Schéma simplifié du réseau d'accès .....	17
Figure II.3. Diagramme schématique du réseau d'accès optique passif (GPON) .....	18
Figure II.4. Topologie P2P .....	19
Figure II.5. Topologie P2MA .....	19
Figure II.6. Topologie P2MP .....	20
Figure II.7. Le multiplexage TDM .....	21
Figure II.8. Le multiplexage WDM en deux sens Down-Stream (DS) et Up-Stream (US) .....	22
Figure II.9. Longueur d'onde CWDM .....	23
Figure II.10. Longueur d'onde DWDM .....	24
Figure II.11. Différents protocoles sont multiplexés .....	25

## Chapitre III

Figure III.1. Synoptique d'un transmetteur .....	27
Figure III.2. Spectre d'émission d'une source optique .....	28
Figure III.3. Types de modulation .....	30
Figure III.4. Courbe d'atténuation de la silice incluant les fenêtres de transmission .....	32
Figure III.5. Courbe d'atténuation de la silice incluant les bandes de transmission WDM .....	32

Figure III.6. Multiplexeur/Démultiplexeur en longueur d'onde .....	33
Figure III.7. Applications de l'amplificateur optique .....	34
Figure III.8. Synoptique d'un récepteur .....	36
Figure III.9. Les étages d'amplification .....	38

## Chapitre IV

Figure IV.1. Diagramme de l'œil d'une transmission par fibre optique .....	40
Figure IV.2. Optiwave : l'interface graphique de l'utilisateur, la bibliothèque des composants, l'éditeur de disposition et les outils de la visualisation.....	41
Figure IV.3. Les sous fenêtres d' <i>Optisystem</i> .....	42
Figure IV.4. Le paramétrage d'un composant .....	42
Figure IV.5. Modification des paramètres globale du layout.....	43
Figure IV.6. Démarrage de la simulation .....	43
Figure IV.7. Affichage des résultats de la simulation.....	43
Figure IV.8. Système de transmission proposé.....	44
Figure IV.9. Diagramme de l'œil en sortie du récepteur .....	45
Figure IV.10. Les configurations de compensation de la dispersion chromatique.....	46
Figure IV.11. La qualité de transmission avant et après la compensation de la dispersion chromatique Vs OSNR (dB) .....	46
Figure IV.12. Diagramme de l'œil en sortie du récepteur pour deux configurations : (a) et (b).....	47
Figure IV.13. Liaison WDM P2P à canaux .....	47
Figure IV.14. BER Vs Débit .....	48
Figure IV.15. Q Vs Débit.....	48
Figure IV.16. Liaison bidirectionnelle WDM-PON P2P à 4 canaux .....	49
Figure IV.17. BER Vs Longueur de fibre : voie montante .....	50
Figure IV.18. BER Vs Longueur de fibre : voie descendante.....	51
Figure IV.19. BER Vs Débit : voies montante .....	52
Figure IV.20. BER Vs Débit : voie descendante .....	52

# Liste des Tableaux

---

---

Tableau III.1.Performances des trois catégories des sources de lumière .....	29
Tableau III.2.Fenêtres de transmission des fibres de silice .....	31
Tableau III.3.Performances des trois catégories d'amplificateurs (cas de l'EDFA en bande C).....	34
Tableau III.4.Caractéristiques comparées des amplificateurs optiques.....	35
Tableau IV.1.Les résultats obtenus .....	45
Tableau IV.2.Les résultats obtenus avant et après la compensation.....	46
Tableau IV.3.Diagramme de l'œil pour les deux voies (US et DS) pour différentes débit .....	53

Les techniques de transmission multi-longueur d'onde connaissent aujourd'hui un développement très important justifié par le besoin d'augmenter la capacité des réseaux de transport des opérateurs de télécommunications.

Le réseau long distance typique fonctionné à un débit de 2,5 Gbit/s ou 10 Gbit/s. Certains essais portant sur la transmission à 40 Gbits/s pour un seul canal, afin de supporter la bande passante additionnelle nécessaire pour gérer le déploiement d'applications gourmandes en largeur de bande, comme la télévision sur IP ou la vidéo à la demande (VoD).

Les techniques de transmission les plus fréquemment utilisées dans les réseaux longue distance sont SONET (réseau optique synchrone) et SDH (hiérarchie numérique synchrone). Une multitude de flux peuvent être transmis simultanément par la même fibre au moyen de la technique WDM. Cependant, comme le risque de dégradation augmente proportionnellement au nombre de canaux WDM présents, il est essentiel de prendre les mesures nécessaires pour conserver la qualité des canaux sûr de longues distances. Les débits élevés et la transmission synchronisée des données requièrent des tests détaillés de l'infrastructure SONET/SDH. Avec ces facteurs, il devient beaucoup plus critique de contrôler des paramètres tels que l'intégrité des données, les délais, l'amplification et l'atténuation à chaque étape du cycle de vie des réseaux. Les techniques SONET/SDH et les couches de transmission optiques doivent être testées simultanément au moment d'évaluer ces problèmes dans les réseaux. D'un point de vue optique, les débits binaires plus élevés nécessitent les tests les plus complexes qui soient, notamment la dispersion chromatique et la dispersion des modes de polarisation.

La principale problématique à résoudre dans notre travail axée sur les points suivants :

- Résoudre le problème de la dispersion chromatique par des différentes configurations (une liaison simple).
- Appliquer une configuration adoptée sur une liaison WDM-P2P à 4 canaux.
- déployer un autre système WDM-PON P2P à 4 canaux en évaluant les performances d'une liaison WDM bidirectionnelle.

Note : nous avons utilisé des débits de transmission standard (SDH).

L'objectif de ce travail est l'étude et l'évaluation des performances d'une liaison WDM nécessaire pour les télécommunications optiques à très hauts débits en utilisant le logiciel OPTISYSTEM. Toute cette étude est organisée dans un document comportant quatre chapitres :

Le premier chapitre exposera une description générale sur la fibre optique et leurs types.

En deuxième chapitre, nous allons présenter les différents types de réseaux d'accès optique suivis par une étude sur la technique de multiplexage WDM.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différentes composantes optoélectroniques constituant une liaison optique WDM en expliquant les trois critères de qualité d'une liaison WDM à savoir le facteur de qualité Q, le BER et l'OSNR.

Les résultats et les interprétations font l'objet du quatrième chapitre. Dans ce cadre, ce chapitre décrit les résultats de la simulation et la conception d'un système WDM destiné aux réseaux d'accès optiques à très hauts débits à l'aide de logiciel OPTISYSTEM. Pour cela, nous discutons l'évaluation des performances de ce système qui sont jugées par les critères qui sont cités dans le troisième chapitre.

Enfin, la conclusion générale permettra de tirer le bilan des travaux effectués avec une synthèse des résultats des choix effectués pour la conception d'un système WDM à très hauts débits avec des perspectives pour des travaux futurs.

## I.1 Introduction

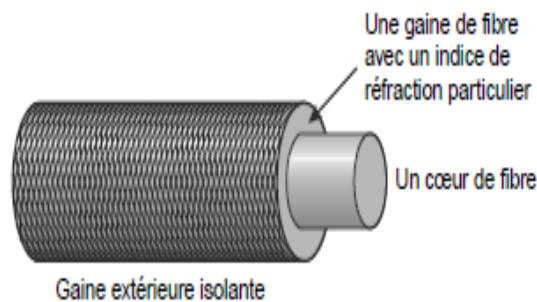
La transmission optique est devenue une technique courante et éprouvée dans le domaine des télécommunications. La fibre optique, après avoir supplanté le câble coaxial, est devenue un des moyens le plus fiable et le plus économique lorsqu'il s'agit de transporter des débits élevés sur des grandes distances. Dans ce chapitre, nous allons présenter un support de transmission (Fibre Optique) et leurs limites. En outre, nous allons évoquer les différents types de fibre optique.

## I.2 Supports de Transmission

Les supports de transmission sont nombreux. Parmi ceux-ci, on distingue : les supports métalliques, non métalliques et immatériels. Les supports métalliques, comme les paires torsadées et les câbles coaxiaux, sont les plus anciens et les plus largement utilisés ; ils transportent des courants électriques. Les supports de verre ou de plastique, comme les fibres optiques, transmettent la lumière, tandis que les supports immatériels des communications sans fil propagent des ondes électromagnétiques et sont en plein essor.

## I.3 La fibre optique

Une fibre optique est constituée d'un fil de verre très fin. Elle comprend un cœur, dans lequel se propage la lumière émise par une diode électroluminescente ou une source laser et une gaine optique dont l'indice de réfraction garantit que le signal lumineux reste dans la fibre (Figure I.1).



**Figure I.1.** Structure d'une fibre optique

Les premières fibres optiques employées dans les télécommunications, apparues sur le marché à partir des années 1970, étaient multimodes (à saut d'indice ou à gradient d'indice, selon que l'indice de réfraction de la lumière varie de manière brutale ou progressive entre le cœur et la gaine de la fibre). Ces fibres étaient réservées (et le sont encore) aux débits inférieurs au gigabit par seconde, sur des distances de l'ordre du kilomètre. Plusieurs longueurs d'onde bien choisies se propagent simultanément en de multiples trajets dans le cœur de la fibre. Pour des débits plus élevés et des distances plus longues, la fibre monomode, de fabrication plus récente, plus fine,

assure la propagation d'une seule longueur d'onde dans son cœur (quelques micromètres de diamètre) et offre donc de meilleures performances.

Les avantages de la fibre optique sont nombreux : diamètre extérieur de l'ordre de 0,1 mm, poids de quelques grammes au kilomètre. Cette réduction de taille et de poids la rend facile à utiliser. En outre, sa très grande capacité permet la transmission simultanée de nombreux canaux de télévision, de téléphone... Les points de régénération des signaux sont plus éloignés (jusqu'à 200 km), du fait de l'atténuation moindre de la lumière. Enfin, l'insensibilité des fibres aux parasites électromagnétiques est un avantage très apprécié, puisqu'une fibre supporte sans difficulté la proximité d'émetteurs radioélectriques. On peut l'utiliser dans des environnements perturbés (avec de puissants champs électromagnétiques, par exemple). Par ailleurs, elle résiste bien aux écarts de température. La fibre optique constitue la plupart des artères des réseaux de télécommunications et des réseaux locaux à très haut débit [1].

### **I.3.1 Caractéristiques de la fibre optique**

- ✓ Débit : quelque Gbit/s par km ;
- ✓ Encombrement d'une fibre :  $<100 \mu\text{m}$ ,  $<5 \text{ g/km}$  ;
- ✓ Les fibres sont rassemblées au sein d'un câble ;
- ✓ Trois types de fibres (bande passante):
  - Multimode à saut d'indice ;
  - Multimode à gradient d'indice ;
  - Monomode.
- ✓ Dispersion : défaut d'alignement + émission non monochromatique [2].

### **I.3.2 Pourquoi nous utilisons la Fibre Optique**

#### ***Avantage :***

- ✓ Intégrité de la transmission électrique ;
- ✓ Faible point, faible encombrement ;
- ✓ Enormes Possibilités de transmission ;
- ✓ Fiabilité et longévité des installations ;
- ✓ Abondance de la matière première la silice ;
- ✓ Insensibilité aux perturbations électromagnétiques.

#### ***Inconvénients :***

- ✓ Sensibilité à l'eau ;
- ✓ Manques d'information sur cette technologie ;
- ✓ Les idées reçus en termes du prix, la connectique et la pose.

## I.4 Notions sur la fibre

### I.4.1 Réflexion Totale

La propagation de la lumière s'effectue dans le cœur de la fibre par le phénomène de réflexion totale illustré par des lois de Descartes (Figure I.2).

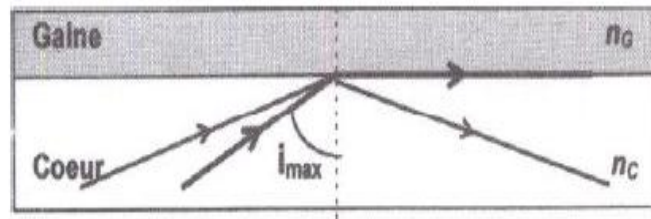


Figure I.2. Réflexion Totale

Un rayon est réfléchi à la frontière entre deux milieux d'indice de réfraction différents lorsque son angle d'incidence  $i$  est supérieur à la valeur  $i_{max}$  telle que :  $\sin(i_{max}) = \frac{n_G}{n_c}$ .

Les dimensions des fibres s'expriment en micromètre  $n_c > n_G$ .

A partir de cette loi optique, on peut d'ores et déjà définir une première caractéristique fondamentale de la fibre : l'Ouverture Numérique.

### I.4.2 Ouverture Numérique (ON)

Ce chiffre, compris entre 0 et 1, représente la capacité de la fibre à collecter la lumière qu'elle pourra propager (angle d'acceptance).

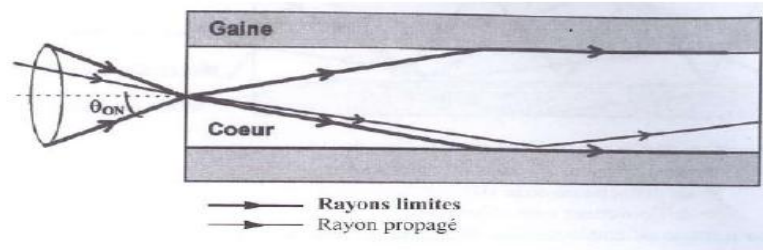


Figure I.3. Ouverture Numérique

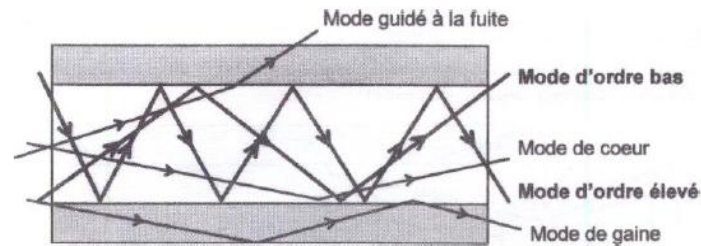
$$ON = \sin \theta_{ON} = \sqrt{(n_c^2 - n_G^2)} \quad (I.1)$$

$\theta_{ON}$  permet de définir un cône d'acceptance pour lequel tout rayon entrant est guidé dans la fibre grâce à la réflexion totale.

Si  $ON$  est faible, la bande passante sera améliorée, mais l'injection de la lumière sera plus délicate (Figure I.3).

### I.4.3 Les Modes de Propagation

Nous pouvons représenter ces différents modes (Figure I.4) comme étant les possibilités de chemins des rayons lumineux dans le cœur :



**Figure I.4.** Types de Modes

Le nombre de modes possible dans une fibre dépend :

- ✓ La longueur d'onde de la source ;
- ✓ Diamètre de cœur ;
- ✓ L'ouverture Numérique.

### I.4.4 La Bande Passante

Elle symbolise le débit de transmission dans une fibre. Elle s'exprime en MHz\*km. Plus la fibre courte, plus sa bande passante est élevée.

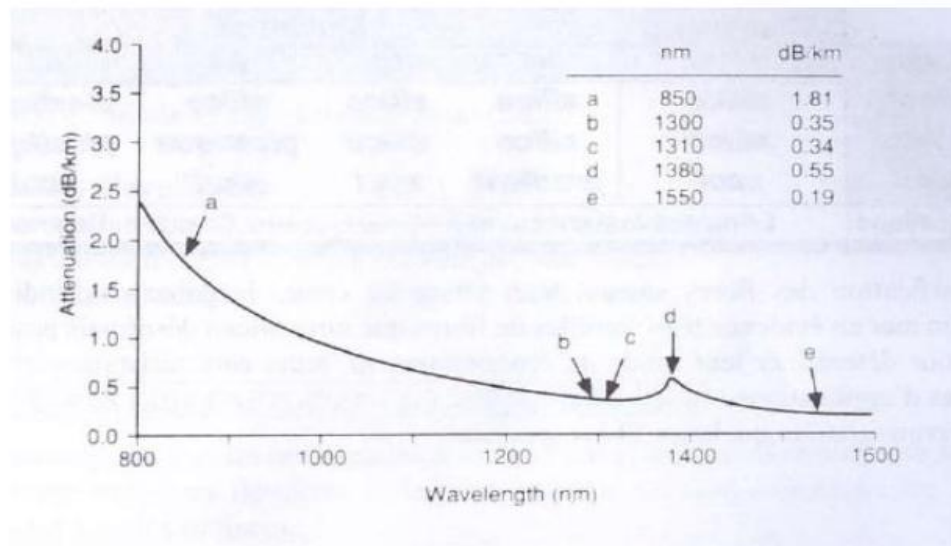
Deux phénomènes limitent la bande passante :

- En multimode, il s'agit de la dispersion modale : les différents modes ne se propagent pas à la même vitesse, le signal de sortie est déformé.
- En monomode, la dispersion modale n'a pas lieu d'être puisqu'un seul mode se propage. Mais la limitation est due à la dispersion chromatique (mesuré en ps/nm/km) : une source n'est jamais monochromatique, elle diffuse un spectre de longueurs d'onde plus ou moins large. Or comme chaque longueur d'onde a sa vitesse propre dans un milieu donné, le signal de sortie s'étale dans le temps (la bande passante peut être de l'ordre de 25 THz (sur des fibres optimisées) là où la fibre a une atténuation très faible).

### I.4.5 L'Atténuation

L'atténuation (Figure I.5) correspond à la perte de puissance du signal lumineux le long de la fibre optique. Cette perte est due à des impuretés résiduelles et à des phénomènes de dispersion. L'atténuation est mesurée en (dB/Km). Contrairement à la mesure en dB (affaiblissement relatif), la mesure en dBm (décibel par milliwatt) est une mesure absolue [3].

Soit 0 dBm = 1mW, -10 dBm = 0.1 mW.



**Figure I.5.** L'atténuation spectrale d'une fibre optique [3]

Cette courbe met en évidence les 2 fenêtres des 3 longueurs d'ondes les plus utilisées, centrées autour de 850, 1310 et 1550 nm. Il est intéressant de noter qu'une onde lumineuse est une onde électromagnétique avec une fréquence propre. Ainsi, il est possible d'obtenir une conversion fréquence / longueur d'onde par la formule suivant :  $c = \lambda * f$ , la vitesse de la lumière dans le vide.

Les fibres optiques peuvent être utilisées pour la transmission essentiellement dans deux fenêtres en longueur d'onde, qui correspond à la fenêtre du minimum d'atténuation :

- ✓ La fenêtre à 1300 nm qui a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,4 dB/km.
- ✓ La fenêtre à 1550 nm qui a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,2 dB/km.

Les composants optoélectroniques lasers et récepteurs sont peu coûteux à cette gamme des longueurs d'onde 1300 nm et qui présente une atténuation importante. Cette fenêtre est utilisée pour les systèmes de télécommunications de courte portée quelques dizaines de kilomètres ou de faible capacité : boucles locales à fibres optiques, réseaux urbains, LANs [4].

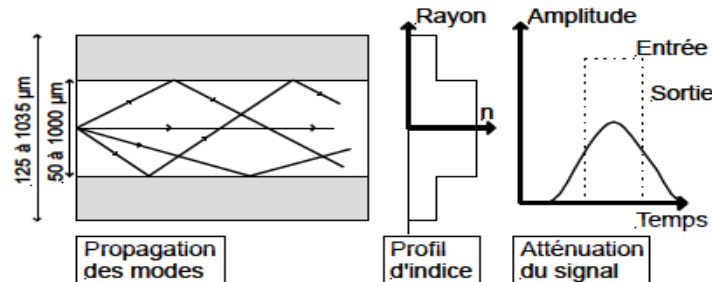
## I.5 Les Différentes Fibres Optiques (FO)

La fibre optique, fabriquée en silice, se caractérise par un cœur, une gaine et un revêtement plastique en 250 $\mu$ m. Il existe deux types de fibres optiques : les fibres multimodes dites multimodales et les fibres monomodes dites unimodales.

### I.5.1 FO Multimode

La fibre optique caractérisée par un cœur dans lequel plusieurs modes peuvent se propager. Le type principale est la fibre à gradient d'indice (ex. fibre 50/125 $\mu$ m et 62.5/125 $\mu$ m). La fibre multimode est aussi nommée fibre MM.

Les fibres multimodes à saut d'indice (Figure I.6), ce sont les plus nombreuses grâce à leurs multiples combinaisons cœur-gaine, leur champ d'application est vaste. Le principe de fonctionnement suit exactement la loi de la réflexion totale. Le schéma suivant illustre le retard des modes d'ordre élevé par rapport aux modes d'ordre bas, à l'origine de la dispersion modale.



**Figure I.6.** Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à saut d'indice

Les caractéristiques de fibres multimodes à saut d'indice dépendantes de :

- ✓ Bande passante : de 9 à 25 MHz.km
- ✓ Atténuation : de 6 à 150 dB/km
- ✓ ON : de 0.37 à 0.5
- ✓ Source : Diode Electro-Luminescente (DEL)

Ce type de fibre est appliqué dans les domaines suivants :

- ✓ Télécommunications pour réseaux locaux et industriels
- ✓ Transmission courte distance (avionique, automobile)
- ✓ Transport de lumière visible (imagerie, décoration)

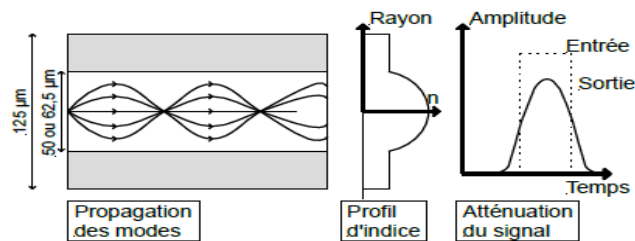
Les fibres multimodes à gradient d'indice (Figure I.7), sont moins nombreuses que les multimodes à saut d'indice, leurs performances se situent à mi-chemin entre ces dernières et les monomodes. Ce sont cependant les fibres multimodes les plus utilisées. Le gradient d'indice permet aux modes d'ordre élevé de se déplacer plus rapidement, donc d'atténuer l'effet de la dispersion modale.

Les caractéristiques de fibres multimodes à gradient d'indice dépendantes de :

- ✓ Bande passante : de 200 à 1500 MHz.km ;
- ✓ Atténuation : de 1.5 à 4.5 dB/km ;
- ✓ ON : de 0.2 à 0.29 ;
- ✓ Source : DEL ou LSAER faible et moyenne puissance ;

Ce type de fibre est appliqué dans les domaines suivants :

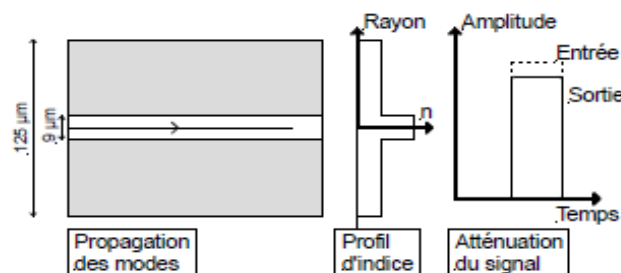
- ✓ Transmission moyenne distance (informatique, industrie) ;
- ✓ Vidéocommunications.



**Figure I.7.** Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à gradient d'indice

### I.5.2 FO Monomode

Fibre optique dont le diamètre du cœur est faible par rapport à la longueur d'onde guidée (Figure I.8). Le cœur a un diamètre d'environ  $9\ \mu\text{m}$ . Elle est fabriquée à base de silice. Elle est aussi nommée fibre SM. Leurs performances exceptionnelles les dédient tout naturellement aux communications très longues distances. Quant à le principe de fonctionnement, un seul mode se propage, plus de problème de dispersion modale, mais l'injection de lumière est plus délicate.



**Figure I.8.** Propagation des ondes dans une fibre optique monomode

Les caractéristiques de fibres monomodes dépendantes de :

- ✓ Bande passante : de 10 GHz.km et même plus
- ✓ Atténuation : de 0.2 à 0.4 dB/km
- ✓ ON : de 0.1 à 0.12
- ✓ Diamètre de champ de mode : selon spécifications
- ✓ Longueur d'onde de coupure: selon spécifications

Ce type de fibre est appliqué dans les domaines suivants :

- ✓ Télécommunications très grandes distances (câbles sous-marins)
- ✓ Télécommunications et vidéocommunications très hauts débits (base des systèmes de communication terrestre) [3,5].

### I.6 Les normes spéciales de la fibre optique

- ✓ **G652** Normalisation des fibres optiques monomodes standards (à dispersion non décalée).
- ✓ **G652a** Version de base de la fibre G652, définie à 1310 nm et à 1550 nm.

- ✓ **G652b** Version de la fibre G652, définie à 1625nm avec des affaiblissements améliorés à 1310nm et à 1550nm par rapport à la version a, et avec une meilleure PMD.
- ✓ **G652c** Version de la fibre G652, définie à 1383nm (faible pic OH) avec un affaiblissement amélioré à 1550nm par rapport à la version b.
- ✓ **G652d** Version de la fibre G652 la plus performante (meilleures caractéristiques des versions b et c).
- ✓ **G653** Normalisation des fibres optiques monomodes à dispersion décalée (peu utilisée aujourd'hui).
- ✓ **G655** Normalisation des fibres optiques monomodes à dispersion décalée non nulle (NZDF : Non Zero Dispersion Fiber). Utilisation à 1550nm pour les infrastructures longues distances en DWDM.
- ✓ **G657** Fibre à faible rayon de courbure.
- ✓ **G657a** Fibre G657 compatible avec la fibre optique G652d.
- ✓ **G657b** Fibre G657 non compatible avec la fibre optique, G652 mais avec des meilleures caractéristiques d'insensibilité aux courbes que la version a.
- ✓ **G657a2** Fibre G657 compatible à la fibre G652d et offrant une meilleure caractéristique d'insensibilité aux courbes que la version a1.
- ✓ **OM1** Caractéristique d'une fibre optique multimode avec une bande passante minimum de 200MHz.km à 850nm. Peut transmettre 100 Mbits sur 2 km et 1 Gbits sur 275 m à 850 nm.
- ✓ **OM2** Caractéristique d'une fibre optique multimode avec une bande passante minimum de 500 MHz/km à 850 nm. Peut transmettre 100 Mbits sur 5 km, 1 Gbits sur 550 m et 10 Gbits sur 82 m à 850 m.
- ✓ **OM3** Caractéristique d'une fibre optique multimode avec une bande de passante minimum de 1500MHz/km. Peut transmettre 10 Gbits sur 330 m à 850 nm.
- ✓ **OM4** Caractéristique d'une fibre optique multimode. Peut transmettre 10 Gbits sur 550 m à 850 nm [5].

## I.7 Quelques types de fibres monomodes

L'Union Internationale des Télécommunications (UIT-T) a normalisé plusieurs types de fibres monomodes pour les télécommunications (voir Figure I.9) [6].

### I.7.1 Fibre standard

Sous le standard G 652 de l'UIT, la fibre standard est la plus ancienne, de diamètre de cœur de 9  $\mu\text{m}$  ; sa dispersion s'annule vers 1,3  $\mu\text{m}$ , qui est sa longueur d'onde d'utilisation optimale, notamment dans les réseaux locaux et métropolitains à très haut débit. Mais on peut aussi l'utiliser à 1,55  $\mu\text{m}$  avec des diodes laser monochromatiques ( $\Delta\lambda \approx 0,1 \text{ nm}$ ) ; en l'absence d'amplificateurs optiques, la distance est limitée par l'atténuation et cette solution est satisfaisante, au moins jusqu'à des débits de 2,5 Gbit/s [6].

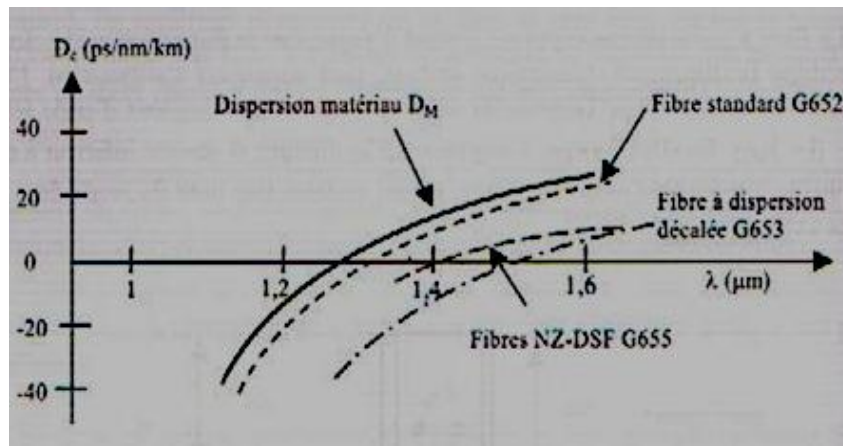


Figure I.9. Dispersion chromatique des fibres monomodes [6]

### I.7.2 Fibre à dispersion décalée

La fibre à dispersion décalée ou DSF (Dispersion Shifted Fiber) de standard G 653, a un diamètre de cœur de  $7 \mu\text{m}$  et un profil d'indice souvent plus complexe, en triangle ou trapèze. Sa dispersion s'annule vers  $1,55 \mu\text{m}$  ; mais son atténuation est un peu plus élevée. Elle a été utilisée surtout pour les liaisons à très longue distance à amplificateurs optiques, dont le paramètre critique est la dispersion et pas l'atténuation ; mais elle est peu compatible avec le WDM, car la dispersion ne peut pas être annulée à toutes les longueurs d'onde, et la dispersion nulle, favorise l'accumulation des effets non linéaires. Elle recule au profit de la fibre G 655.

### I.7.3 Fibre à dispersion décalée non nulle

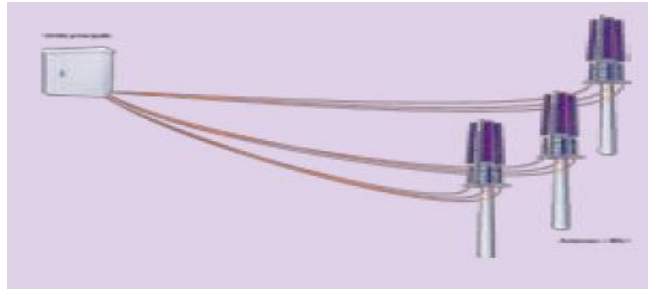
La NZ-DSF (Non Zero-Dispersion Shifted Fiber) de standard G 655, plus récente (1995) a sa dispersion chromatique réduite à une valeur faible, mais non nulle (de 3 à 6 ps/km/nm dans la 3<sup>ème</sup> fenêtre) ; c'est en fait une famille de fibres avec des paramètres (et des noms commerciaux) variant d'un fabricant à un autre. Grâce à un diamètre de cœur plus grand, elle a de pertes plus faibles que la précédente, et est de plus, moins sensible aux effets non linéaires. Elle est donc bien adaptée au multiplexage en longueur d'onde. La pente (*slope*) de sa dispersion ( $dD_c/d\lambda$ ) est plus faible que pour les fibres précédentes (de 0,05 à 0,1 ps/km/nm).

En 2004 la fibre G 656 a été normalisée, qui en est une variante présentant une dispersion plus élevée sur une bande plus large (2 à 14 ps/km/nm de 1500 à 1610 nm) adaptée au multiplexage peu dense en longueur d'onde [6].

## I.8 Déploiement FTTx

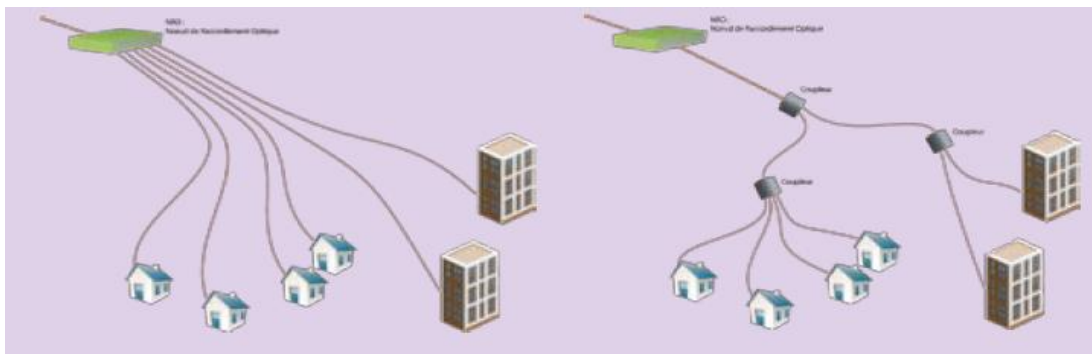
Les déploiements de solution FTTx s'appuient sur des technologies passives ou actives, point-à-multipoint, ou point-à-point. La terminologie FTTx regroupe plusieurs concepts distincts :

- ✓ **FTTA (Fiber To The Antenna)**: utilisation dans les réseaux mobiles.



**Figure I.10.** Schémas de déploiement d'un réseau FTTH

- ✓ **FTTB (Fiber To The Building):** fibre jusqu'au bas d'immeuble.
- ✓ **FTTD (Fiber To The Desk):** réseau d'entreprise en fibre optique jusqu'à la prise du poste de travail.
- ✓ **FTTH (Fiber To The Home):** fibre jusqu'à l'abonné, 2 architectures FTTH : PON (entre le NRO (noeud de raccordement optique (désigne en général une boucle locale ou un quartier)) et l'abonné, utilisation d'un coupleur permettant de regrouper plusieurs utilisateurs sur une même fibre) ou P2P (1 fibre par abonné entre le NRO et l'abonné).
- ✓ **FTTO (Fiber To The Office):** La fibre optique est présentée jusqu'au local de l'entreprise [5].



**Figure I.11.** Schémas de déploiement d'un réseau FTTB, FTTD, FTTH et FTTO [5]

## I.9 Conclusion

A la lecture de ce chapitre, nous pouvons dire que la fibre optique utilisée en tant que support de propagation pour la lumière est devenue un élément clé pour les systèmes de télécommunications optiques. Dans cette première partie, nous avons exposé également les différents types de fibres optiques avec leur déploiement FTTx. Le chapitre suivant sera consacré à la technologie WDM.

## II.1 Introduction

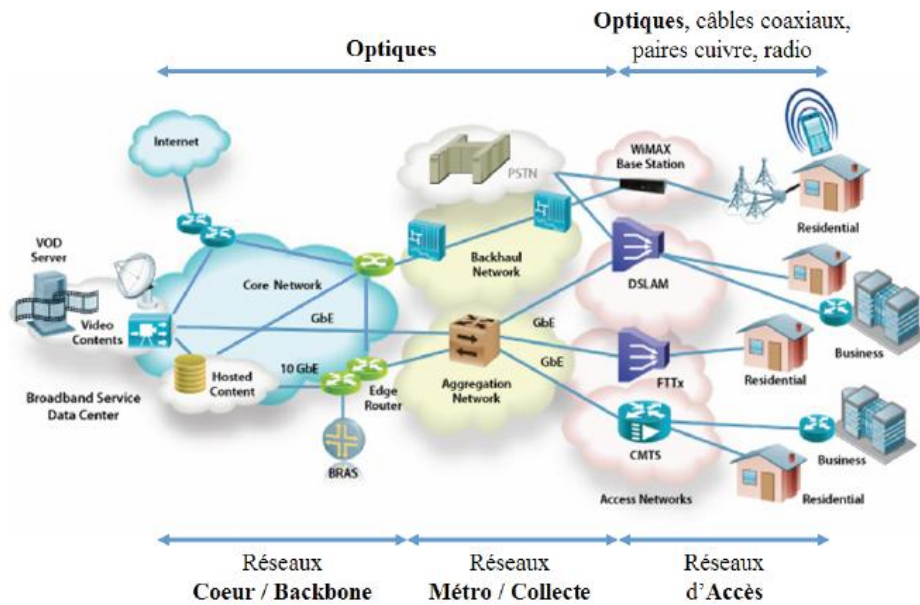
Aujourd'hui les technologies de l'information et de la communication ont connu une évolution rapide et à cause de ce développement, la transmission d'une donnée ou d'une vidéo faillit un débit important. Donc pour augmenter le débit de transmission nous utilisons des techniques de multiplexage. Auparavant il existe plusieurs techniques TDM et FDM qui sont allés jusqu'à 10Gbits/s, mais insuffisants. Pour cela, il existe une notre technique qui augmente le débit de transmission de N fois le débit de 10 Gbits/s appelé le multiplexage en longueur d'onde (WDM). Dans ce chapitre, nous allons présenter un état de l'art du réseau d'accès optique et nous intéresserons par la suite à la technique de multiplexage en longueur d'onde WDM, en présentant son principe, ses avantages et ses limites.

## II.2 Réseau d'accès optique

Afin de s'assurer la communication inter-personnelle, chaque utilisateur doit se connecter au réseau de télécommunication. L'utilisateur peut être un abonné des services mobiles, un abonné des services haut-débit résidentiels ou professionnels,... Le réseau d'accès est le réseau qui relie ces utilisateurs finaux au réseau de transport de l'opérateur de télécommunications via le point d'accès que nous appelons le "central" pour le réseau d'accès de type filaire.

Le support de transmission du réseau d'accès peut être l'espace libre dans le cas du réseau d'accès radio, la paire de cuivre, la fibre optique ou le câble coaxial pour le réseau d'accès filaire. En ignorant le réseau local domestique (à la maison ou dans l'entreprise) qui a une portée relativement courte, le réseau d'accès peut-être considéré comme le dernier tronçon en aval (côté d'utilisateur) dans la hiérarchie des réseaux de télécommunications [7].

Dans le cadre du déploiement de la fibre pour le transport des données, de la voix et de la vidéo, on distingue trois catégories du réseau comme l'illustre la Figure II.1. Le réseau métropolitain désigne un réseau à l'échelle d'une ville. Le réseau cœur, quant à lui, est constitué d'un certain nombre de commutateurs et de liaisons entre ces commutateurs. Les terminaux des utilisateurs sont reliés au réseau cœur par des réseaux d'accès. Le réseau d'accès est donc défini comme étant le dernier segment de l'opérateur d'accès avant d'atteindre l'abonné. Les bénéfices potentiels de la technologie fibre pour le réseau d'accès optique sont nombreux. A titre d'exemple, en utilisant la paire de cuivre, un débit maximum de 200 Mbit/s peut être théoriquement atteint pour une portée de 200 m, 100 Mbit/s jusqu'à 450 m, alors que pour la fibre, sur une distance de 60 km, un débit de 10 Gbit/s peut être transmis simplement, sans difficultés. Un autre inconvénient de la paire de cuivre est que cette technologie ne permet pas un trafic symétrique [8].

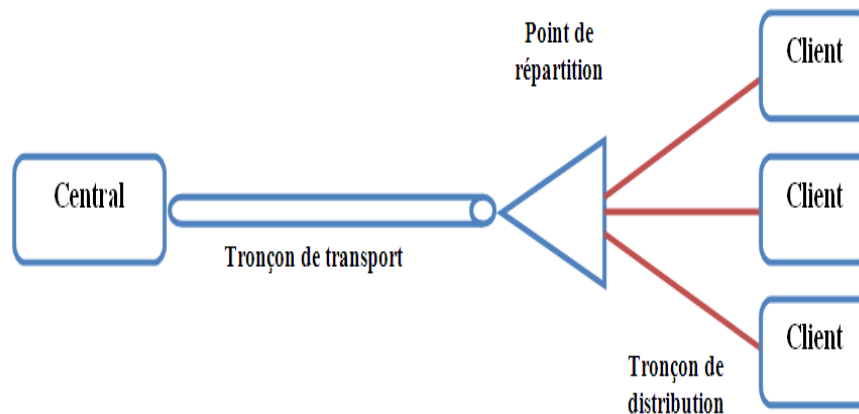


**Figure II.1.** Réseau cœur, réseau métré et réseau d'accès

**II.2.1 La terminologie du réseau d'accès**

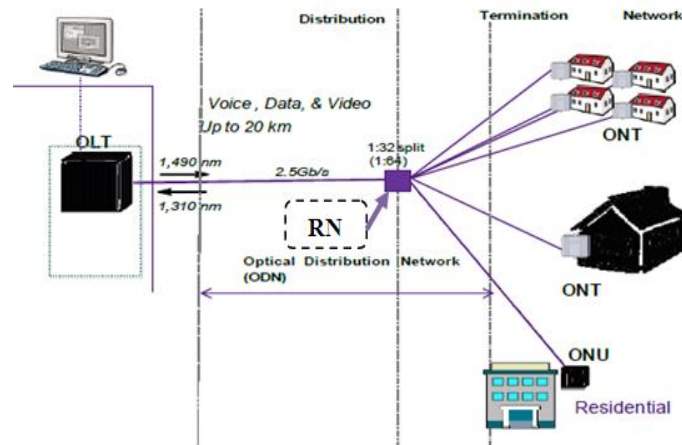
On distingue trois parties dans l'architecture du réseau d'accès comme l'illustre la Figure II.2:

- ✓ Le central,
- ✓ Le point de répartition,
- ✓ Le client.



**Figure II.2.** Schéma simplifié du réseau d'accès

La Figure II.3 représente différents scénarios d'introduction de la fibre optique dans le réseau d'accès optique. Dans cette figure, nous trouvons les terminologies usuellement utilisées pour le réseau d'accès optique que nous allons détailler par la suite :



**Figure II.3.** Diagramme schématisique du réseau d'accès optique passif (GPON)

**OLT (Optical Line Terminal)** : L'équipement réseau situé au central qui gère les flux de trafic vers les abonnés ou provenant des abonnés. Il assure l'interfaçage avec les équipements du réseau de collecte. L'OLT est le point d'extrémité en amont du réseau d'accès.

**RN (Remote Node)** : Point de répartition qui répartit le signal optique provenant de l'OLT vers plusieurs abonnés et combine les signaux optiques provenant des abonnés à destination de l'OLT.

**ONT (Optical Network Termination)** : Le module optique chez les abonnés qui assure les fonctions d'émission/réception des signaux optiques vers l'OLT ou provenant de l'OLT et la conversion entre les interfaces optiques avec le réseau et les interfaces d'utilisateur. C'est le point d'extrémité en aval du réseau d'accès.

**ONU (Optical Network Unit)** : L'équipement comme l'ONT mais situé dans le réseau dans le cas où la fibre ne pénètre pas jusqu'à chez les abonnés. La transmission entre les ONU et les abonnés est réalisée sur les paires de cuivre comme la technologie xDSL.

**NT (Network Termination)** : Le module chez les abonnés dans le cas où la fibre ne pénètre que jusqu'à l'ONU.

La partie entre l'OLT et l'ONU est appelée ODN (pour Optical Distribution Network) ou réseau de distribution. Il s'agit de l'infrastructure passive du réseau. En effet les composants actifs sont situés aux deux extrémités, à l'ONU et à l'OLT [7,8].

## II.2.2 Différentes topologies d'architecture du réseau d'accès optique

Les architectures couramment utilisées pour le déploiement d'un réseau d'accès optique sont:

- ✓ Point à Point (P2P),
- ✓ Point à Multipoint Active,
- ✓ Point à Multipoint Passive.

Le choix de l'architecture active ou passive pour le déploiement dépend : du type de services devant être fournis, du coût de l'infrastructure, de l'infrastructure actuelle et des plans futurs de migration vers les nouvelles technologies.

### II.2.2.1 Point à Point (P2P)

Cette architecture est schématisée dans la Figure II.4. La topologie P2P contient un élément actif, un commutateur entre le Central Optique (OLT) et l'équipement du client (ONU). Dans cette configuration, chaque abonné possède sa propre fibre optique le reliant directement aux équipements de l'opérateur. En termes de performances (débit, portée), l'architecture point à point est considérée comme la meilleure solution. Mais le coût très élevé est un problème majeur pour cette architecture. Donc, elle pourrait être utilisée comme une solution pour délivrer un débit de l'ordre des Gigabits (ou beaucoup plus) par abonnée quand le coût des équipements est optimisé.

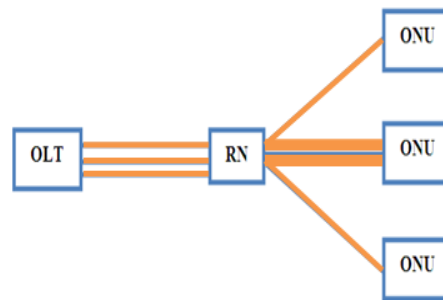


Figure II.4. Topologie P2P

### II.2.2.2 Point à Multipoint Active (P2MA)

Cette architecture est schématisée dans la Figure II.5. Dans cette topologie, la fibre optique entre le point de répartition RN et l'OLT est mutualisée entre plusieurs abonnés. Comme nous pouvons voir, l'agrégation des trafics provenant de plusieurs abonnés est réalisée à l'aide d'un équipement Ethernet actif situé au RN. C'est pour cette raison que nous appelons l'architecture P2MA.

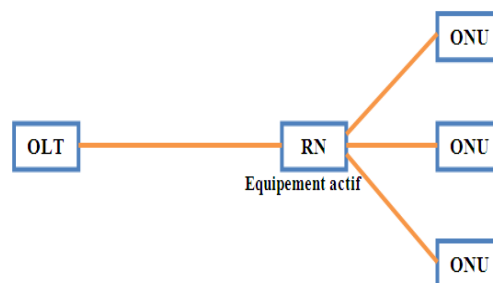
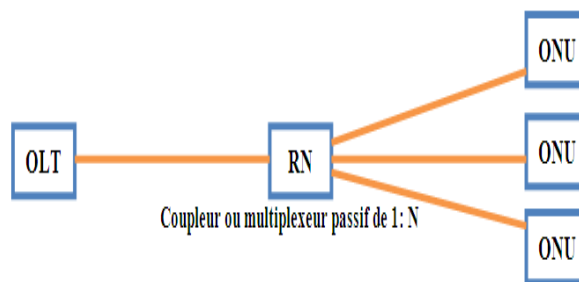


Figure II.5. Topologie P2MA

### II.2.2.3 Point à Multipoint Passive (P2MP ou PON)

Cette architecture est schématisée dans la Figure II.6. L'acronyme PON (Passive Optical Network) se traduit par « réseau d'accès optique passif ». L'appellation "*Passive*" vient du fait que l'on n'utilise que des équipements passifs dans l'infrastructure. La fibre optique entre l'OLT et le

point de répartition RN est mutualisée entre plusieurs abonnés. Le partage de la ressource matérielle est effectué grâce à des techniques de multiplexage en temps, en longueur d'onde, ou en code,... Le point de répartition RN est simplement un équipement optique passif, qui est un coupleur ou un multiplexeur optique de 1 vers N suivant la technique de multiplexage utilisée. La bande passante du système n'est pas allouée à un seul abonné mais chaque utilisateur partage la capacité totale du système. PON représente la solution point à multi-points optique dans laquelle la ressource est partagée c'est-à-dire la fibre, est utilisée par tous les abonnés connectés au Central Optique (CO). Le PON supporte théoriquement les réseaux : IP, ATM, PDH et SDH...



**Figure II.6.** Topologie P2MP

Cette architecture possède plusieurs avantages. La mutualisation des ressources matérielles entre plusieurs abonnés (fibre optique, émetteur-récepteur optique à l'OLT) réduit le coût global des équipements. Comparée à une architecture P2MA, cette architecture P2MP est moins coûteuse du point de vue matériel. Du point de vue opérationnelle, elle évite toutes les complexités liées au fonctionnement d'un équipement actif dans le réseau comme cela a été mentionné ci-dessus, donc elle diminue le coût d'opération. L'inconvénient de l'architecture PON est principalement lié à la complexité des techniques de multiplexage en temps, longueurs d'onde, ... Aussi, l'utilisation du composant optique passif, qui atténue le signal au point de répartition RN, augmente la perte globale du système optique, donc limite la portée du réseau [7,8].

### II.3 Multiplexage sur fibre optique

Le multiplexage consiste à faire transiter sur une seule et même ligne de liaison (ici la fibre optique), dite voie haute vitesse, des communications appartenant à plusieurs paires d'équipements, émetteurs et récepteurs [9]. Nous entamons notre étude des technologies pour les nouvelles architectures de réseau d'accès optique par des techniques de multiplexage les plus répandues, à savoir le multiplexage temporel et/ou le multiplexage en longueurs d'onde avec leurs points forts et leurs limites.

### II.3.1 Le Multiplexage TDM

Le multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplexing) est une technique de multiplexage permettant à un émetteur de transmettre plusieurs canaux numériques élémentaires à bas débit (voix, données, vidéo) sur un même support de communication à plus haut débit en entrelaçant dans le temps des échantillons de chacun de ces canaux. L'allocation complète de la ligne aux différentes voies est effectuée périodiquement et pendant des intervalles de temps constants (voir Figure II.7) [10,11].

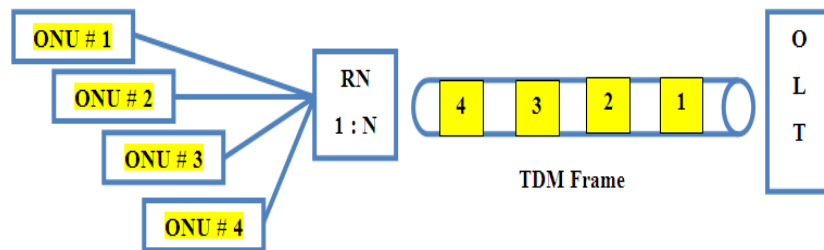


Figure II.7. Le multiplexage TDM

### II.3.2 Le Multiplexage WDM

Contrairement au multiplexage TDM, le multiplexage en longueur d'onde du réseau optique passif ou WDM (Wavelength Division Multiplexing) sert à partager la ressource matérielle (la fibre du tronçon de transport notamment) entre plusieurs abonnés. C'est-à-dire que chaque abonné se voit attribuer une longueur d'onde spécifique par ce type de multiplexage (WDM). Nous nous intéressons dans les paragraphes qui suivent à cette architecture WDM. Nous commençons par une présentation générale sur cette technique. En plus, nous citons les différents types de multiplexage en longueur d'onde avec leurs avantages et leurs inconvénients et nous finissons par les apports et les limites de cette technologie.

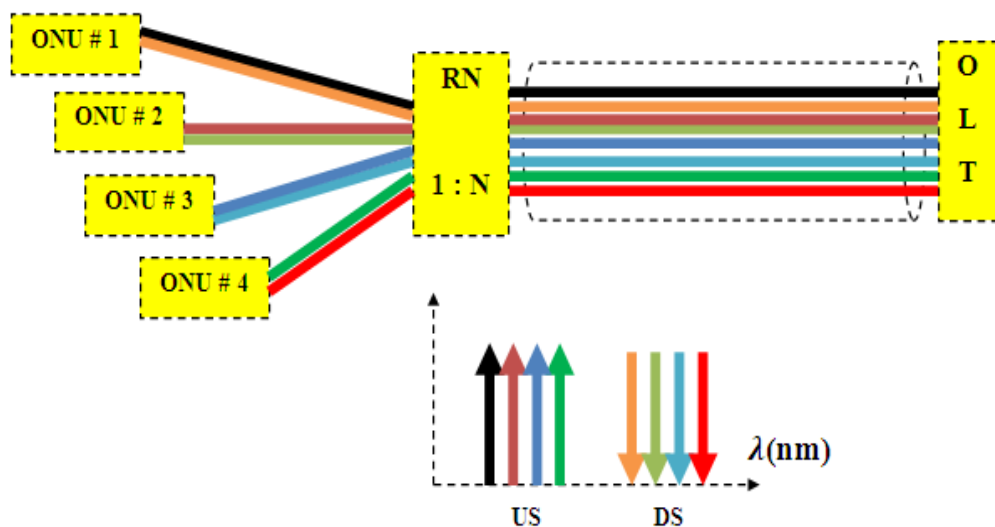
#### II.3.2.1 Le principe

La technologie WDM est une approche qui permet de gérer l'importante discordance optoélectronique en termes de bande passante, ceci en multiplexant sur la même fibre optique plusieurs canaux WDM connectant différents sites. La bande passante d'une fibre est découpée en un certain nombre d'intervalles de fréquences (longueurs d'onde) distincts, de telle sorte que chaque intervalle supporte un canal de communication transmettant au débit désiré en particulier celui de l'électronique [12].

Actuellement, la transmission optique se développe aussi de plus en plus dans les liaisons professionnelles à moyenne et courte distance ainsi que les réseaux locaux et semble pouvoir jouer un rôle dans les réseaux téléphoniques d'abonnés.

Les débits d'informations à transmettre devenant de plus en plus élevés et bien que la fibre monomode ait déjà une bande passante considérable, le multiplexage en longueur d'onde, consiste à superposer sur la même fibre des signaux optiques à différentes longueurs d'onde, s'impose pour l'augmentation de la capacité de transmission au meilleur coût. Mais il présente aussi beaucoup d'autres avantages, pour l'adressage et la commutation par exemple. Enfin, ses applications débordent largement du cadre des télécommunications optiques.

Disposant de sources  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_j \dots \lambda_n$  émettant à des longueurs d'onde différentes, on a la possibilité de les coupler à une même fibre optique (voir Figure II.8). A l'autre extrémité de la fibre, les signaux  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_j \dots \lambda_n$  seront séparés spatialement vers des détecteurs différents. Le composant d'entrée devra introduire dans la fibre avec le minimum de pertes possible les signaux issus de sources différentes : c'est un multiplexeur. Le composant effectuant l'opération symétrique est un démultiplexeur. Il faut noter qu'il existe des sources émettant simultanément plusieurs d'onde [7,8 et 13].



**Figure II.8.** Le multiplexage WDM en deux sens Down-Stream (DS) et Up-Stream (US)

### II.3.2.2 Les types des systèmes WDM

On distingue plusieurs types de multiplexage en longueur d'onde :

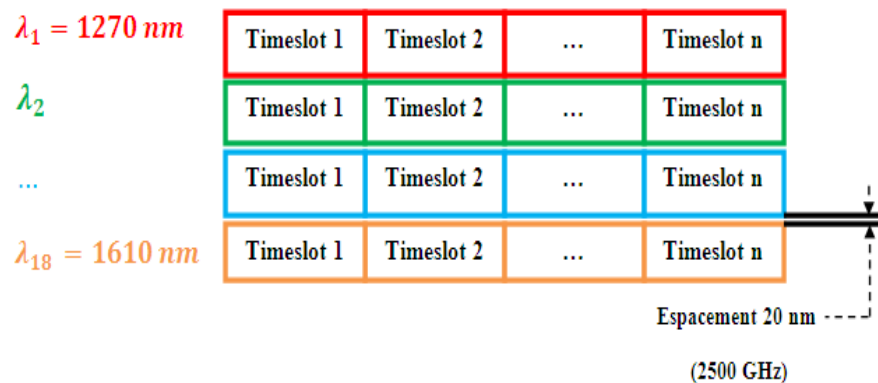
#### a. Multiplexages à filtres

Le multiplexage en longueur d'onde à filtre, appelé aussi, multiplexage à deux voies (deux longueurs d'onde relativement espacées, ou deux fenêtres). Les coupleurs à deux voies sont en général réalisés par la technologie à filtre dichroïque, qui sépare deux fenêtres à la fois assez larges et assez espacées : par exemple la fenêtre  $0.85$  et la fenêtre  $1.3 \mu m$ . Pour les réseaux d'accès de type PON ils sont utilisés deux fenêtres  $1.3$  et  $1.5 \mu m$  [6]. On rencontre deux principales variantes du WDM : CWDM et DWDM.

### b. CWDM

La technologie CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) est adaptée pour le transport courte distance. Le système CWDM est idéalement adéquat pour des infrastructures en fibres avec des portées de fibres qui sont à 50 km ou moins et qui n'ont pas besoin de la régénération du signal ou de la présence des amplificateurs optiques, utilisent des lasers qui ont un débit de 2,5 Gbps (OC-48/STM-16) et peuvent multiplexer jusqu'à 18 longueurs d'onde. Cela fournit un maximum de 45 Gbps sur une seule fibre. Le laser de transmission et le détecteur de réception sont généralement intégrés dans un ensemble unique appelé un émetteur-récepteur. Les multiplexeurs optiques et démultiplexeurs sont définis à ces longueurs d'onde. Ils ne nécessitent pas un contrôle étroit en longueur d'onde, ce qui explique leur coût moins élevé par rapport aux équipements DWDM.

Cette technologie est schématisée dans La Figure II.9. Ce système est caractérisé par un espacement entre canaux de 20 nm ou 2500 GHz (spécifiés par la norme ITU G.694.2). La grille CWDM est définie en termes de séparation de longueur d'onde. Cette grille est constituée de 18 longueurs d'onde définies dans la plage 1270 nm à 1610 nm [8,14].



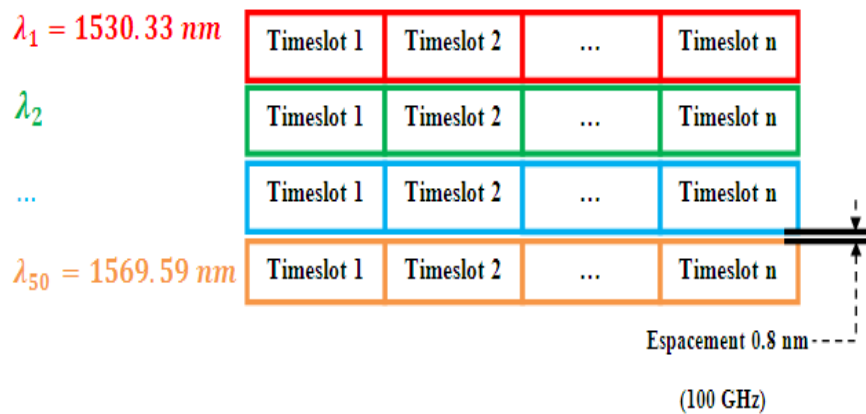
**Figure II.9.** Longueur d'onde CWDM [14]

### c. DWDM

La technologie DWDM est adaptée pour le transport courte et longue distance de données. Le système DWDM est parfaitement adapté dans le Metro ou long distance où les demandes de capacité sont extrêmement élevés. Cette grande capacité demande un résultat de l'agrégation des services reçus des clients multiples à la périphérie de l'entreprise, utilisent des lasers qui ont un débit pouvant aller jusqu'à 10 Gbps (OC-192/STM-64) et peuvent multiplexer jusqu'à 240 longueurs d'onde. Cela fournit un maximum de 2,4 Tbps sur une seule fibre. Les nouveaux systèmes DWDM seront en mesure de soutenir 40-Gbps avec un maximum de longueurs d'onde de 300 chaînes, résultant en 12 Tbps de bande passante sur une seule fibre. Les Émetteurs-récepteurs des systèmes DWDM consomment plus d'énergie et dissiper la chaleur beaucoup plus que les

émetteurs-récepteurs des systèmes CWDM. Cela crée une obligation pour le refroidissement des sous-systèmes de DWDM.

Cette technologie est schématisée dans La Figure II.10. Aujourd'hui les systèmes DWDM Metro déployés utilisent généralement un espacement de fréquence de 100 GHz ou de 200 GHz. L'espacement commun du DWDM peut être 200, 100, 50, 25, ou 12,5 GHz avec un nombre de canaux pouvant atteindre jusqu'à 300 ou plusieurs canaux à des distances de plusieurs milliers de kilomètres avec l'amplification et la régénération le long de cette route. Comme spécifié par le standard ITU G.694.1, les systèmes DWDM sont caractérisés par un espacement entre canaux de 50 ou 100 GHz. La grille de fréquence de DWDM est ancrée à 193,1 THz. Les systèmes DWDM ont de façon significative une granularité plus fine entre les longueurs d'onde (espacement typique de 100-GHz) par rapport à leurs homologues CWDM. Selon la grille UIT, les produits DWDM fonctionnent dans la bande C entre 1530 et 1565 nm ou dans la bande L entre 1565 et 1625 nm. L'un des avantages du DWDM est le gain dans la région de l'EDFA (Amplificateur à Fibre dopée Erbium) qui correspond à la bande C. Les longueurs d'onde peuvent être amplifiées pour compenser les pertes dues à la longue distance de transmission des fibres ou /et les pertes passives élevées (pertes du coupleur, du multiplexeur, etc...) [8,14].



**Figure II.10.** Longueur d'onde DWDM [14]

**Note :** la relation entre l'écart fréquentiel  $\Delta f$  et l'écart en longueur d'onde  $\Delta \lambda$  est calculée par l'équation suivante ;

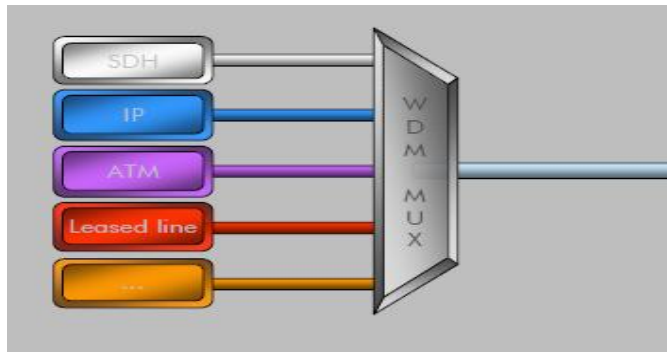
$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{c} * \Delta f \quad (\text{II.1})$$

### II.3.2.3 Les apports de la technologie WDM

- ✓ La technologie WDM répond aux besoins d'augmentation de débits et de taux de partage dans le réseau d'accès.
- ✓ La transmission est transparente dans cette technologie, permet une indépendance vis-à-vis les protocoles et une indépendance entre canaux (On peut trouver sur une

même fibre de la voix dans des trames SDH, de la vidéo dans des cellules ATM, Figure II.11).

- ✓ Nous pouvons trouver plusieurs applications pour cette technologie par exemple : le multiplexage en longueurs d'onde pour la commutation et le routage optique.
- ✓ La limite en débit imposée par le TDM peut être dépassée en introduisant le WDM et en affectant une longueur d'onde par utilisateur [8 et 15].



**Figure II.11.** Différents protocoles sont multiplexés [15]

#### II.3.2.4 Les limites de la technologie WDM

Nous pouvons citer quelques limitations du multiplexage optique :

- ✓ Effet de la diaphonie,
- ✓ Effet de la polarisation au niveau des multi/démultiplexeurs (pertes d'insertion),
- ✓ Diaphonie due à la conversion Raman,
- ✓ Diaphonie due à d'autres phénomènes non linéaires (produisent lors de la propagation du signal dans la fibre dépendamment du niveau de puissance véhiculé),
- ✓ Espace entre voies lié aux relations d'incertitude,
- ✓ Effet de filtrage de longueur d'onde sur les lasers multimodes [13].

#### II.4 Conclusion

Les réseaux d'accès optiques représentent une partie non négligeable dans les transmissions à très haut débits. Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les types, les terminologies et les différentes topologies d'architectures du réseau d'accès optique. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude des différents composants optoélectroniques constituant une liaison WDM ainsi que les critères de qualité.

### III.1 Introduction

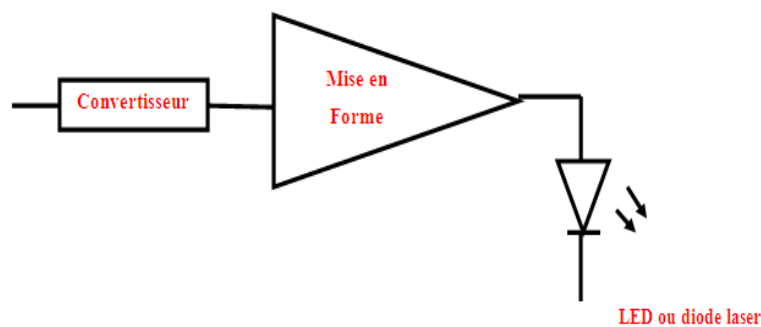
Après une présentation de la théorie de la propagation sur les fibres optiques et leurs types dans le premier chapitre, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'étude de différents composants optiques constituant une liaison WDM (émetteurs et récepteurs optoélectroniques, les modulateurs, les amplificateurs optiques, les multiplexeurs/démultiplexeurs optiques et les transpondeurs) et on termine par une explication détaillée sur les critères de qualité d'une transmission optique.

### III.2 Les composants optoélectroniques

Le rôle est de convertir le signal électrique en signal optique, et réciproquement, par l'intermédiaire de diodes émettrices (les transmetteurs) et photodétecteur (les récepteurs), à semi-conducteurs. Ces composants, d'emploi facile, peuvent en effet être modulés à des fréquences élevées sous des tensions faibles [6].

### III.3 Les transmetteurs

La fonction du transmetteur est de convertir les signaux fournis par l'équipement en un signal pouvant être transmis par voie optique. Ce signal optique étant sous forme digitale, le transmetteur pourra comprendre un bloc de conversion analogique-digitale. Le transmetteur comportera également le dispositif de codage (Figure III.1).



**Figure III.1.** Synoptique d'un transmetteur

Les caractéristiques permettant de qualifier un transmetteur sont :

- La puissance d'émission et la puissance de couplage,
- La longueur d'onde,
- La vitesse maximale de transmission,
- Le type de codage,
- Le rapport de cycle,
- Le temps de montée et de descente,
- La tension d'alimentation et la plage de température.

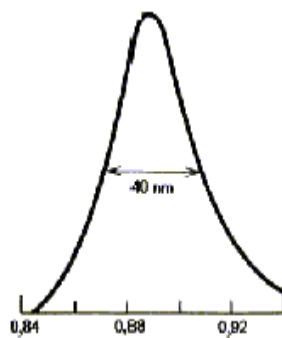
Les systèmes de transmission par fibre optique nécessitent des émetteurs optiques devant remplir certaines conditions :

- Faible encombrement,
- Fonctionnement à température ambiante,
- Commande par circuits à semi-conducteurs,
- Capacité à moduler la lumière émise à haute fréquence,
- Spectre d'émission étroit,
- Puissance d'émission importante,
- Grande durée de vie [16].

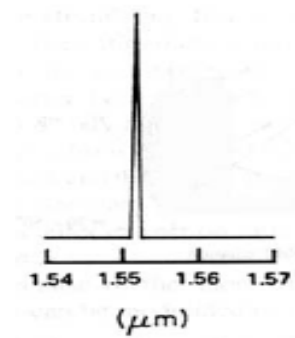
Les composants d'émission de lumière qui satisfont le mieux à ces critères sont des composants à semi-conducteurs et se regroupent en deux catégories : les diodes électroluminescentes et les diodes laser. Ces deux sources sont réalisées à partir de jonction PN polarisée en direct, le principe d'émission est dû à la recombinaison des paires électron-trou.

La DL (Diode Laser) est une source cohérente, et monochromatique. Elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance (faible largeur spectrale  $\Rightarrow$  bande passante importante). La cohérence exprime l'étroitesse du spectre de fréquence.

La LED (Light Emitting Diode) est une source incohérente, et poly-chromatique. Elle présente contrairement au laser un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grande bande passante (Figure III.2).



(a) Spectre d'émission d'un LED



(b) Spectre d'émission d'un DL

**Figure III.2.** Spectre d'émission d'une source optique

Les caractéristiques spectrales des sources :

- ✓ Les systèmes des longueurs pratiques utilisent des sources à semi-conducteur mettant autour de  $\lambda=0,85\mu\text{m}$ ,  $\lambda=1,3\mu\text{m}$  ou  $\lambda=1,55\mu\text{m}$  (les bandes de fréquences

utilisées autour de ces trois longueurs d'onde sont appelées « fenêtres de télécommunications »).

- Les sources sont caractérisées par leur spectre et leur diagramme de rayonnement.
- Actuellement le seul type de source utilisée est la diode laser qui présente un spectre de raies très fines [6,16].

Le tableau III.1 représente une comparaison des sources de lumière pour les fibres optiques.

	<b>LED</b>	<b>Diode laser</b>	<b>Diode laser monomode</b>
Largeur spectrale (nm)	20 – 100	1 - 5	< 0,2
Temps de montée (ns)	2 – 250	0,1 – 1	0,05 – 1
Fréquence de modulation maximale (MHz)	< 300	2000	6000
Pertes de couplage	élevées	moyennes	faibles
Fibre adaptée	Saut d'indice multimode, gradient d'indice multimode.	Gradient d'indice multimode, monomode.	Monomode
Sensibilité à la température	Faible	élevées	élevées
Facilité d'utilisation	Simple	complexe	complexe
Durée de vie (h)	$10^5$	$10^4 - 10^5$	$10^4 - 10^5$
Prix	Très faible	Elevé	Faible
Application principale	Distances moyennes, Débit moyen.	Grandes distances, Débit élevé.	Courtes distances, Débit très élevé.

**Tableau III.1.** Performances des trois catégories des sources de lumière [17]

Afin de pouvoir transmettre un plus grand nombre d'informations par unité de temps, le signal numérique peut être codé. Il existe un grand nombre de types de codage, les plus courants étant les codages NRZ, RZ, NRZI, Manchester, Biphase-M [16].

### III.4 Modulation

Un modulateur est un dispositif capable de modifier les paramètres d'onde optique (Amplitude, phase). Il existe plusieurs façons pour obtenir une lumière modulée (Figure III.3):

- La première manière consiste à fabriquer une source modulable. C'est la modulation directe, dont l'exemple type est le Laser à semi-conducteur.
- La seconde consiste à moduler la lumière émise par une source non modulable. C'est la modulation externe.
- En fin, si l'on dispose d'un modulateur, on pourra l'introduire dans une cavité Laser : on fait ainsi la modulation interne.

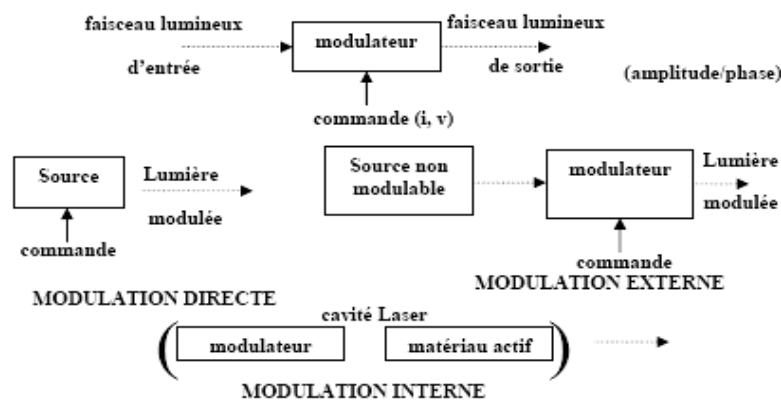


Figure III.3. Types de modulation.

La modulation interne est subdivisée en deux autres modulations :

- Modulation d'amplitude ou d'intensité : L'un des principaux avantages du Laser à semi conducteur réside dans le fait qu'il est possible de le moduler facilement: la modulation du courant qui le traverse entraîne directement la modulation de la lumière émise en intensité soit en fréquence optique.
- Modulation de fréquence ou de longueur d'onde : Un autre trait caractérise le Laser à semi-conducteur, c'est que la modulation de l'intensité ou de l'amplitude entraîne la modulation de fréquence optique ou de la longueur d'onde [6,18].

### III.5 Fenêtre de transmission et les bandes de fréquences optiques WDM

Compte tenu de l'atténuation et de la dispersion des fibres optiques, mais aussi des caractéristiques des composants optoélectroniques disponibles, on définit des fenêtres de transmission, bandes de longueur d'onde de propriétés spécifiques, à l'intérieur desquelles on peut éventuellement pratiquer du multiplexage en longueur d'onde (voir le tableau III.2) [6].

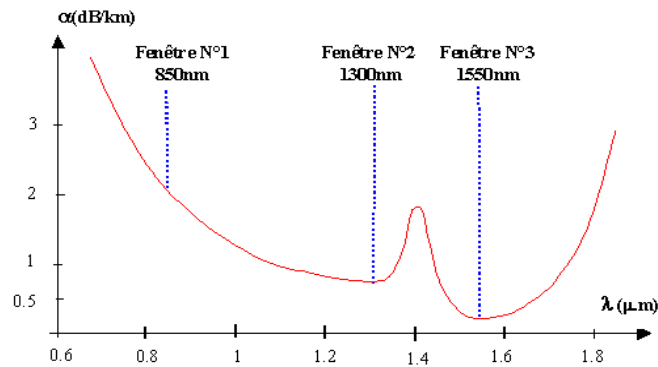
Il existe trois fenêtres pour transmission à fibre optique (Figure III.4) :

Les fenêtres 1 et 2 résultent d'un compromis technico-économique entre l'atténuation apportée par la fibre et les composants optoélectroniques utilisés en fonction des applications.

La fenêtre 3 correspond à l'atténuation minimale mais exige des composants optoélectroniques très performants, elle est réservée aux applications à haut débit et longues distances.

	Première Fenêtre	Deuxième Fenêtre	Troisième Fenêtre
Longueur d'onde	0,78 à 0,9 $\mu\text{m}$	1,3 $\mu\text{m}$	1,5 à 1,6
Type de fibre utilisée	Multimode	Multimode et monomode	Monomode
Atténuation	Forte (2 à 4 dB/km)	Faible (0,4 à 1 dB/km)	Très faible (0,2dB/km)
Dispersion chromatique	Forte	Quasi nulle	Faible, non nulle très faible dans les fibres à dispersion décalée
Emetteur : type	DEL ; diode laser VCSEL (très haut débit)	DEL (dans multimodes), diodes laser standard (dans monomodes)	Diodes laser DFB (monochromatique)
Matériau	GaAlAs/GaAs	GaInAsP/InP	
Récepteur : matériau	Silicium	GaInAsP/InP Ge,HgCdTe(très peu employés)	
Coût des composants	Faible	Moyen	Elevé
Application	Transmission courte distance ; réseaux locaux ; gigabit à très courte distance	Transmission moyenne et longue distance ; réseaux locaux et métropolitains haut débit	Transmission très longue distance et à l'amplification optique
Multiplexage	Entre les deux fenêtres		« Dense » (nombreux canaux dans la même fenêtre)

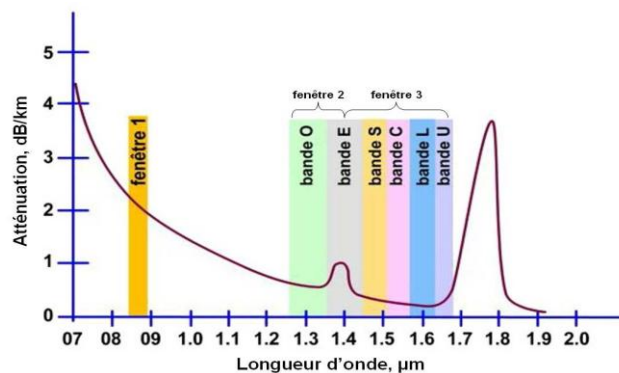
**Tableau III.2.** Fenêtres de transmission des fibres de silice [6]



**Figure III.4.** Courbe d'atténuation de la silice incluant les fenêtres de transmission

Les bandes de fréquences optiques (et donc les longueurs d'ondes) qui sont utilisées dans les systèmes WDM ont été normalisées par l'UIT selon le plan suivant (voir Figure III.5) :

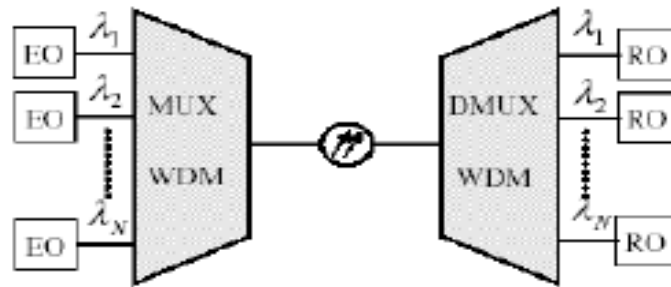
- ✓ Bande O (Original) : 1260 à 1360 nm (220.435 à 237.930 THz),
- ✓ Bande E (Extended) : 1360 à 1460 nm (205.337 à 220.435 THz),
- ✓ Bande S (Short wavelength) : 1460 à 1530 nm (195.942 à 205.337 THz),
- ✓ Bande C (Conventional) : 1530 à 1565 nm (191.560 à 195.942 THz),
- ✓ Bande L (Long wavelength) : 1565 à 1625 nm (184.487 à 191.560 THz),
- ✓ Bande U (Ultra-long wavelength) : 1625 à 1675 nm (178.980 à 184.487 THz).



**Figure III.5.** Courbe d'atténuation de la silice incluant les bandes de transmission WDM [6,19]

### III.6 Multiplexeur/Démultiplexeur Optique

Il ne sera pas abordé ici les multiplexeurs électroniques où le multiplexage se fait sur le signal électrique. Il existe sur le marché des multiplexeurs et des démultiplexeurs optiques. Le principe est d'utiliser des sources ou plus à des longueurs d'onde différentes. Le multiplexeur va permettre d'additionner les signaux sur une fibre et le démultiplexeur va séparer les différents signaux pour disposer sur chaque sortie l'un de ces signaux à la même longueur d'onde qu'à l'entrée (Figure III.6).



**Figure III.6.** Multiplexeur/Démultiplexeur en longueur d'onde [16]

Le multiplexeur : de construction relativement simple, le multiplexeur sera constitué de 2 à N entrées. Les signaux transmis sur les fibres d'entrée seront couplés dans une fibre de sortie selon l'un des principes de couplage. La caractéristique la plus importante du multiplexeur sera les pertes d'insertion. Ces pertes sont généralement de l'ordre du décibel. Le multiplexeur optique (OMU) dans les systèmes WDM/DWDM peut être mis en œuvre via diverses technologies les plus commercialisés aujourd'hui comportent 8, 16, 32, 80 et 160 canaux optiques.

Le démultiplexeur est un composant plus complexe que le multiplexeur, aussi bien par son principe de fonctionnement que par sa construction. Il existe trois principes de démultiplexage : le réseau, le prisme et le miroir dichroïque. Les deux premiers utilisant le principe de la déviation géométrique du faisceau, le dernier utilisant le principe de la déviation sélective. Le démultiplexeur optique (ODU) de système WDM peut être mis en œuvre via diverses technologies. Il existe trois types couramment utilisés pour les démultiplexeurs optiques, une fibre optique réseau de Bragg, un diélectrique film type de filtre, et un guide d'onde intégré optique.

### III.7 Transpondeur

Le multiplexeur a pour rôle de changer les longueurs d'ondes des signaux entrant et de les multiplexer sur un seul canal. Pour changer les longueurs d'ondes entrantes, il est nécessaire d'utiliser un transpondeur. Donc lorsque des signaux arrivent au niveau du multiplexeur, il est possible qu'ils aient la même longueur d'onde, même si l'émetteur est différent. Étant donné qu'il n'est pas possible d'envoyer deux fois la même longueur d'onde sur un même lien au risque d'erroné l'information des deux signaux, c'est le transpondeur qui va se charger de changer la longueur d'onde de l'un de ces signaux.

### III.8 Amplificateur optique

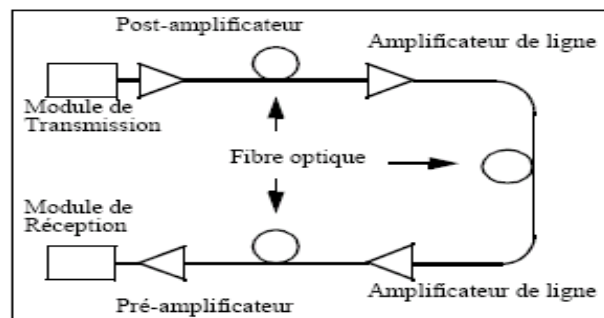
La distance de propagation d'un signal sur une fibre optique est limitée par l'atténuation et la dispersion. On utilise les amplificateurs optiques dans les liaisons à longue distance, ils remplacent les plus anciennes génératrices optoélectroniques afin de créer des liaisons transparentes permettant notamment le multiplexage en longueur d'onde. Ils peuvent aussi être utilisés comme booster en

amont, servant à augmenter la puissance de l'émetteur afin de pouvoir distribuer sur un plus grand nombre de fibres optiques [20].

### III.8.1 Les différents types d'amplificateurs

Tout d'abord, on distingue tout au long de la chaîne de transmission trois types d'amplifications (voir Figure III.7):

- Les boosters (amplification de puissance) : utilisés uniquement dans les systèmes comportant un seul canal, ils se situent au début de la chaîne, directement après l'émetteur. Ils se caractérisent par des puissances très élevées en sortie, ce qui permet de débiter la transmission avec un signal de fort niveau ;
- Les amplificateurs en ligne : ils se situent sur la ligne de transmission et ont pour fonction de rattraper les pertes induites par la fibre de ligne. Généralement situés tous les 70 km environ, ils ont un gain élevé et un niveau de bruit faible ;
- Les préamplificateurs : situés à la fin de la chaîne de transmission, ils ont pour fonction de rehausser le niveau de signal avant le récepteur. Ils se caractérisent par un gain élevé et un niveau de bruit très faible.



**Figure III.7.** Applications de l'amplificateur optique

Le tableau suivant regroupe les performances typiques de ces amplificateurs dans le cas d'un EDFA en bande C [21].

Type d'amplificateur	Gain	Figure de bruit	Puissance de sortie
Booster	>15 dB	6 dB	> 20 dBm
Amplificateur en ligne	25 dB	5,5 dB	17-20 dBm
Préamplificateur	>30 dB	4,5 dB	10-15 dBm

**Tableau III.3.** Performances des trois catégories d'amplificateurs (cas de l'EDFA en bande C)

### III.8.2 Comparaison des amplificateurs

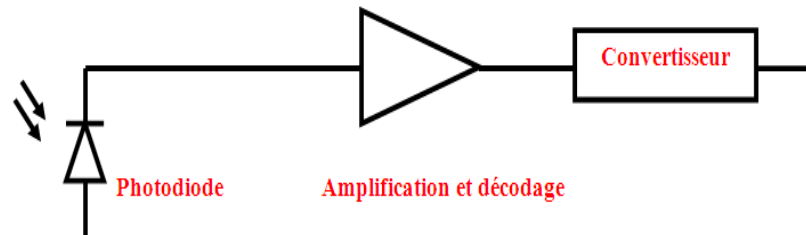
Elle est résumée dans le tableau III.4, où nous comparons les caractéristiques des amplificateurs optiques de type EDFA (fibres dopées erbium) et SCOA (semi-conducteurs).

Amplificateurs	EDFA en silice	EDFA en silice	EDFA en Verres fluorés	A semi-conducteur
Pompage à	980 nm	1480 nm	1480 nm	
Gain	30 à 40 dB	20 à 30 dB	40 dB	20 à 30 dB
Rapport gain à puissance de pompe	10 dB/mW	4 dB/mW	6dB/mW	
Puissance de saturation	20 à 30 dBm	10 à 15 dBm	17 à 20 dBm	10 dBm
Rendement quantique	80%			
Largueur de bande amplifiée	20 à 30 nm	10 à 20 nm	30 nm	30 à 40 nm
Facteur de bruit	3 dB	6 à 9 dB	6 dB	12 dB

**Tableau III.4.** Caractéristiques comparées des amplificateurs optiques [6]

### III.9 Les récepteurs

Le récepteur recevra le signal optique et il sera chargé de transformer ce signal de manière à recréer les différents signaux mis en forme par le transmetteur : amplification, décodage, séparation du signal utile et de l'horloge, et conversion digitale-analogique si nécessaire (Figure III.8).



**Figure III.8.** Synoptique d'un récepteur

Tout comme chaque équipement électronique, le récepteur sera caractérisé par des qualificatifs qui sont :

- La sensibilité,
- La longueur d'onde,
- La dynamique,
- Le coefficient d'amplification,
- Le taux de bits d'erreur,
- Le temps de montée et de descente,
- Les tensions d'alimentations et la plage de température.

La fonction des composants de réception est, à l'inverse des émetteurs, de convertir le flux lumineux qui les atteint en énergie électrique. Le plus courant est la photodiode qui convertit le flux incident en courant, photodiode existant en deux types utilisés pour les applications à fibre optique : la photodiode PIN et la photodiode à avalanche.

La photodiode PIN (Positive Intrinsic Negative Photodiodes) diffère de la structure de base par la présence d'une zone faiblement dopée comprise entre la zone dopée N et une zone fortement dopée P+. Cette zone I, appelée zone intrinsèque, a un comportement tel qu'elle ne sera ni fortement N ni fortement P et elle se comporte ainsi comme la zone de déplétion. Ne disposant pas de porteurs libres, sa résistance est élevée. Les porteurs libérés par les photons incidents sont très rapidement capturés par le champ électrique pour rejoindre les zones N ou P suivant leur charge. En plus, lorsqu'il est polarisé en inverse, ce composant émet un courant proportionnel à la puissance optique incidente.

Le signal reçu étant souvent très faible, il est nécessaire d'amplifier le photo-courant. Le bruit du préamplificateur étant en général prépondérant, on peut avoir intérêt à utiliser un composant à gain interne, la photodiode à avalanche (PDA) [6]. Le PDA peut être comparé à la diode laser, le rapport entre photons et électrons étant dans ces deux composants supérieur à 1. Dans le PDA, un photon va être créateur de plusieurs électrons libres, générant ainsi un courant important. Une zone fortement dopée P+ est intercalée entre la zone dopée N et la zone faiblement dopée I. les électrons libres et les trous générés par les photons incidents vont être accélérés par

cette zone P+, gagnant ainsi quelques électron-volts en énergie cinétique. Les PDAs sont employés pour détecter des intensités de lumière extrêmement faibles [16]. Les Si PDAs sont employés dans la gamme de longueurs d'onde de 250 à 1100 nanomètres, tandis que l'InGaAs est employé comme matériel semi-conducteur dans les PDAs pour la gamme de longueurs d'onde à partir de 1100 à 1700 nanomètres [22].

Les caractéristiques générales :

Certaines caractéristiques permettent de définir les diverses photodiodes, PIN o à PDA :

- Bruit : deux types de bruit sont conséquents pour les photodiodes (le shot noise et le bruit thermique),
- Rapport signal sur bruit,
- Taux d'erreur par bit (BER),
- Responsivité,
- Efficacité quantique,
- Courant d'obscurité,
- Seuil de détection et le temps de réponse [16].

### III.10 Le rapport signal sur bruit optique (OSNR)

L'OSNR est le rapport de la puissance du signal optique par la puissance du bruit optique sur une bande de fréquence donnée. Les sources de bruit peuvent être l'émetteur, la diaphonie (crosstalk), ou l'émission spontanée amplifiée (Amplifier Spontaneous Emission, ASE) pour ne citer que ceux-là. Toutefois, on ne s'intéressera qu'à l'ASE qui constitue le facteur le plus important [23].

La détection du signal est généralement affectée par l'atténuation et la dispersion. Pour cela, on utilise des amplificateurs qui, d'un autre côté, entrent des imperfections supplémentaires causées par l'ASE. En pratique, l'utilisation d'un amplificateur aide à améliorer la qualité du signal car l'augmentation de l'amplitude du signal va aider à dépasser le bruit généré par le récepteur. Cependant, le bruit de fond optique qui accompagne le signal optique désiré sera amplifié avec le signal. Par conséquent, l'OSNR aura tendance à se dégrader en passant à travers le système de transmission.

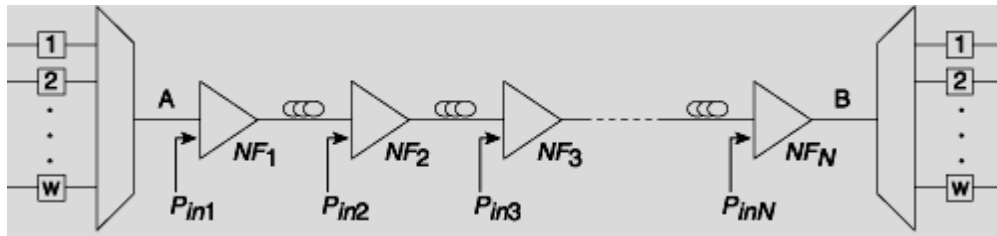
L'OSNR est le plus important paramètre associé à un signal optique donné. En effet, Le facteur  $Q$  dépend directement de l'OSNR. Ils sont liés par l'égalité suivante :

$$Q_{dB} = 20 \log_{10} \sqrt{OSNR} * \sqrt{\frac{B_0}{B_c}} \quad (III.1)$$

Où  $B_o$  est la bande passante optique du composant d'extrémité (photo détecteur) et  $B_c$  est la bande passante électrique du filtre du récepteur [15]. En d'autres termes, Le facteur  $Q$  est proportionnel à l' $OSNR$ . D'où l'importance de l' $OSNR$ .

L' $OSNR$  est une quantité mesurable pour un réseau donné et elle peut être calculée à partir des paramètres du système. On présente dans ce qui suit une brève description de la méthode permettant le calcul de l' $OSNR$  [15].

Considérons un lien physique (Figure III.9), des amplificateurs sont placés périodiquement pour booster la puissance du signal. Ainsi, un signal peut traverser des distances supérieures aux limites imposées par les pertes de la fibre. Cependant, avec cette méthode, chaque étage d'amplification ajoute sa propre composante d'ASE et dégrade l' $OSNR$ . De plus, chaque amplificateur amplifie d'avantage le bruit déjà présent. Il est à noter que le bruit est omniprésent à travers le spectre et il est quasiment impossible à éliminer. Il est donc impératif de trouver une méthode pour calculer l' $OSNR$  (en sortie) à la fin d'un système à  $N$  étages d'amplification pour voir si la valeur  $N$  est valide.



**Figure III.9.** Les étages d'amplification [23]

A chaque étage d'amplification, l' $OSNR$  est donné par :

$$OSNR = \frac{P_{in}}{NF_{stage} * h * \nu * \Delta f} \quad (III.2)$$

Où  $NF_{stage}$  est le facteur de bruit de l'étage (Noise Figure),  $h$  est la constante de Planck ( $6,6260 \times 10^{-34}$ ),  $\nu$  est la fréquence optique 193 THz, et  $\Delta f$  est la bande de  $NF$  [15].

L' $OSNR$  total du système à  $N$  étages d'amplifications est déduit de l'égalité suivante :

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{OSNR_i} \quad (III.3)$$

### III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différents composants optoélectroniques nécessaires pour la conception et l'évaluation des performances d'un système WDM pour les télécommunications optiques haut débit. Nous avons également expliqué les trois critères de qualité d'une transmission optique (le facteur de qualité  $Q$ , le BER et l' $OSNR$ ). Les résultats et les interprétations des différentes conceptions seront présentés dans le chapitre suivant.

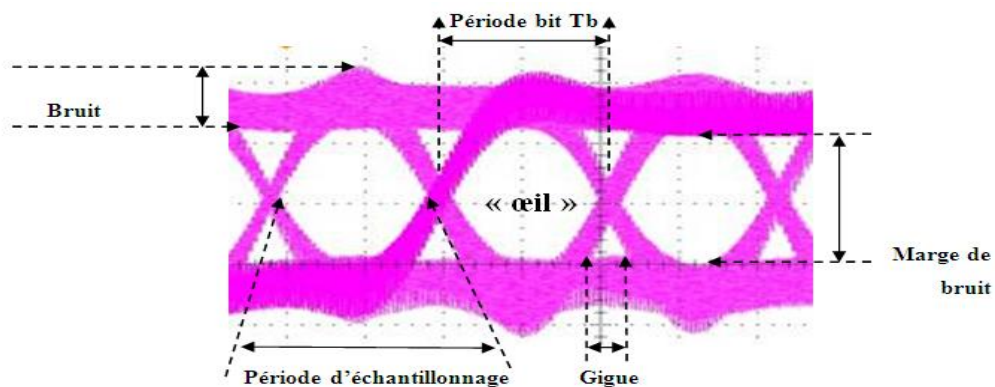
## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter l'étude et la conception d'un système de transmission optique à très haut débit en utilisant la technique WDM. La théorie précédente nous a permis de développer une simulation introduite sous le logiciel industriel OptiSystem. Tout d'abord, nous commençons par une définition sur la performance d'un système de transmission optique à haut débit et une présentation de logiciel OptiSystem, suivie d'une configuration des différentes simulations effectuées sur des systèmes WDM nécessaires pour étudier la variation des critères de qualité en modifiant les paramètres essentiels de simulation ainsi que l'interprétation des résultats obtenus.

## IV.2 Performance d'un système de transmission optique à haute débit

La qualité des transmissions numériques est évaluée en mesurant le taux d'erreurs par bit, le TEB. Des appareils spécialisés engendrent des séquences aléatoires et comparent le signal en sortie de la liaison optique avec le signal d'entrée. Le TEB est obtenu en divisant le nombre d'erreurs par le nombre total de bits. Compte tenu de la haute qualité des transmissions optiques, on spécifie des TEB jusqu'à  $10^{-12}$  ce qui correspond à un bit erroné pour mille milliards de bits transmis, il faut donc effectuer les mesures pendant un intervalle de temps suffisamment long afin d'obtenir une mesure fiable. Par exemple on emploie presque deux minutes pour des mesures à un débit de 10 Gb/s. On utilise souvent en télécommunications la méthode dite du diagramme de l'œil pour décrire la dégradation par le bruit et la dispersion d'un signal numérique. Une séquence aléatoire de bits est visualisée sur un oscilloscope en mode d'accumulation en fonction du temps, la somme de tous ces signaux aboutissent à une forme de signal appelé l'œil.

Sans bruit, les traces se superposent exactement. Quand le bruit augmente les signaux varient et la trace s'épaissit, les transitions dans le temps deviennent aussi moins définies à cause de la gigue qui augmente, on dit que « l'œil se ferme » (voir la Figure IV.1).

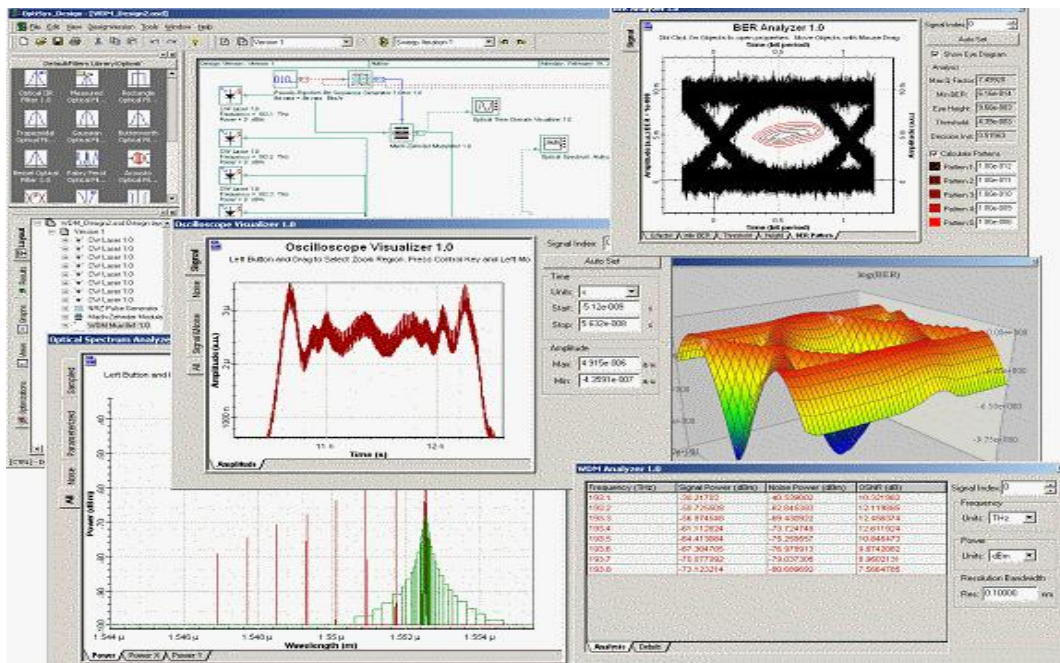


**Figure IV.1.** Diagramme de l'œil d'une transmission par fibre optique [20]

### IV.3 Présentation du logiciel OptiSystem

#### IV.3.1 Optiwave : un logiciel complet pour la simulation optique

Les systèmes des télécommunications optiques présentent une complexité dans leur modélisation et leur simulation. Le dessin et l'analyse des systèmes incluent des composants non linéaires et des sources non Gaussiennes du bruit, ce qui ne facilite pas la tâche du concepteur [24]. *OptiSystem* vient résoudre ces problèmes tant par la simplicité de son utilisation que par la grande variété de sa bibliothèque de composants. OptiSys Design est un paquet destiné à la simulation des communications optiques en mode simulation, ce logiciel innovateur permet la conception, le test et l'optimisation virtuelle des liaisons optiques de tous types [24].



**Figure IV.2.** Optiwave : l'interface graphique de l'utilisateur, la bibliothèque des composants, l'éditeur de disposition et les outils de la visualisation

Optiwave permet un contrôle de l'interface de l'utilisateur graphique indépendamment de la disposition des composants optiques et du netlist. Optiwave comprend aussi une bibliothèque étendue de composants actifs et passifs dont on peut facilement faire varier leurs paramètres physiques.

#### IV.3.2 Les principaux avantages

Optiwave est une application complète pour établir des simulations et des tests de montages optiques, en effet Optiwave comprend une bibliothèque riche de composants, tel que les fibres et des appareillages de mesures paramétrables.

Optiwave est une application Xwindows, elle comprend essentiellement une fenêtre principale répartie en plusieurs parties :

- Vue d'ensemble du projet : permet la visualisation miniature du layout en cours d'édition.
- Bibliothèque : une base de données de divers composants existants.
- Editeur du layout : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.
- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.
- Groupe de paramétrage : permet le paramétrage global du projet en cours et la simulation.
- Fenêtre de sortie : lors de la simulation, cette fenêtre permet la visualisation des diverses phases de la simulation ou des messages d'erreurs.

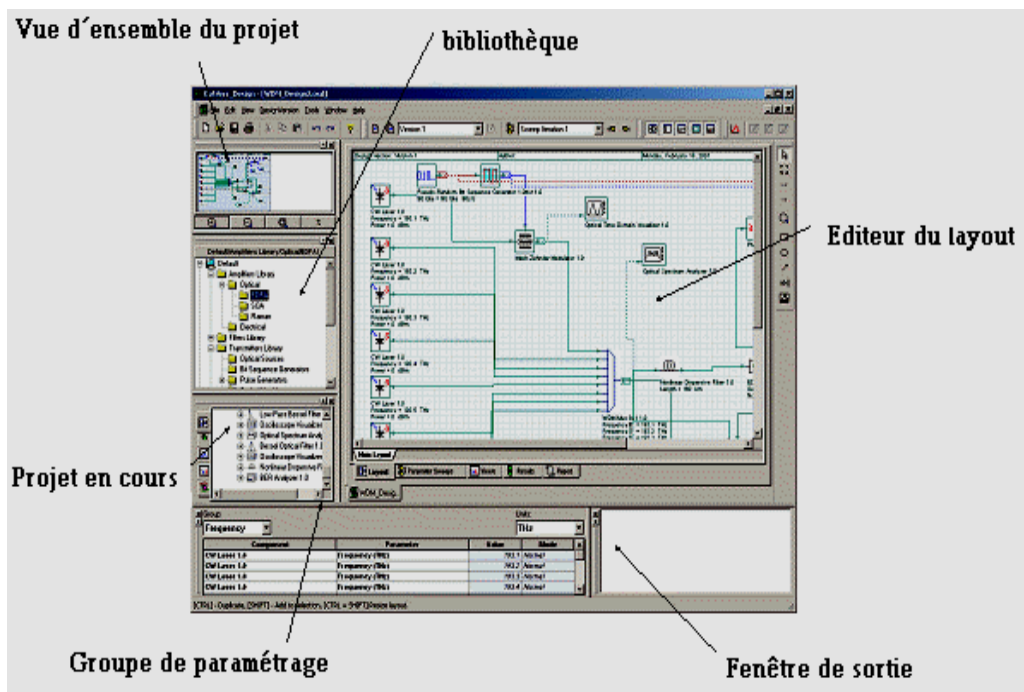


Figure IV.3. Les sous fenêtres d'OptiSystem

### IV.3.3 Edition et simulation

Lors de la conception d'un layout, il suffit de glisser le composant de la bibliothèque vers le layout pour le placer. *OptiSystem* permet aussi le paramétrage pour chaque composant défini dans le layout. En effet, un double-clic sur le composant permet l'affichage de ses paramètres.

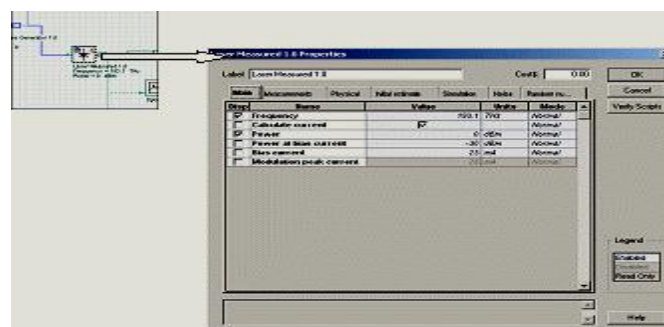


Figure IV.4. Le paramétrage d'un composant

Par contre, avant de lancer la simulation, le layout présente aussi des paramètres qu'on peut contrôler par un simple double-clic dans le layout.

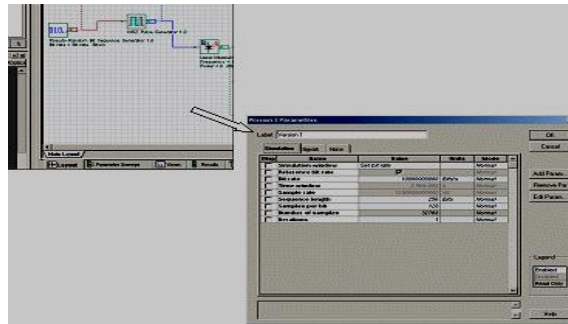


Figure IV.5. Modification des paramètres globale du layout

Pour lancer la simulation, il suffit de saisir ou bien en tapant simultanément Ctrl+F5 ou bien en accèdent directement par le menu Fichier puis Calculate...

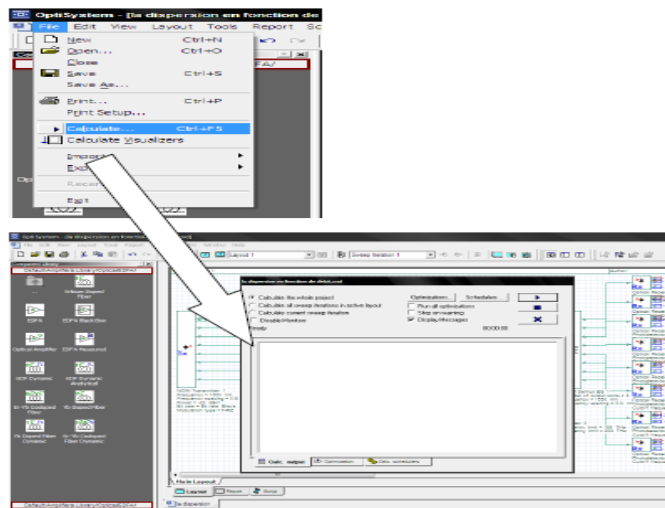


Figure IV.6. Démarrage de la simulation

Enfin, pour visualiser les diverses analyses, un double-clic sur l'appareil de mesure pour afficher la simulation en 2D ou en 3D.

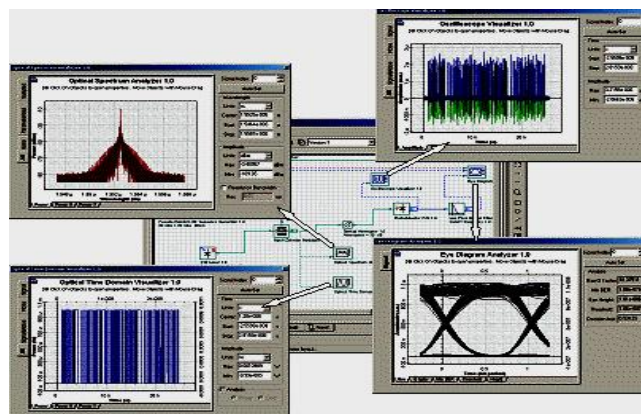
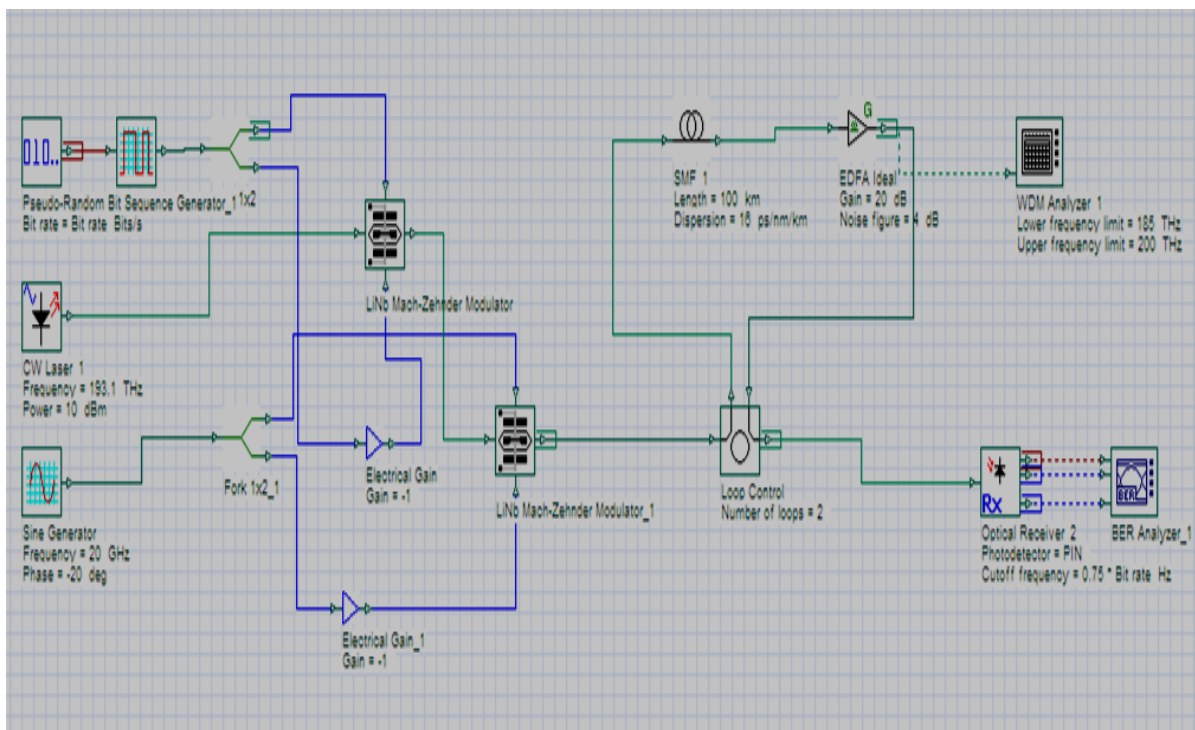


Figure IV.7. Affichage des résultats de la simulation

#### IV.4 Résultats de simulation et interprétations

##### IV.4.1 Le premier scénario : Résoudre le problème de la dispersion chromatique par des différentes configurations (une liaison simple)

La simulation a été faite par le logiciel OptiSystem. La Figure IV.8 représente l'architecture du système de transmission proposée, le système est composé d'un module émetteur configuré par un modulateur externe appelé Mach-Zehnder qui génère des signaux CS-RZ au débit de 10 Gbit/s avec des longueurs de séquences 512 bit, juste après nous trouvons une fibre optique monomode SMF (Single Mode Fiber) de longueur 100 km avec une atténuation de 0.2 dB/km et une dispersion chromatique de 16 ps/nm/km suivi par un amplificateur optique EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Les signaux accumulés vont attaquer un récepteur optique composé d'une photodiode PIN (sensibilité -18dBm avec une réponse de 1 A/W) et d'un filtre électrique passe-bas de fréquence de coupure 0.75 fois la fréquence de rythme. Afin d'observer la variation des valeurs du taux d'erreur binaire BER, du facteur de qualité Q et du rapport signal sur bruit OSNR (dB) du système, on utilise des analyseurs de BER et de WDM.



**Figure IV.8.** Système de transmission proposé

D'après la recommandation G.692 de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), la valeur de 193.1 THz a été prise comme fréquence de référence car elle est proche de plusieurs raies de transition laser correspondante à des références de fréquences absolues et correspond à une longueur d'onde de 1552.524 nm. Cette recommandation a été établie sur la base de l'expérience acquise avec des amplificateurs à fibre de silice dopée à l'erbium EDFA, fonctionnant au voisinage

de 1550 nm. Pour cette longueur d'onde de 1552.524 nm, nous avons obtenu les résultats présentés sur le Tableau I, à savoir la variation des valeurs d'OSNR, BER et facteur de Qualité.

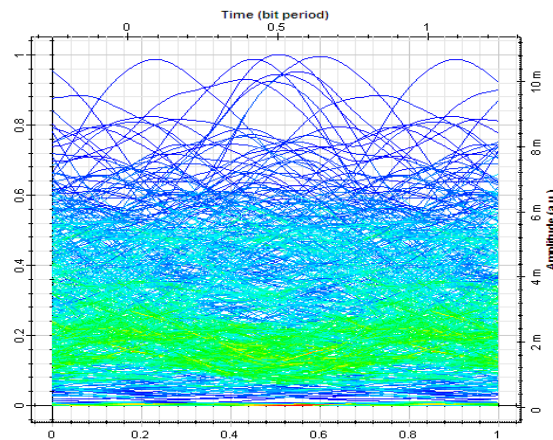
OSNR (dB)	BER	Q
22.11	$6.43 \times 10^{-4}$	3.15

**Tableau IV.1.** Les résultats obtenus

### Evaluation de performance

Le diagramme de l'œil est un outil très pratique pour avoir un premier aperçu de la qualité du signal. Ce diagramme de l'œil est formé par la superposition de l'ensemble des 1 et des 0 détectés sur la fenêtre d'un temps bit et s'obtient grâce à un analyseur de BER. Les distributions statistiques des 1 et des 0 donnent une indication de la qualité du signal transmis.

Un œil est dit ouvert lorsque les zones des statistiques des 1 et des 0 sont bien distinctes, lorsqu'il y a un recouvrement des zones des 1 et des 0, on dit que l'œil se ferme.



**Figure IV.9.** Diagramme de l'œil en sortie du récepteur

D'après la Figure IV.9 et les résultats obtenus par le tableau IV.1, nous remarquons que la transmission du signal est de mauvaise qualité. Pour cela, nous avons préconisé comme solution pour améliorer la qualité du signal du système présenté précédemment, l'insertion d'une fibre optique à dispersion compensatrice DCF (Dispersion Compensating Fiber) juste après un amplificateur en ligne. Cette fibre permet de compenser la dispersion introduite par la fibre de ligne grâce à une forte dispersion négative [3]. La fibre DCF peut être utilisée en pré-compensation (PrC) ou en post-compensation (PoC) voir la Figure IV.10.

**Note :** On garde les mêmes données du système précédant, sauf que nous ajoutons une autre fibre DCF, avec un débit du système de 10 Gbit/s.

La fibre DCF utilisée est caractérisée par une dispersion chromatique de -80 ps/nm/km et une atténuation de 0.5 dB/km.

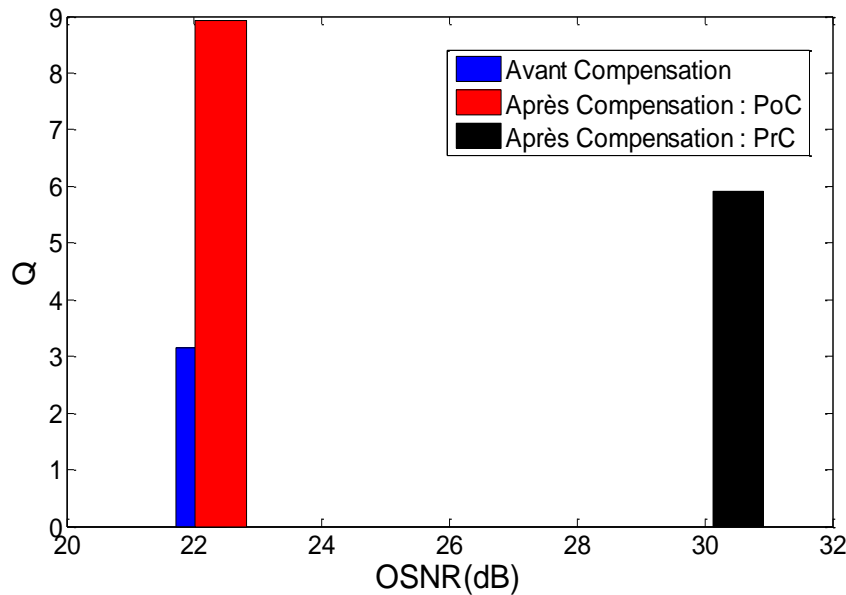


**Figure IV.10.** Les configurations de compensation de la dispersion chromatique

Le tableau IV.2 et la Figure IV.11 présentent respectivement la qualité du système de transmission présenté précédemment avant et après la compensation de la dispersion chromatique.

	OSNR(dB)	BER
Avant compensation	22.11	$6.43 \times 10^{-4}$
Après compensation : (PoC)	22.417	$1.941 \times 10^{-19}$
Après compensation : (PrC)	30.523	$1.5 \times 10^{-09}$

**Tableau IV.2.** Les résultats obtenus avant et après la compensation



**Figure IV.11.** La qualité de transmission avant et après la compensation de la dispersion chromatique Vs OSNR (dB)

À partir de ces résultats (Le Tableau IV.2 et la Figure IV.11), il est tout à fait clair que la meilleure qualité de transmission est obtenue avec la configuration post-compensation qui donne le meilleur taux d'erreur ainsi que le meilleur facteur de qualité par rapport à ceux des deux autres configurations.

D'après la Figure IV.12 et les résultats obtenus par le Tableau IV.2, nous remarquons que la transmission du signal est de bonne qualité par rapport à la Figure IV.9.

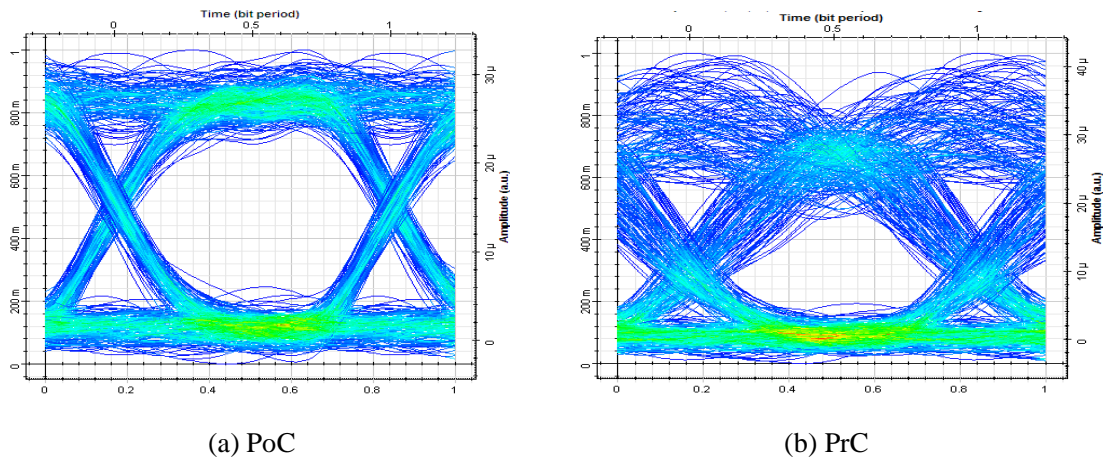


Figure IV.12. Diagramme de l’œil en sortie du récepteur pour deux configurations : (a) et (b)

IV.4.2 Le deuxième scénario : Application d’une configuration adoptée sur une liaison WDM-P2P à 4 canaux

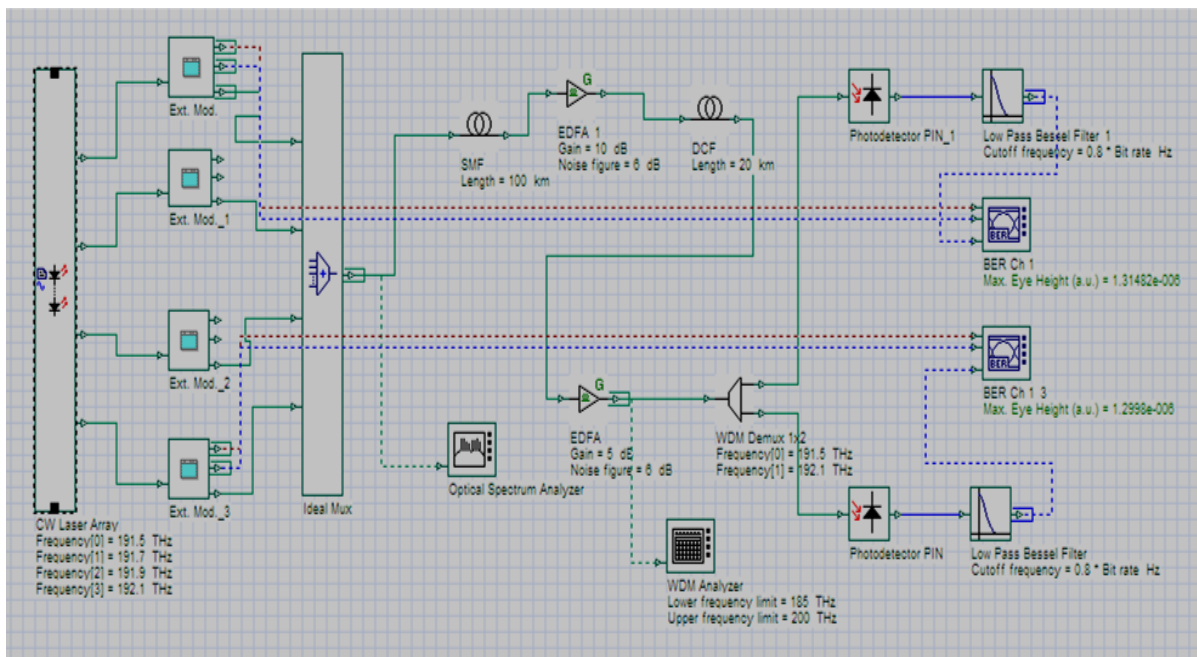


Figure IV.13. Liaison WDM P2P à 4 canaux

La Figure IV.13 présente un système WDM à 4 canaux (la bande simulé ;  $f_1=191.5$  THz,  $f_2=191.7$  THz,  $f_3=191.9$  THz,  $f_4=192.1$  THz). A l’entrée, la longueur des séquences est de 512 bit dont le format de la modulation est NRZ avec un modulateur externe Mach-Zehnder. Alors, ce système commence par un multiplexeur suivi par une fibre optique monomode de longueur 100 km avec une atténuation de 0.2 dB/km et une dispersion chromatique de 17 ps/nm/km, cette fibre est connectée à un amplificateur optique configuré comme un booster qui est aussi connecté à une fibre DCF de longueur 20 km avec une atténuation de 0.5 dB/km et une dispersion chromatique de -85 ps/nm/km. Les signaux accumulés doivent être passés par un démultiplexeur. Au bout de ce système nous trouvons 4 récepteurs (pour chaque canal), ces récepteurs sont caractérisés par une

photodiode PIN et d'un filtre électrique passe-bas de Bessel d'ordre 4, la sensibilité de la photodiode est de -18dBm avec une réponse de 1 A/W, tandis que la fréquence de coupure de ce filtre est de 0.8 fois la fréquence de rythme.

### Résultats obtenus

Les Figure IV.14 et IV.15 présentent respectivement les variations du BER et de facteur de qualité en fonction de débits dans la bande simulée avec un espacement entre canaux de 0.2 THz. On remarque que l'augmentation de débit a une influence sur la qualité de transmission, plus le débit augmente plus on a une dégradation du facteur de qualité. Le BER subit un changement considérable et on a enregistré une augmentation de BER vu que la qualité de transmission est dégradée.

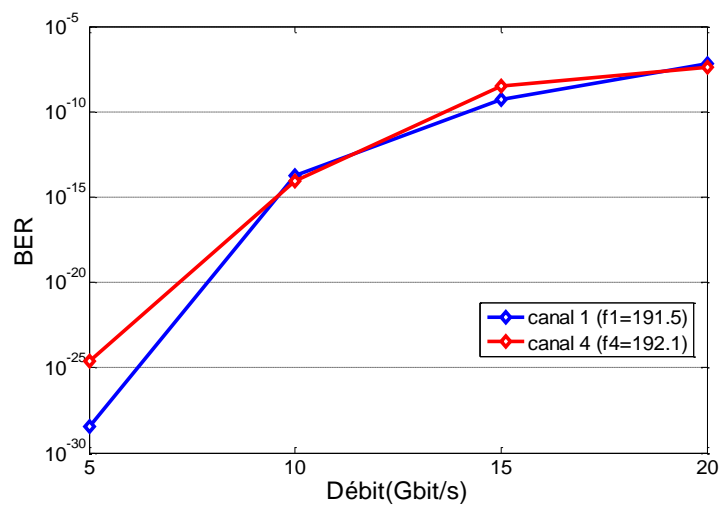


Figure IV.14. BER Vs Débit

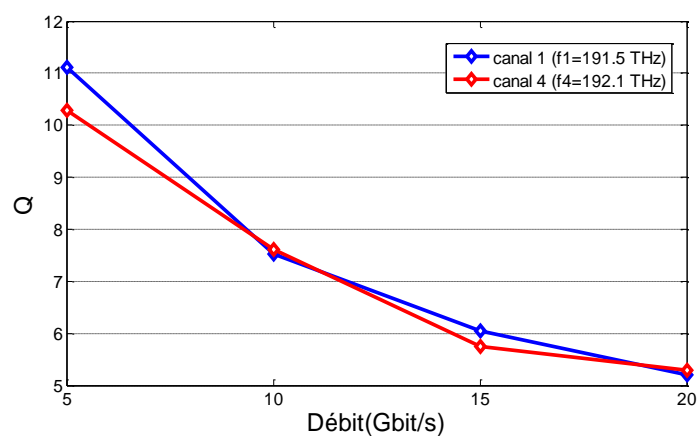
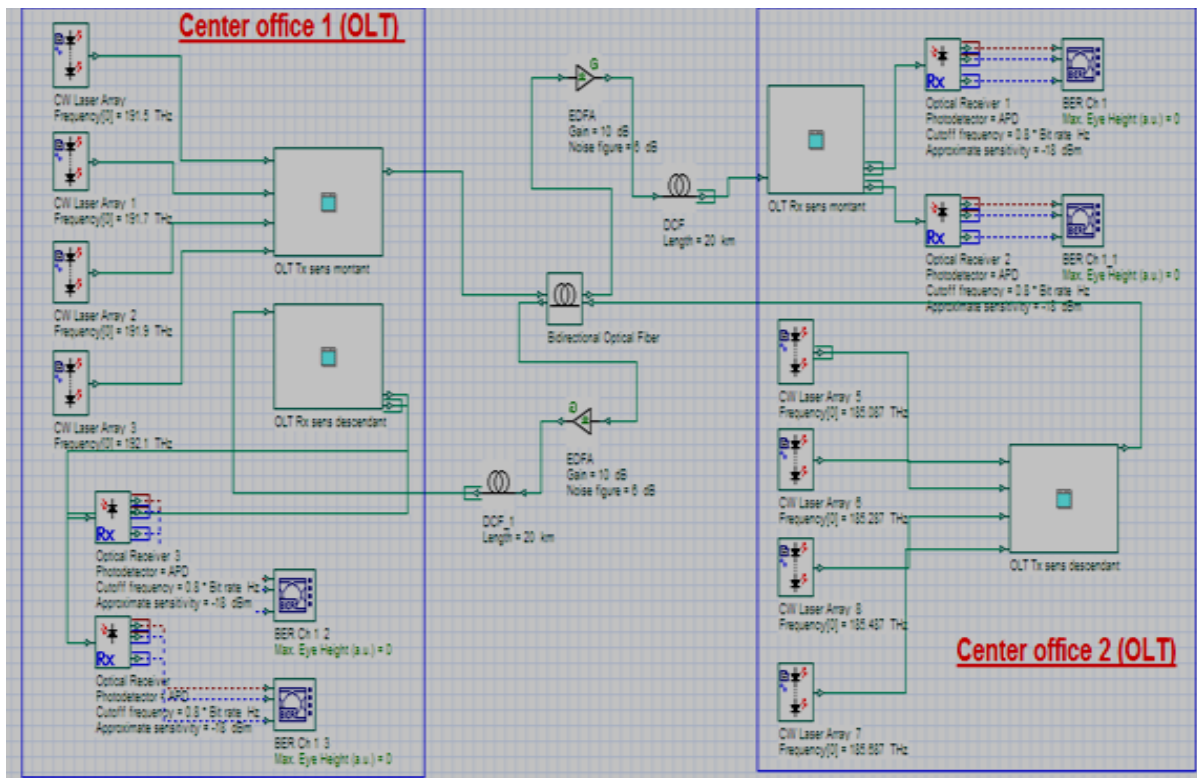


Figure IV.15. Q Vs Débit

### IV.4.3 Le troisième scénario : Application d'un système 4 canaux WDM-PON P2P bidirectionnel



**Figure IV.16.** Liaison bidirectionnelle WDM-PON P2P à 4 canaux

Le schéma de la Figure IV.16 présente deux voies de transmissions, les deux bandes spectrales utilisées pour deux directions de transmission sont bien séparées (bande C et bande L), il n'y a pas vraiment d'interaction entre le signal en voie montante et celui en voie descendante. Donc, dans ce scenario, on s'intéresse à étudier les performances d'un système WDM-PON P2P à 4 canaux bidirectionnel.

### Transmission en voie montante

Dans cette section, nous expliquons le fonctionnement de la transmission en voie montante. Les sources multi-longueur d'onde dans la bande C sont situées dans le module central 1 (center office 1 OLT). Elles consistent à distribuer les longueurs d'onde suivantes : ( $f_1=191.5$  THz,  $f_2=191.7$  THz,  $f_3=191.9$  THz,  $f_4=192.1$  THz), ces signaux monochromatiques sont injectés dans des modulateurs externes de type Mach-Zehnder qui généré des signaux NRZ avec des longueurs de séquences 512 bit. Ensuite, les signaux modulés à différentes longueurs d'onde en sortie de chaque modulateur sont multiplexés par un multiplexeur de type WDM à l'OLT Tx (direction montante). Les canaux en voie montante sont transmis sur une fibre bidirectionnelle (une atténuation de 0.2 dB/km et une dispersion chromatique de 16.75 ps/nm/km) suivie par un amplificateur optique de type EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) et une fibre DCF (une atténuation de 0.5 dB/km et une dispersion chromatique de -85 ps/nm/km). Ils sont ensuite démultiplexés, grâce à un démultiplexeur de type WDM à L'OLT Rx direction montante, en différents canaux séparés. Chaque canal est envoyé sur un récepteur situé dans le module central 2 (center office 2 OLT) et

chaque récepteur est composé d'une photodiode APD (sensibilité -18 dBm avec une réponse de 1 A/W) et d'un filtre électrique passe-bas de fréquence de coupure 0.8 fois la fréquence de rythme.

### Transmission en voie descendante

Inversement, pour la transmission en voie descendante, les sources monochromatiques à base de modulateurs externes sont multiplexées par le même type de multiplexeur mais cette fois-ci les longueurs d'onde sont situées dans la bande L. Donc, dans la direction descendante, les signaux injectés dans le même canal sont repérés pour les mono-fréquences suivantes : ( $f_1=185.087$  THz,  $f_2=185.287$  THz,  $f_3=185.487$  THz,  $f_4=185.687$  THz). A l'arrivée de l'OLT Rx direction descendante, ils sont démultiplexés par un démultiplexeur de type WDM en différents canaux séparément. Finalement, les signaux reçus sont captés par des photorécepteurs (ils sont situés dans le module central 1, les mêmes types que se trouvent dans la direction montante).

### Résultats obtenus

#### L'effet de la variation de la longueur de fibre de la liaison

Dans ce cas là, nous avons fixé le débit de transmission de chaque canal à 10 Gbit/s et on a fait varier la longueur de fibre pour voir l'influence de cette dernière sur le BER dans les deux voies montante et descendante

La Figure IV.17 et Figure IV.18 présentent respectivement les variations du BER en fonction de la longueur de fibre pour les deux bandes simulée C et L avec un espacement entre ces canaux de 0.2 THz.

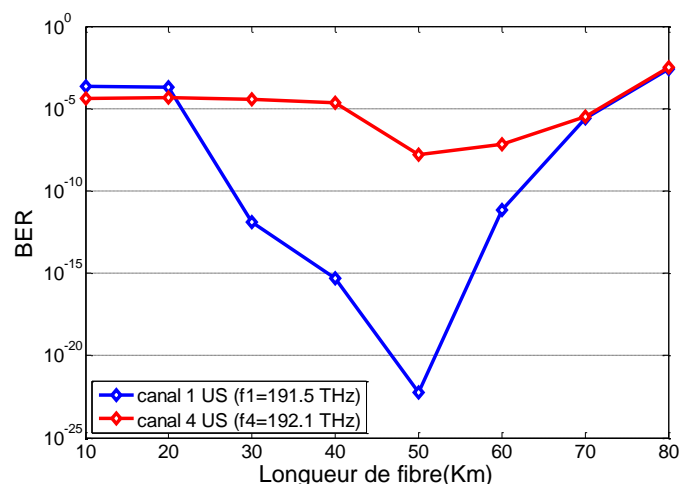
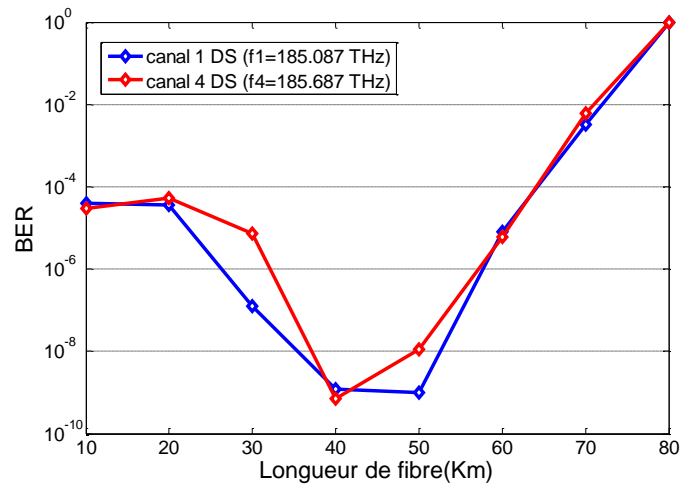


Figure IV.17. BER Vs Longueur de fibre : voie montante



**Figure IV.18.** BER Vs Longueur de fibre : voie descendante

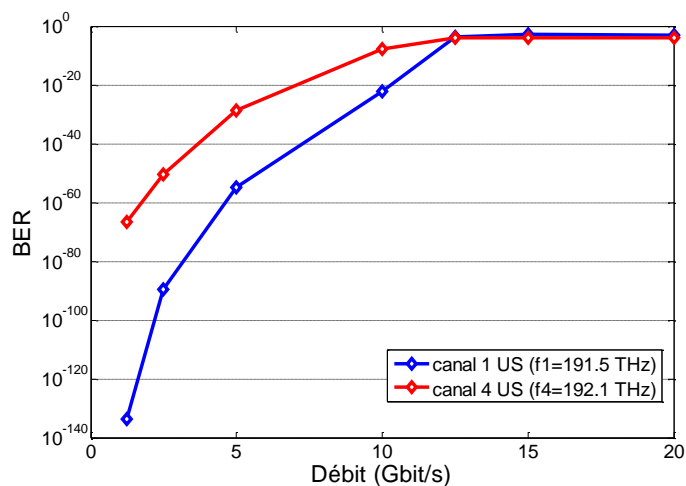
Le premier résultat : nous avons constaté que pour une variation de la longueur de fibre de 10 km jusqu'au 50 km, le BER subit un changement considérable. Dans ce cas, nous avons enregistré que le BER est diminué pour ce tronçon de fibre. Par contre, nous avons noté que la dégradation de performances de cette liaison bidirectionnelle est constatée pour un tronçon de fibre supérieure de 50 km, bien sûr pour les deux voies montante et descendante.

Le deuxième résultat : nous avons remarqué qu'il y a une différence entre la voie montante (bande C) et la voie descendante (bande L) en termes d'inter-canal. Dans le cas de la voie montante, le changement de BER entre le canal 1 US et le canal 4 US est considérable à partir de 20 km jusqu'au 70 km de la longueur de fibre. Par contre, dans la voie descendante, nous avons vu que le changement de BER entre le canal 1 DS et le canal 4 DS est presque nul. Il existe deux valeurs de longueur de fibre qu'on va prendre en considération : la première est de 30 km et la deuxième est de 50 km parce qu'elles présentent une incertitude du BER assez importante par rapports aux autres valeurs de tronçon de fibre.

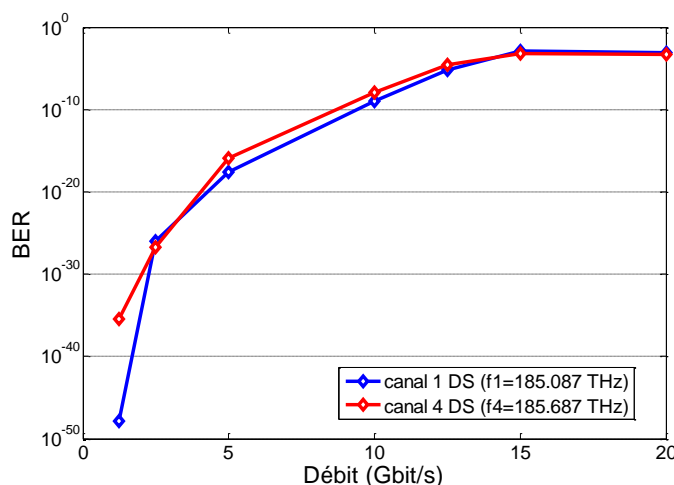
Le troisième résultat : à partir des résultats (1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup>), nous avons noté que notre système proposé donne de meilleure performance dans le cas où la longueur de fibre est égale à 50 km et en plus il est adapté pour la bande L.

#### **L'effet de la variation de débit de transmission**

Dans ce cas, nous avons fixé la longueur de fibre à 50 km et on a fait varier le débit de transmission pour voir l'influence de cette dernière sur le BER dans les deux voies montante et descendante.



**Figure IV.19.** BER Vs Débit : voies montante



**Figure IV.20.** BER Vs Débit : voie descendante

A partir de la Figure IV.19 et la Figure IV.20, nous constatons que l'augmentation de débit a une nette influence sur le BER, le BER subit un changement considérable et nous avons enregistré une augmentation de BER pour les deux voies de transmission (US et DS). En outre, on remarque que l'évolution de BER pour le canal 1 DS et le canal 4 DS est presque le même dans la bande L, par contre dans la bande C nous remarquons qu'il y a une grande variation entre le canal 1US et le canal 4 US.

L'étude des diagrammes de l'œil montre que la qualité de signal reçu à travers l'architecture proposée est acceptable jusqu'à 12,5 Gbit/s. Cependant, à partir de 15 Gbit/s jusqu'à 20 Gbit/s, la qualité de transmission du signal subit une dégradation, donc l'œil est fermé en raison de la dispersion chromatique. On note que le système WDM-PON P2P bidirectionnel proposé est adapté pour des débits allant de 10 Gbit/s à 12,5 Gbit/s.

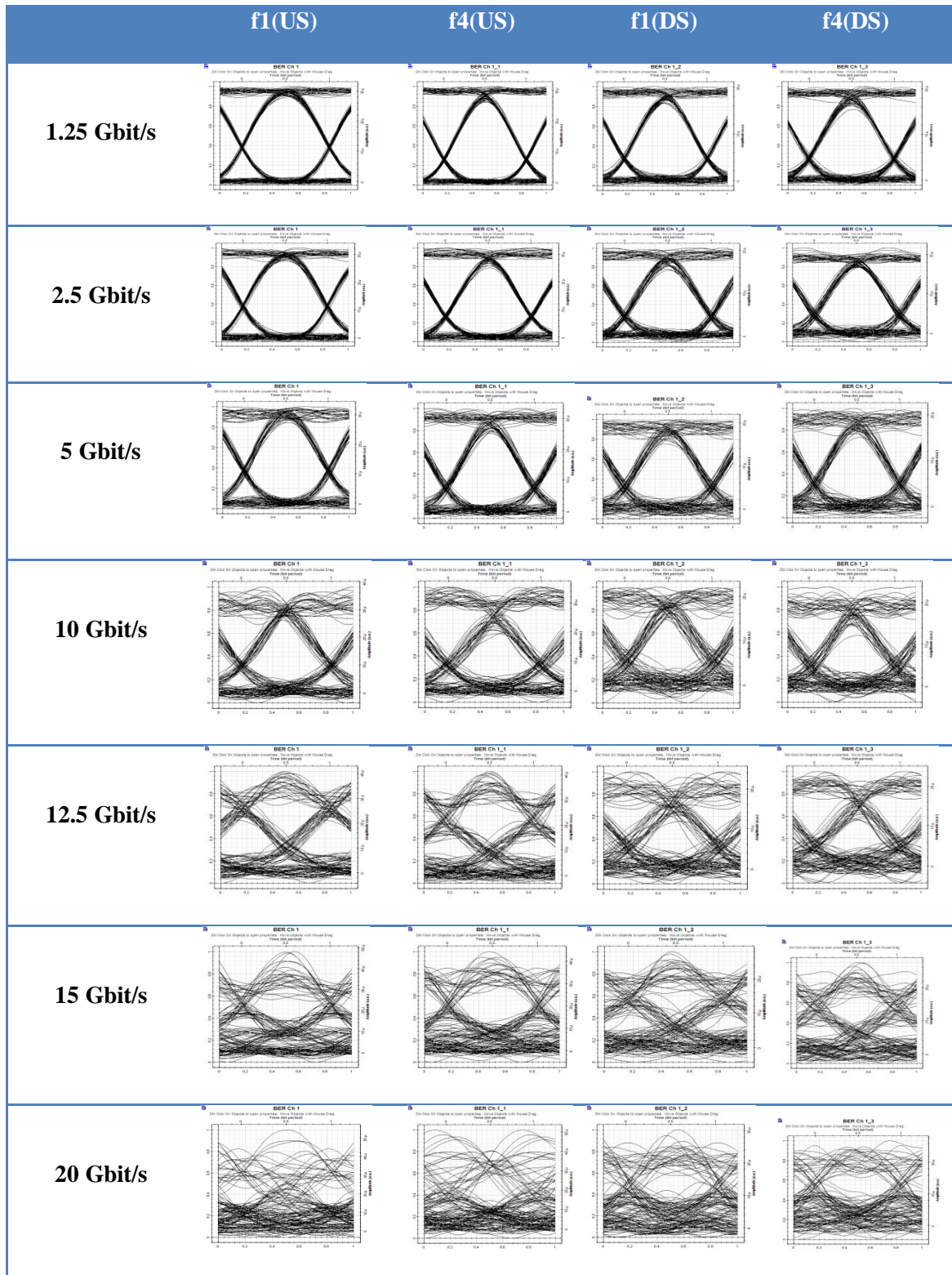


Tableau IV.3. Diagramme de l'œil pour les deux voies (US et DS) pour différents débit

#### **IV.5 Conclusion**

Ce dernier chapitre nous a permis de connaître que la technique WDM est une solution prometteuse pour les réseaux longue distance et le déploiement de cette technique augmente la capacité de transmission. Cette étude a révélé que l'évaluation des performances d'une liaison WDM est jugée par des critères comme le facteur de qualité Q et le taux d'erreur binaire BER qui permet à l'opérateur de suivre la qualité de son réseau et déterminer toute dégradation peut affecter la qualité de service.

Ce sujet a consisté à imaginer, concevoir et valider une étude d'une liaison de transmission optique à très haut débit qui utilise le multiplexage en longueurs d'onde (WDM).

La technique du WDM est la technologie clé pour augmenter la capacité de la transmission optique. Elle a été largement déployée dans les réseaux d'accès optique pour faire face à la demande croissante de transfert de charges dans le trafic Internet. Il existe de nombreuses solutions pour appliquer le concept du WDM au réseau d'accès optique. En ce qui concerne les futurs réseaux d'accès FTTH, le WDM-PON se trouve être la solution la plus réaliste à long terme. Le principe du WDM a été abordé dans le deuxième chapitre. Nous avons vu que cette technique de multiplexage en longueur d'onde permet d'augmenter la bande passante, étant donné que plusieurs longueurs d'onde opèrent sur une même fibre optique.

L'étude de ce projet a comporté quatre chapitres qui nous ont amené aux conclusions suivantes :

Au cours du premier chapitre, nous avons fait une description détaillée sur la fibre optique et leurs types et on a conclu que la fibre optique a supplanté toutes les autres moyennes de transmissions.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit les différents types de réseaux d'accès optique et on a conclu que la technique de multiplexage WDM a remplacé tous les autres techniques de multiplexage en matière de capacité.

Le troisième chapitre a été consacré à la description des composants optiques et l'explication des critères de qualité dans un système WDM.

Le dernier chapitre de ce projet est consacré à la conception et à la simulation des différents systèmes de transmission optique à haut débit, en utilisant le logiciel OptiSystem. Ces simulations nous ont bien montré qu'après la propagation du signal sur une distance donnée, elle subit des dégradations de qualité de transmission dues à l'atténuation et à la dispersion. D'après les différentes simulations, on a constaté que l'augmentation de débit est très vulnérable au phénomène de dispersion chromatique, parce que, plus une impulsion est de courte durée, plus son spectre est large, ce qui provoque un étalement spectral au cours de la transmission. Donc ces impulsions se interfèrent entre eux, comme une solution on a utilisé une fibre compensatrice (DCF) avec une configuration post-compensation tout à longue de cette mémoire.

En résumé, pour accroître la capacité de transmission, deux axes d'investigations sont possibles : augmenter le débit par longueur d'onde ou augmenter le nombre de longueurs d'onde (réduit l'espacement entre canaux). En plus, nous avons conclu qu'une liaison WDM-P2P bidirectionnelle est bien adaptée avec une longueur de fibre de 50 Km pour la bande L avec un débit allant de 10 Gbit/s à 12,5 Gbit/s.

Le travail de ce mémoire est montré clairement les potentiels ainsi que les limites de cette technique WDM, les opportunités d'amélioration sont ouvertes pour les futures générations d'accès optiques WDM. On s'intéressera à étudier les composants à haut débit, les récepteurs accordables, les émetteurs accordables à forte puissance d'émission et à faible sensibilité et les systèmes hybrides WDM/TDM pour les réseaux longs distances.

- 
- [1] Danièle Dromard et Dominique Seret, " Architecture des réseaux (les transmissions et les supports) ", 2010. Pearson France, <http://www.pearson.fr/chap01.pdf>.
- [2] B. Cousin et C. Viho, " Introduction aux réseaux informatiques ", 19 janvier 2008. Université Rennes I, [www.irisa.fr/prive/bcousin/Cours/TEL2007-08/01.Intro.2P.pdf](http://www.irisa.fr/prive/bcousin/Cours/TEL2007-08/01.Intro.2P.pdf).
- [3] Experide, " Guide de la fibre optique-2001 ", édition 2008, 32 rue de l'Avenir 69740 Genas - FRANCE, Vol.45. <http://www.experide-consulting.com>.
- [4] Ghomazi mehdi, " optimisation des performances d'une fibre optique dopée à l'erbium ", Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [5] Experide," Tout savoir sur la fibre optique", édition 2010, 32 rue de l'Avenir 69740 Genas - FRANCE, Vol.8. <http://www.experide-consulting.com>.
- [6] Pierre Lecoy," Télécoms sur fibres optiques ", ©LAVOISIER, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, Vol.366, 2008, ISBN 3<sup>e</sup> édition 978-7462-1844-4.
- [7] Quoc Thai Nguyen, " Émetteurs achromatiques pour le réseau d'accès optique haut débit multiplexé en longueurs d'onde ", *Thèse de Doctorat*, Université de Rennes I, Le 21 Janvier 2011.
- [8] Fabia Raharimanitra, " Contribution à l'étude des architectures bases sur le multiplexage en temps et en longueur d'onde dans le réseau d'accès, permettant la migration vers la nouvelle génération de PON (NG-PON) à 10 Gbit/s ", *Thèse de Doctorat*, Université d'européenne de Bretagne (Télécom Bretagne), Le 13 janvier 2012.
- [9] Ronsard Mbumba Mayemba, " Etude sur l'impact de la transmission optique dans un réseau multiservices, cas de RNIS ", *PFE*, Ecole Supérieure des Métiers d'Informatiques et de Commerce "ESMICOM", 2009.
- [10] Franck Lusteau, " Techniques de codage sur fibre optique ou paire torsadée ", *Mémoire de l'examen probatoire en informatique*, Le 13 décembre 1999, <http://deptinfo.cnam.fr/Enseignement/Memoires/LUSTEAU.Franck/Acueil.htm>.
- [11] <http://www.sr-tel.fr/glossaire.html>.
- [12] Bruno Beauquier, " Communication dans les réseaux optique par multiplexage en longueur ", *Thèse de Doctorat*, Université de NICE-SOPHIA ANTIPOLIS, Le 07 Janvier 2000.
- [13] Jean-Pierre Laude, " Le multiplexage de longueurs d'onde ", ©MASSON, Paris,1992, Vol.200, ISBN 2-225-82755-9.
- [14] Vivek Alwayn," Optical Network Design and Implémentation ", ©Cisco, Vol.840, 17 Mars 2004, ISBN 1-58705-105-2.
- [15] Alcatel, " introduction to WDM ", Copyright ©Alcatel University, édition 2003, ISBN 8AS902000667VHZZA ED.02.
- [16] Philippe Surmely," La fibres optiques : Technologies et applications ", ©MASSON, SNEL S.A. Rue Saint-Vincent 12-4020 Liège juin 1995, Vol.223, 1995, ISBN édition 2-225-84822-3.

- [17] Ben G. Streetman et Sanjay Banerjee, " Solid State Electronic Devices ", © Prentice Hall, (5th Ed.), Vol.10-15, 2000, ISBN édition 0-13-025538-6.
- [18] CHERFAOUI Fayçal et ZEMANI Cherh Eddine, " Liaison par fibres optiques à haut débit : Etude une topologie en Anneau Optique", *PFE*, Institut de Telecommunication d'ORAN.
- [19] Frédéric Gerome, " Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM ", *Thèse de Doctorat*, Université de LIMOGES, Le 04 Novembre 2005.
- [20] Zeno Toffano, " Optoélectronique, Composant photoniques et fibres optiques ", ©Ellipses édition marketing S.A, 32 rue Bague 75740 Paris cedex 15, Vol.316, 2001, ISBN 2-7298-0703-9.
- [21] Jean-Pierre Meunier, " Télécoms optiques, composants à fibres, systèmes de transmission ", ©LAVOISIER, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, Vol.239, 2003, ISBN 2-7462-0721-4.
- [22] <http://www.lasercomponents.com/fr/>.
- [23] Karim Ayari, " Implémentation d'un outil de calcul des imperfections de transmission pour les réseaux WDM tout optique ", *PFE*, Ecole Supérieur des Communications de Tunis, 2005.
- [24] Sondes KHAMIR, " Génération d'impulsion optiques brèves 40 GHz par mélange a quatre ondes ", *PFE*, Ecole Supérieur des Communications de Tunis, 2005.