



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE  
(GEE)



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de  
MASTER en Télécommunication



Option : Réseaux et Systèmes de Télécommunication (RST)

Présenté par

Mlle : FEROUÏ Sarah

THEME

*Etude D'un Réseau B-PON  
Bidirectionnel*

Soutenu en juin 2013 devant un jury composé de

Mme F.Z BENMANSOUR	Présidente	M. C. à l'université de Tlemcen
Mr S.M. BAHRI	Examineur	M. C. à l'université de Tlemcen
Mr S.A. DJENNAS	Examineur	M. C. à l'université de Tlemcen
Mr A.R. BORSALI	Encadreur	M. C. à l'université de Tlemcen



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## REMERCIEMENT

Je tiens particulièrement à remercier le tout Miséricordieux, le tout puissant, ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction

Je dresse mes remerciements à mon encadreur Monsieur BORSALI Riad maitre de conférence à l'université de Tlemcen, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectives.

Je remercie les membres du jury, Mme BENMANSOUR maitre de conférence à l'université Tlemcen d'avoir l'amabilité de présider le jury, Mr S.M BAHRI et Mr S.A DJENNAS maitres de conférences à l'université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je profite de cette opportunité pour exprimer ma gratitude à tous mes enseignants qui ont contribué par leur collaboration, disponibilité et sympathie, à ma formation.

Enfin, je tiens à remercier toute personne qui m'a aidée de près ou de loin durant mon travail et en particulier tous mes amis de la promotion RST.

FEROUI Sarah





## *DEDICACES*



### *A mes très chers parents*

*Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour  
et de l'affection dont ils ne cessent de me combler.*

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

### *A mes chères sœurs*

Samia et Nadia

### *A tous mes amis*

Surtout CHIALI Imene, a tous ceux que j'aime et qui  
m'aiment.

# SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre 1 : Etude d'une liaison par fibre optique</b>	
1.1 Introduction.....	4
1.2 Description d'un système de transmission optique .....	5
1.3 Etude d'une fibre optique .....	6
1.3.1 Définition de la fibre optique .....	6
1.3.2 Les types de fibre optique .....	7
1.3.2.1 La fibre optique multimode MMF .....	7
1.3.2.2 La fibre monomode SMF .....	8
1.3.3 Principe de la fibre optique.....	10
1.3.4 Caractéristiques d'une fibre optique .....	11
1.3.4.1 L'atténuation .....	11
1.3.4.2 La dispersion .....	12
1.3.4.3 Les effets non linéaires .....	13
1.3.5 Les avantages et les inconvénients de la fibre optique .....	14
2 Notions sur les jonctions P-N et les semi-conducteurs .....	14
1.4.1 Les semi-conducteurs .....	15
1.4.2 Le dopage .....	15
1.4.3 La jonction P-N.....	15
2.1 L'émetteur optique .....	16
1.5.1 La diode LASER.....	16
1.5.2 La diode DEL.....	17
1.6 Un récepteur optique .....	18
1.6.1 La photodiode PIN .....	18
1.6.2 La photodiode a avalanche .....	19
1.7 La modulation .....	20
1.7.1 La modulation directe .....	20
1.7.2 La modulation externe.....	20
1.8 Amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) .....	21
1.9 Compensation de la dispersion chromatique DCF .....	22
1.10 Conclusion.....	22
<b>Chapitre 2 : Réseaux sur fibre optique</b>	
2.1 Introduction.....	24
2.2 Historique.....	25
2.3 Les différentes architectures FTTx.....	25
2.3.1 FTTH (Fiber To The Home).....	26
2.3.2 Etat du déploiement mondial.....	29
2.4 Les réseaux optiques passifs (PON).....	29
2.4.1 Qu'est-ce qu'un réseau optique passif (PON).....	29

# Sommaire

---

2.4.2 Architecture d'un réseau optique passif (PON).....	30
2.4.2.1 Architecture PON unidirectionnelle .....	32
2.4.2.2 Architecture PON bidirectionnelle.....	33
2.4.2.3 PON avec multiplexage en longueur d'onde (WDM).....	34
2.4.3 Le fonctionnement d'un réseau optique passif.....	36
2.5 Etude des éléments d'un réseau passif.....	37
2.5.1 OLT (Optical Line Terminal).....	37
2.5.2 ONT (Optical Network Terminaison).....	37
2.5.3 Coupleur optique (Splitter).....	37
2.6 Les débits offerts par le réseau optique passif (PON).....	38
2.7 La sécurité et la fiabilité d'un réseau passif.....	38
2.7.1 La fiabilité du PON.....	39
2.7.2 La sécurité du PON.....	39
2.8 L'économie d'investissement et d'exploitation des réseaux PON.....	39
2.9 Les avantages et les inconvénients d'un réseau optique passif (PON).....	40
2.10	
Conclusion.....	40
<b>Chapitre 3 : Etude de la liaison B-PON bidirectionnelle</b>	
3.1 Introduction.....	42
3.2 Présentation du logiciel OPTISYSTEM.....	42
3.2.1 Description du logiciel OPTISYSTEM.....	43
3.3 Etude de la liaison B-PON.....	44
3.3.1 Description de l'OLT.....	45
3.3.2 Canal de transmission.....	47
3.3.3 Description de l'ONT.....	47
3.4 Qualité de transmission d'une liaison optique.....	48
3.4.1 Le facteur de qualité.....	48
3.4.2 Le taux d'erreur binaire.....	49
3.4.3 Le diagramme de l'œil.....	49
3.5 Résultats de simulation.....	50
3.5.1 Effet de l'EDFA.....	50
3.5.2 Effet de variation du débit et du nombre d'utilisateurs.....	51
3.5.3 Codage RZ / Codage NRZ.....	57
3.5.4 Effet de variation de puissance par utilisateurs.....	61
3.5.5 Architecture point à point.....	62
3.5.6 Comparaison entre l'architecture PON et l'architecture Point à Point.....	65
3.6 Conclusion.....	66
Conclusion Générale.....	68

# LISTES DES FIGURES

## Chapitre 1

Figure 1.1 : Système de transmission optique.....	5
Figure 1.2 : Structure de la fibre optique.....	6
Figure 1.3 : Fibre à saut d'indice.....	7
Figure 1.4 : Fibre à gradient d'indice.....	8
Figure 1.5 : Fibre monomode.....	8
Figure 1.6 : La fenêtre de transmission.....	10
Figure 1.7 : Effet de l'atténuation.....	11
Figure 1.8 : Effet de la dispersion.....	12
Figure 1.9 : La dispersion intermodale.....	12
Figure 1.10 : Types de polarisation.....	16
Figure 1.11 : Symbole d'une source optique.....	16
Figure 1.12 : Diode Laser.....	17
Figure 1.13 : Diode DEL.....	17
Figure 1.14 : Symbole d'une photo détectrice.....	18
Figure 1.15 : Photodiode PIN.....	18
Figure 1.16 : Photodiode a avalanche.....	19
Figure 1.17 : Modulation directe.....	20
Figure 1.18 : Modulation externe.....	20
Figure 1.19 : Schéma d'un amplificateur dopé à l'erbium.....	21

## Chapitre 2

Figure 2.1 : Architecture point à point.....	26
Figure 2.2 : Architecture point à multipoint.....	27
Figure 2.3 : Architecture d'un réseau optique passif (PON).....	30
Figure 2.4 : Architecture du sens montant.....	31
Figure 2.5 : Architecture du sens descendant.....	32
Figure 2.6 : Architecture PON unidirectionnelle.....	33

Figure 2.7 : Architecture PON bidirectionnelle.....	33
Figure 2.8 : Le multiplexage en longueur d’onde WDM.....	34
Figure 2.9: Architecture PON WDM broadcast and select.....	35
Figure 2.10: Architecture PON WDM avec aiguillage des longueurs d’ondes.....	36
<b>Chapitre 3</b>	
Figure 3.1 : les sous fenêtres d’OPTISYSTEM.....	43
Figure 3.2 : les paramètres de la fibre bidirectionnelle utilisée.....	44
Figure 3.3 : Liaison B-PON bidirectionnelle.....	44
Figure 3.4 : Réponses fréquentielles de différents filtres.....	45
Figure 3.5 : Format NRZ.....	46
Figure 3.6 : Présentation de l’OLT.....	47
Figure 3.7 : Canal de transmission.....	47
Figure 3.8 : Présentation de l’ONT.....	48
Figure 3.9 : Le diagramme de l’œil.....	49
Figure 3.10 : Qualité de transmission en fonction de la distance sans EDFA.....	50
Figure 3.11 : Qualité de transmission en fonction de la distance avec EDFA.....	51
Figure 3.12 : Comparaison du facteur de qualité en fonction de la distance avec et sans EDFA.....	52
Figure 3.13 : Comparaison du taux d’erreur binaire en fonction de la distance avec et sans EDFA....	52
Figure 3.14 : Effet des débits et distances sur le facteur de qualité.....	53
Figure 3.15 : Effet des débits et distances sur le taux d’erreur binaire.....	54
Figure 3.16 : Effet des débits et distances sur le facteur de qualité.....	55
Figure 3.17 : Effet des débits et distances sur le taux d’erreur binaire.....	55
Figure 3.18 : Effet des débits et distances sur le facteur de qualité.....	56
Figure 3.19 : Effet des débits et distances sur le taux d’erreur binaire.....	56
Figure 3.20 : Format RZ.....	57
Figure 3.21 : Facteur de qualité en fonction de la distance pour le codage RZ et NRZ.....	58

## Liste des figures

---

Figure 3.22 : Taux d'erreur binaire en fonction de la distance pour le codage RZ et NRZ.....	58
Figure 3.23 : Qualité de transmission en fonction de la distance pour le codage RZ et NRZ.....	59
Figure 2.24 : Taux d'erreur binaire en fonction de la distance pour le codage RZ et NRZ.....	59
Figure 3.25 : Facteur de qualité en fonction de la distance pour le codage RZ et NRZ.....	60
Figure 3.26 : Taux d'erreur binaire en fonction de la distance pour le codage RZ et NRZ.....	60
Figure 3.27 : Facteur de qualité en fonction de la distance pour différents nombres d'utilisateurs.....	61
Figure 3.28 : Taux d'erreur binaire en fonction de la distance pour différents nombres d'utilisateurs.....	62
Figure 3.29 : Architecture point à point.....	62
Figure 3.30 : La structure point à point dans OPTISYSTEM.....	63
Figure 3.31 : Facteur de qualité en fonction du débit pour différentes distances.....	63
Figure 3.32 : Taux d'erreur binaire en fonction du débit pour différentes distances.....	64
Figure 3.33 : Qualité de transmission en fonction de la distance pour 1 Gbit/s.....	64
Figure 3.34 : Qualité de transmission en fonction de la distance pour 10 Gbit/s.....	65
Figure 3.35 : Comparaison de facteur de qualité en fonction du débit pour 100 km entre les deux types d'architectures.....	65
Figure 3.36 : Comparaison du taux d'erreur binaire en fonction du débit pour 100 km entre les deux types d'architectures.....	66



## ***GLOSSAIRE***

### **A**

APON: ATM PON Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network.

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line.

### **B**

BPON: Broadband Passive Optical Network.

### **D**

DCF: Dispersion Compensation Fiber.

DSL: Digital Subscriber Line.

DEL: Light-Emitting Diode.

### **E**

EDFA: Erbium Doped Fiber.

EPON: Ethernet Passive Optical Network.

### **F**

FTTX: Fiber To The .....

FTTH: Fiber To The Home.

FTTB: Fiber To The Building.

FTTN: Fiber To The Neighborhood.

FTTC: Fiber To The Curb.

FTTCab: Fiber To The Cabinet.

FTTP: Fiber To The Premises.

### **G**

GPON: Gigabit Capable Passive Optical Network.

### **H**

HFC: Hybrid Fiber Coax.

### **L**

LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

### **M**

MMF: Multi Mode Fiber.

# Glossaire

---

## **N**

NRO: Nœud de Raccordement Optique.

NRZ: No Return To Zero.

## **O**

ONT: Optical Network Terminaison.

OLT: Optical Line Terminal.

## **P**

PON: Passive Optical Network.

PIN: Positive Intrinsic Negative photodiode.

## **R**

RZ: Return To Zero.

## **S**

SMF : Singal Mode Fiber.

## **T**

TDM : Time Division Multiplexing.

TEB: Taux D'erreur Binaire.

## **U**

UIT: Union International de Télécommunication.

## **V**

VLAN: Virtual Local Area Network.

## **W**

WDM: Wavelength Division Multiplexing.

WDM PON: Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network.

---

# Introduction générale

---

# *INTRODUCTION GENERALE*

Depuis le début du vingtième siècle, les moyens de communications évoluent, se diversifient et leur importance ne cesse d'augmenter. En effet, il n'y a pas si longtemps, lorsque les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à un débit de 270 Mbits/s, le câble coaxial était parfait pour remplir son rôle de support de transmission. Mais la nature de l'information à transmettre a subi une grande transformation, on est passée d'une information de type vocale (téléphone) à une information principalement dominé par les données (informatiques ou textes).

Ainsi, avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, et il fallait trouver un autre type de support de transmission qui remplace le câble coaxial car celui-ci présente des limites néanmoins négligeables. La fibre optique remplit très bien ce rôle de support de transmission. Son utilisation est désormais courante dans les réseaux de télécommunications. La fibre optique s'est dans une première phase (1984 à 2000), limitée à l'interconnexion des centraux téléphoniques, ces derniers nécessitent de forts débits. Le choix technologiques retenus pour augmenter les capacités des réseaux favorisent le déploiement de la fibre optique et une exploitation beaucoup plus rapide des avancées scientifiques.

Pour faire face à cette demande de débits, les équipementiers se sont lancés dans une course au développement de nouveaux systèmes, leur réel challenge vise à être à même de traiter une quantité d'informations de plus en plus importantes et variées. Le développement de nouveaux services de télécommunications implique une forte croissance du besoin en bande passante offerte aux utilisateurs. De ce fait, l'optique a fait son entrée dans les foyers depuis quelques années, à travers les liaisons très haut débit FTTH (Fiber To The Home).

Plusieurs techniques se distinguent pour amener la fibre jusqu'à l'abonné et nous allons nous attacher particulièrement à la solution PON (Passive Optical Network). Ce type de réseau décrit une architecture point-a-multipoint, basée sur un multiplexage temporel de la transmission des données de chaque utilisateur. Le PON s'illustre alors sur une portée de 20km et permet de desservir jusqu'à 64 clients (ONT : Optical Network Terminaison) à partir d'un seul point d'agrégation au central (OLT : Optical Line Terminal). Ce type de réseau transporte des flux de données un débit qui peut atteindre 2.5Gbit/s (dans le sens montant) et 1.25Gbit/s (dans le sens descendant), ce qui permet d'offrir une bande passante atteignant 100Mbit/s chez l'abonné.

Notre objectif à travers ce projet est d'étudier le réseau optique passif et plus particulièrement la liaison B-PON bidirectionnelle. Notre travail est organisé en trois chapitres, dans le premier chapitre on va faire une étude générale d'une liaison par fibre optique, nous allons faire description d'un système de transmission optique, en premier lieu on va donner un historique de la fibre optique, une, ensuite nous allons définir le principe, la composition, les différents types ainsi que les caractéristique, les avantages et inconvénients de la fibre optique.

On parlera aussi des composant de la partie d'émission de la liaison optique, à savoir les sources optiques, comme les diodes DEL et les diodes LASER, ainsi que les composants de la partie de réception tel que les récepteurs optiques PIN. Nous allons aussi définir les éléments complémentaires d'une liaison optique comme l'amplificateur dopée à l'erbium (EDFA), ainsi que les types de modulation.

Le deuxième chapitre sera consacré aux réseaux optiques, nous allons commencer par un historique, les différentes architectures FTTx qui existent, leurs définition, ainsi que le fonctionnement d'un réseau optique passif (PON), avec l'étude des éléments d'un de ce dernier, à savoir l'OLT, L'ONT, et le coupleur. Ensuite nous allons présenter les différentes catégories du réseau PON tel que l'APON, le BPON, le EPON, et le GPON, ainsi que l débits qu'elles peuvent atteindre , En dernier nous allons citer les débits offerts par les réseaux PON, ainsi que la sécurité, la fiabilité, et les applications de tel réseau.

Enfin le troisième et dernier chapitre, où nous allons commencer par une présentation du logiciel utilisé qui est «OPTISYSTEM». Ensuite on va présenter les différents composants de la liaison (B-PON bidirectionnelle) et leurs caractéristiques. Ensuite on va aborder la partie application, qui va nous permettre de déterminer la meilleure configuration possible en terme de débit, de longueur de la fibre optique, du nombre d'utilisateurs et de puissance émise. En dernier lieu on va faire une étude comparative entre l'architecture point à point et l'architecture PON, et voir laquelle des deux architectures donne un meilleur résultat en termes de qualité de transmission.

# Chapitre 1

---

## Etude d'une liaison par fibre optique

---

## 1.1 Introduction

La possibilité de transporter de la lumière le long de fines fibres de verre fut exploitée au cours de la première moitié du XXe siècle. En 1930, HEINRICH LAMM réussit à transmettre l'image d'un filament de lampe grâce à un assemblage rudimentaire de fibres de quartz.

La première application de la fibre optique eut lieu au début des années 1950, lorsque le fibroscope flexible a été inventé par VAN HEEL et HOPKINS. Cet appareil permettait la transmission d'une image le long de fibres en verre. Il fut particulièrement utilisé en endoscopie, pour observer l'intérieur du corps humain, et pour inspecter des soudures dans des réacteurs d'avion. Malheureusement, la transmission ne pouvait pas être faite sur une grande distance étant donnée la piètre qualité des fibres utilisées.

Les télécommunications par fibre optique étaient impossible jusqu'à l'invention du laser en 1960. Le laser permet de transporter un signal sur une grande distance avec un minimum de pertes [2].

En 1966 CHARLE KAO démontra expérimentalement qu'il était possible de transporter de l'information sur une grande distance sous forme de lumière avec la fibre optique. Les pertes dans cette fibre optique étaient telle que le signal disparaissait au bout de quelques centimètres par la réflexion du signal contre les parois, cela rendait la fibre optique peu avantageuse par rapport au fil du cuivre traditionnel.

Les recherches ont beaucoup évoluées car en 1970, trois scientifiques de la compagnie Corning Glass Works de New York, ROBERT MAURER, PETER SCHULTZ et DONALD KECK, produisirent la première fibre optique avec des pertes de phase suffisamment faibles pour être utilisée dans les réseaux de télécommunications (20 décibels par kilomètre). Leur fibre optique était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'information qu'un simple câble de cuivre.

On estime qu'aujourd'hui plus de 80 % des communications à longue distance sont transportées le long de plus de 25 millions de kilomètres de câbles à fibres optiques partout dans le monde. La fibre optique était limitée à l'interconnexion des centraux téléphoniques (entre 1984-2000). La baisse des coûts a entraîné sa fabrication en masse et les besoins croissants des abonnés avec un très haut débit, il est envisagé depuis 1994 et 2005 son arrivée chez les particuliers : FTTH (pour Fiber To The Home), FTTB (pour Fiber To The Building), FTTC (pour Fiber To The Curb) [2].

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord aborder l'évolution de la transmission et des différents éléments d'une liaison par fibre optique. Dans un premier lieu nous allons décrire un système de transmission optique, la composition de la fibre optique, le principe de fonctionnement, les différents types et caractéristiques ainsi que ses avantages et inconvénients.

Ensuite on va présenter l'interface d'émission de la transmission optique, les sources de transmission les plus utilisés dans une liaison optique sont les diodes LASER et les diodes DEL, l'amplificateur dopé à l'erbium (EDFA) et son utilité dans un tel système, l'interface de réception qui est la photodiode avec ses deux types PIN et AVALANCHE.

## 1.2 Description d'un système de transmission optique

L'utilisation d'une fibre optique permet de transporter un signal sur de grandes distances avec une très bonne immunité aux parasites. Le signal optique qui y transite est insensible aux perturbations électromagnétiques. Sur une fibre optique, le signal n'est jamais transmis de manière analogique. Il circule sous la forme d'impulsions lumineuses, avec un débit qui peut être très élevé (plusieurs dizaines de Gbits/s) [3].

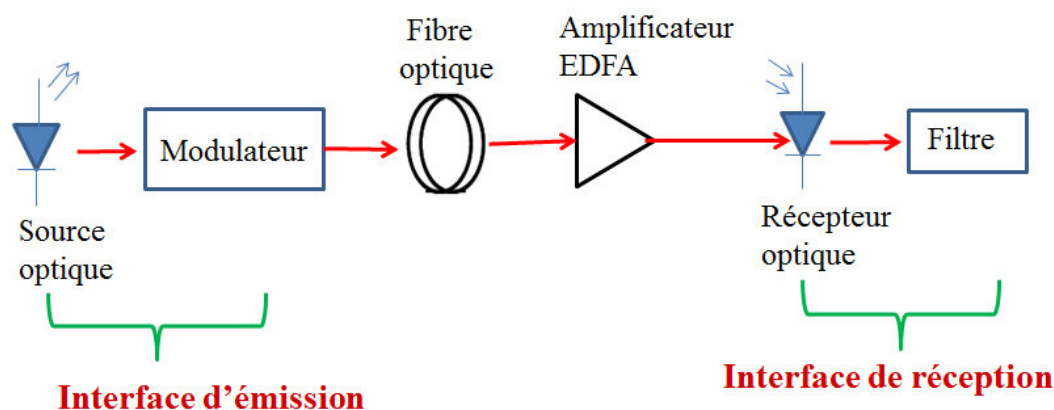


Figure 1.1 : Système de transmission optique

L'information sera codée convertie en signal lumineux, puis modulée avec une source optique cohérente monochromatique (diode laser) ou une diode électroluminescente (DEL). L'interface d'émission contient un modulateur qui a pour rôle d'adapter le signal lumineux au support de transmission qui est dans notre cas la fibre optique.

D'après la figure 1.1 le canal de transmission est une fibre optique. Suit d'un amplificateur EDFA (EDFA pour Erbium Doped Fibre Amplifier) qui permet d'amplifier un signal lumineux sans le convertir en un signal électrique.

L'interface optique de réception contient une photodiode qui convertit le signal optique reçu en signal électrique [3]. Enfin l'information pourra être récupérée après conversion optoélectronique (photodiode), remis en forme, démodulée (filtre passe-bas) ou ramenée en bande de base, resynchronisée, puis décodée et corrigée (le taux d'erreur binaire accepté dans les systèmes actuels est un  $TEB < 10^{-12}$  norme de l'UIT (UIT pour Union International des Télécommunication)).



Lorsque la longueur de la liaison le nécessite on insère des répéteurs car le signal optique aura besoin d'être régénéré (R), remis en forme (2R) et resynchronisé (3R). Plutôt que de ramener le signal sous forme électrique pour l'amplifier, on utilise de plus en plus l'amplification optique dans des fibres dopées Erbium, pompées par laser.

### 1.3. Etude d'une fibre optique

La fibre optique est un fil transparent très fin, qui peut être utilisé pour conduire de la lumière entre deux lieux distants. Le signal lumineux transmis est codé par une variation d'intensité, il est capable de transmettre une grande quantité d'information.

#### 1.3.1 Définition de la fibre optique

La fibre optique est un support de transmission qui possède la propriété de faire circuler une intensité de lumière entre deux points distants (quelques kilomètres).

La fibre optique est constituée d'un cœur de silice de haut d'indice de réfraction et une gaine avec un indice de réfraction plus faible que celui du cœur, le tout enveloppé d'un revêtement protecteur (une gaine en plastique).[4]

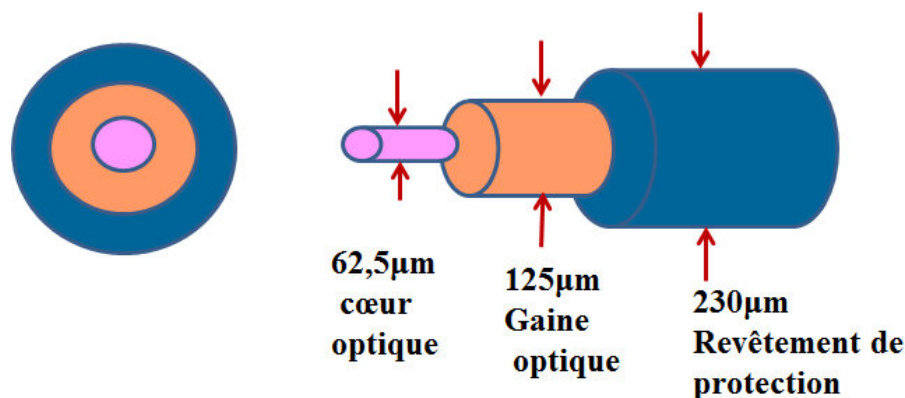


Figure 1.2 : Structure de la fibre optique

#### a. Le cœur

Le cœur permet de transporter un signal optique, il est caractérisé par un indice de réfraction noté  $n_1$ .

#### b. La gaine

La gaine permet d'éviter que le signal optique sorte du cœur (elle se comporte comme un miroir), elle est caractérisée par indice de réfraction  $n_2$ . Il faut que  $n_1$  soit supérieur  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ) pour que la fonction de miroir soit valable.

### c. Le revêtement de plastique

C'est une couche protectrice qui permet de couvrir la fibre optique contre les parasites elle est de l'ordre de  $230\ \mu\text{m}$ .

## 1.3.2 Les types de fibre optique

On peut classer les fibres optiques en deux catégories selon leurs diamètres et la propagation de la longueur d'onde.

### 1.3.2.1 La fibre optique multimode MMF

La fibre optique multimode notée MMF (Multi Mode Fiber), elle a été la première utilisée, elle permet de transporter plusieurs rayons lumineux simultanément, pour cela il faut avoir un diamètre du cœur important (environ  $50\ \mu\text{m}$ ) [5]. Il existe deux types de fibre multimode :

#### a. Fibre à saut d'indice

La propagation des trajets lumineux se fait par différents chemins avec la même vitesse comme le montre la figure 1.3, ces rayons arrivent au récepteur avec des retards différentiels, mais ils deviennent importants pour des grandes distances qui engendrent une dispersion de l'énergie du signal [5].

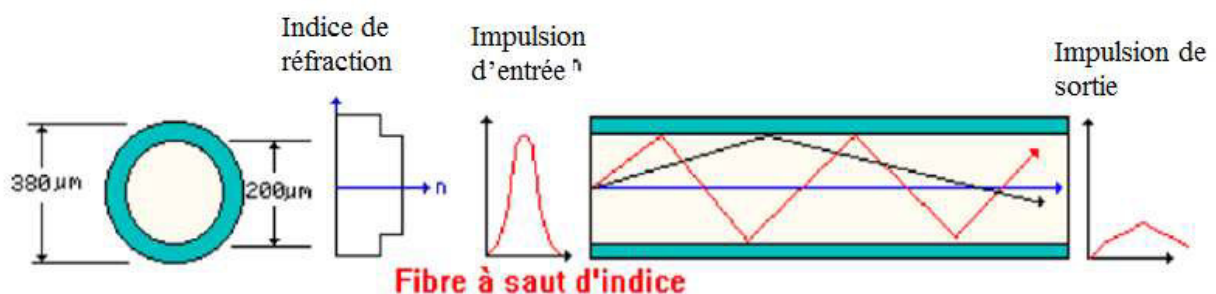


Figure 1.3 : Fibre à saut d'indice

#### b. Fibre à gradient d'indice

Elle est caractérisée par un faible diamètre du cœur, les rayons lumineux à l'intérieur d'une fibre à gradient d'indice suivent un parcours sinusoïdal [11].

La variation de l'indice de réfraction du cœur est très faible autour d'une valeur  $n_1$  égal  $1.48\ \mu\text{m}$ , ce type de fibre permet de minimiser la dispersion modale. La figure 1.4 montre les trajets sinusoïdaux de la fibre à gradient d'indice [5].

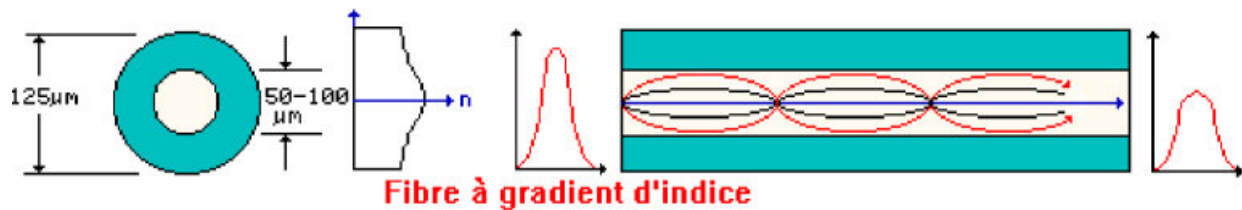


Figure 1.4 : Fibre à gradient d'indice

### 1.3.2.2 La fibre monomode SMF

La fibre monomode notée SMF (Single Mode Fiber) est caractérisée par un diamètre du cœur inférieur à  $10 \mu\text{m}$ . Un seul signal lumineux appelé fondamental se propage à l'intérieur de cette fibre (figure 1.5), elle utilisée pour des services de télécommunication à grande distance.

Elle possède une bande passante très large (infinie en théorie). Dans une fibre monomode la transmission de données se fait à l'aide d'un laser dans la fenêtre  $[1300-1550] \mu\text{m}$ .

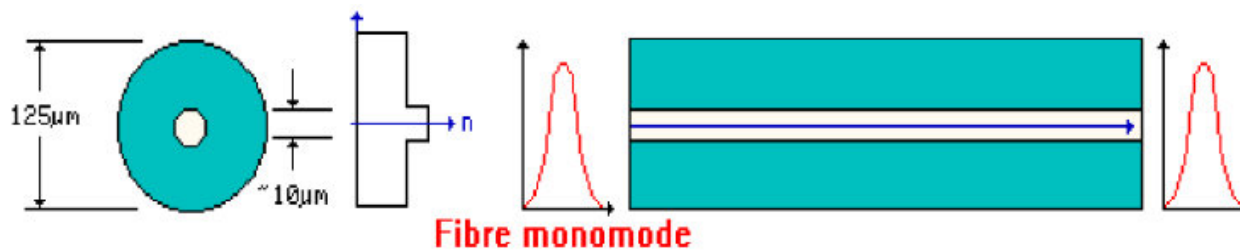


Figure 1.5 : Fibre monomode

#### a. Comparaison entre la fibre monomode et multimode

Le tableau 1.1 est une comparaison entre les différents paramètres des fibres optiques monomode et des fibres optiques multimode comme le diamètre du cœur et de la gaine, ainsi que l'atténuation et la bande passante.

	Fibre monomode	Fibre multimode	
		Fibre à saut d'indice	Fibre à gradient d'indice
<b>Diamètre du cœur (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	5 à 10	50	50
<b>Diamètre de la gaine (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	125	125	125
<b>Atténuation (dB/Km)</b>	0.1 à 0.5	3	1.5 à 3
<b>Bande passante</b>	De l'ordre de THz.Km	< 60 MHz.Km	De l'ordre de GHz.km

Tableau 1.1 : Comparaison entre fibres monomodes et fibres multimodes.

D'après le tableau 1.1 on note que le diamètre du cœur d'une fibre monomode est inférieur à celui de la fibre multimode car il y'a un seul signal qui se propage à l'intérieur de la fibre monomode alors que la fibre multimode contient plusieurs signaux.

On constate aussi que l'atténuation de la fibre monomode est inférieure à celle de la fibre multimode par contre la bande passante d'une fibre monomode est beaucoup plus élevée que celle d'une fibre multimode.

### b. La fenêtre de transmission

La figure 1.6 permet de démontrer que les longueurs d'onde les plus utilisées en télécommunication sont 1300 et 1550 nm, ces fenêtres sont caractérisées par des pertes sont moins importantes par rapport aux autres longueurs d'onde.

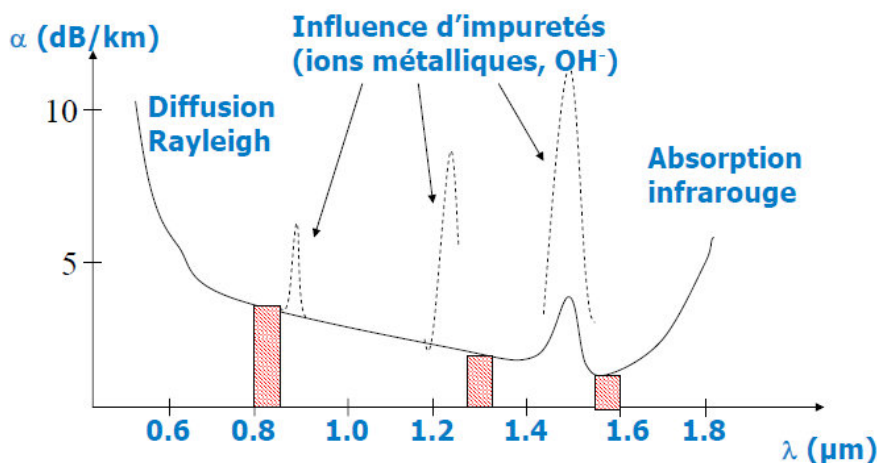


Figure 1.6 : La fenêtre de transmission

La figure 1.6 montre que plusieurs paramètres contribuent à faire perdre de la puissance au signal optique :

- Une diffusion de Rayleigh qui traduit à la fois l'effet des impuretés, des imperfections, des variations d'indice.
- Des effets de vibration de la liaison hydroxyde (OH oxygène hydrogène), que l'on ne peut pas supprimer, et qui présentent un pic de forte atténuation autour de 1400 nm.
- Une influence des ultraviolets et des infrarouges (UV et IR) [6] .

### 1.3.3 Principe de la fibre optique

La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions internes, ce rayon se propage jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique sans pertes en empruntant un parcours en zigzag.

La propagation de la lumière dans la fibre optique peut se faire avec peu de pertes même lorsque la fibre est courbée. La différence d'indice normalisée qui donne une mesure de saut d'indice entre le cœur et la gaine est donnée par [5] :

$$\Delta = (n_c - n_g) / n_c \quad (1.1)$$

Où  $n_c$  est l'indice de réfraction du cœur et  $n_g$  est l'indice de réfraction de la gaine.

L'ouverture numérique d'une fibre optique caractérise le cône d'acceptance de la fibre : si un rayon lumineux tente de pénétrer la fibre en provenant du cône, alors le rayon sera guidé par la réflexion interne.

L'ouverture numérique est utilisée pour que la lumière soit guidée, elle nous renseigne sur la capacité d'une fibre optique pour propager les rayons optiques et elle est mesurée par rapport à l'axe de la fibre optique [7].

$$ON = \sin \theta_{acc} = (n_c^2 - n_g^2)^{1/2} \quad (1.2)$$

Avec  $\theta$  l'angle d'acceptance.

### 1.3.4 Caractéristiques d'une fibre optique

La fibre optique est caractérisée par plusieurs paramètres tel que : l'atténuation, la dispersion et les effets non linéaires, ces effets parasites, dégradent les performances du signal lumineux quand les puissances deviennent élevées.

#### 1.3.4.1 L'atténuation

Un signal optique perd sa puissance lorsqu'il se propage dans une fibre optique c'est le phénomène d'affaiblissement ou l'atténuation comme il est indiqué dans la figure 1.7, l'atténuation est donnée en dB ou dB/Km. Dans une fibre optique l'affaiblissement dépend de la longueur d'onde utilisée et la distance parcourue [12].



Figure 1.7: Effet de l'atténuation

La figure 1.7 montre que pendant la propagation d'un signal lumineux au long d'une distance lui cause une atténuation, l'affaiblissement du signal est moins important dans les systèmes optiques que dans les systèmes électriques et il n'est pas constant avec la fréquence du signal optique à transmettre. L'affaiblissement du signal est engendrée par plusieurs paramètres tel que :

- Une courbure trop prononcée de la fibre optique qui augmente les pertes par réflexion.
- L'affaiblissement par absorption atomique ou électronique, elle est due aux impuretés (région infrarouge).
- L'absorption moléculaire, elle est due aux impuretés du au cœur (région infrarouge).
- La diffusion de Rayleigh, elle est due aux variations d'indice au niveau microscopique [4].

### 1.3.4.2 La dispersion

Le facteur qui limite la transmission des signaux à haut débit sur de longues distances est la dispersion, elle se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation comme le montre la figure 1.8 [3].



Figure 1.8 : Effet de la dispersion

La figure 1.8 permet de démontrer que le signal subit un étalement temporel lors de sa propagation, il y'a deux types de dispersion :

#### a. La dispersion intermodale

Dans les fibres multimodes, le signal transmis est composé de différents modes de propagation. Chaque mode de propagation suit un chemin dans la fibre, et a un temps de propagation différent. Quand on regarde le signal à la sortie, il est composé par les signaux transmis sur les différents modes, la longueur temporelle du signal augmente. La figure 1.9 montre la dispersion intermodale des différents types de fibre optique.

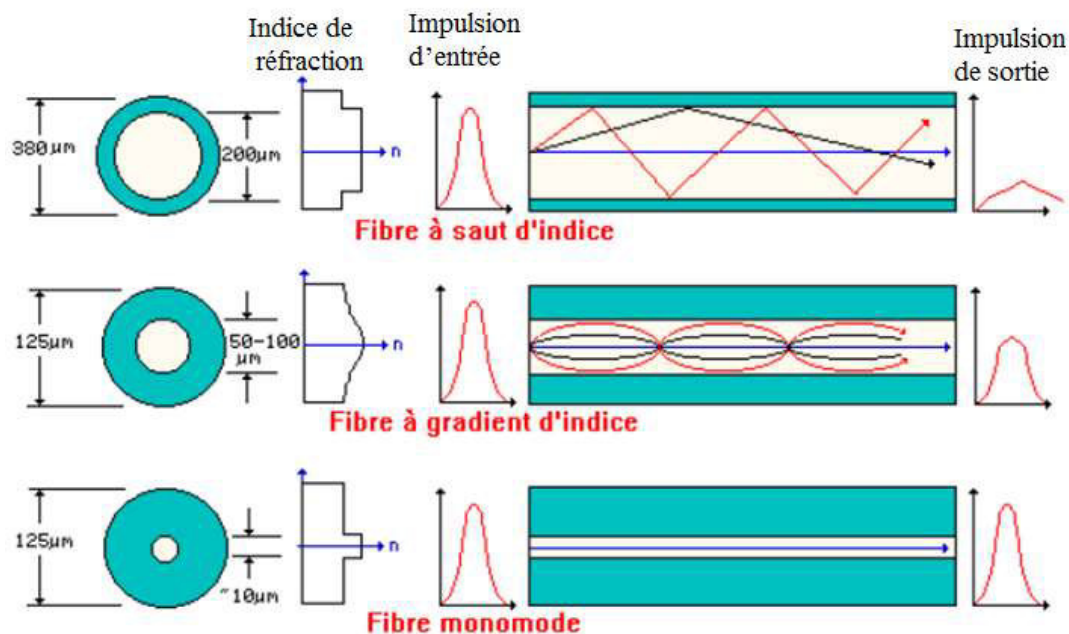


Figure 1.9: La dispersion intermodale

On remarque l'existence de différentes vitesses pour la propagation des ondes (figure 1.9), ce qui conduit à un élargissement temporel qui limite la bande passante.

- La fibre monomode n'a pas d'effet de dispersion intermodale car il y'a un seul mode de propagation.
- La valeur de la dispersion intermodale de La fibre à saut d'indice est : 30ns/km.
- La valeur de la dispersion intermodale de la fibre à gradient d'indice est : 60ps/km [4].

### **b. La dispersion chromatique**

Les sources laser non idéaux n'émettent pas sur une seule longueur d'onde, elles émettent dans plusieurs longueurs d'onde près de la nominale. Il y'a déjà une dispersion initiale sur la fréquence optique. Chaque fréquence optique a une vitesse différente sur la fibre.

Cette variation de la vitesse avec la fréquence va décomposer le signal dans le temps selon la fréquence en augmentant la longueur temporelle de la sortie. Ce type de dispersion apparaît dans les fibres monomodes et multimodes. Elle est de l'ordre de ps/m [4].

#### **1.3.4.3 Les effets non linéaires**

Les effets non linéaires sont la variation de la vitesse de propagation liée à la longueur d'onde d'une part et à l'intensité d'autre part [5]. Ils sont généralement présent dans les fibres monomode et peuvent se traduire par :

- Une atténuation du signal en fonction de l'augmentation de puissance transmise.
- Une création de nouvelles longueurs d'onde.

Les principales causes des effets non linéaires sont :

#### **a. Effet de KERR**

Il est créé dans un matériau à l'aide d'un champ électrique extérieur et il est dû à la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité optique. La conséquence de l'effet Kerr se traduit par un phénomène d'auto modulation de phase. L'impulsion est affectée d'une modulation de phase parasite qui croît avec la distance. La combinaison de la modulation de phase à la dispersion chromatique, conduit à un élargissement temporel des signaux se propageant dans la fibre. [1]

#### **b. Effet de RAMAN**

C'est le phénomène par lequel un milieu peut modifier légèrement la fréquence du signal qui y circule. Ce décalage de fréquence correspond à un échange d'énergie entre le rayon lumineux et les vibrations du matériau.



### 1.3.5 Les avantages et les inconvénients de la fibre optique

Grâce à la fibre optique, la rapidité et la facilité de navigation sur le net sont amplifiées. On voit utilité à travers les téléchargements de fichiers, la qualité d'image, la visualisation de vidéos, la fluidité. Actuellement, elle est très utilisée dans les télécommunications optiques, elle permet d'offrir des débits importants avec une faible dégradation du signal [14].

Les avantages de la fibre optique sont :

- Le faible poids et taille réduite.
- La perte de signal sur une longue distance est très faible.
- Les débits sont très élevés et symétriques, le débit est identique pour le téléchargement des données (download) et pour la transmission (upload).
- La résistance aux conditions environnementales.
- L'entretien de la fibre est moins coûteux que certains autres types de câblages.
- La rentabilité de la fibre est un autre avantage, le réseau fibre optique à un cycle de vie de 20 ans. Le seuil de rentabilité moyen est de 2 à 5 ans.

La fibre optique présente des avantages qui la rendent le support de transmission le plus utilisés dans le domaine des télécommunications [14], mais elle présente certains points négatives:

- La fibre optique ne peut pas être courbée car ses composants sont fragiles. De plus, son cœur, fait de silice, casse facilement du fait de la corrosion créée par l'humidité extérieure. Il faut donc protéger le cœur de la fibre.
- L'atténuation du signal peut être importante sur des longs trajets, des courbures peuvent entraîner des micros coupures. Cela réduit le débit délivré par la fibre.
- La fibre est vendue au kilomètre, il arrive souvent, pendant les travaux, le besoin de souder deux fibres entre elles. Pour cela, il faut une soudeuse à fibre optique, un appareil volumineux et qui demande une forte alimentation en électricité. C'est un appareil nécessaire car si la soudure est mal faite, le risque de perte du signal est de suite amplifié.

### 1.4 Notions sur les jonctions P-N et les semi-conducteurs

A la base des principaux composants électroniques se trouve la jonction P-N. En effet, c'est sur ce principe que fonctionnent notamment les diodes et les transistors.

On appelle jonction P-N la surface de contact entre deux semi-conducteurs dopés différemment, l'un ayant subi un dopage (positif) de type P (avec du bore ou de l'aluminium), l'autre ayant subi un dopage (négatif) de type N (avec du phosphore ou de l'arsenic), l'ensemble constituant une diode, c'est-à-dire un composant qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens [13].

### 1.4.1 Les semi-conducteurs

Du point de vue des propriétés électriques, il existe trois grands types de matériaux : les isolants, les conducteurs et les semi-conducteurs. C'est la structure des bandes électroniques d'un matériau qui est responsable de son appartenance à l'une de ces trois catégories. Pour un conducteur, il y a continuité des bandes de valence et de conduction, sans bande interdite.

A l'inverse, il existe une bande interdite entre les bandes de valence et de conduction pour les isolants et les semi-conducteurs. La différence entre ces deux catégories vient de la taille de cette bande interdite : si la largeur de cette bande est de l'ordre de l'électronvolt ( $<3\text{eV}$ ), le matériau est semi-conducteur ; sinon, il est isolant. Il existe plusieurs semi-conducteurs, dont le silicium (Si) ou l'arséniure de gallium (AsGa) [9].

### 1.4.2 Le dopage

Afin d'obtenir de nouvelles propriétés des semi-conducteurs, on peut leur appliquer un traitement : le dopage. Il s'agit de remplacer certains de leurs atomes par des atomes différents, afin de modifier leur structure de bandes électroniques. Il ne faut toutefois pas que cela modifie leur structure cristallographique. On peut obtenir deux résultats :

- Si on substitue à des atomes de cristal semi-conducteur des donneurs d'électrons (comme l'arsenic dans le cas du silicium), on obtient un dopage de type N. Les porteurs de charges majoritaires sont alors les électrons.
- Si on substitue à des atomes du cristal semi-conducteur des accepteurs d'électrons (comme le gallium dans le cas du silicium), on obtient un dopage de type P. Les porteurs de charges majoritaires sont alors les trous [9].

### 1.4.3 La jonction P-N

Une jonction P-N désigne une zone où le dopage varie brusquement, en passant d'un dopage de type P à un dopage de type N. Lorsque la région dopée P est mise en contact avec la région N, les électrons et les trous diffusent spontanément de la jonction, elle ne laisse pas passer le courant. La jonction P-N est obtenue en juxtaposant un semi-conducteur dopé P et un semi-conducteur dopé N [9]. L'utilisation d'une jonction P-N se fait en lui appliquant une polarisation. Il existe deux possibilités comme le montre la figure 1.10:



Figure 1.10 : Types de polarisation

Dans la polarisation directe les porteurs de charge traversent la jonction et un courant élevé parcourt le circuit en reliant la zone P à la borne positive, et la zone N à la borne négative.

Par contre en polarisation inverse les porteurs de charges s'éloignent en reliant la zone P à la borne négative, et la zone N à la borne positive, la jonction devient quasiment isolante.

## 1.5 L'émetteur optique

L'émetteur optique a pour rôle de transformer le signal électrique en un signal optique, il contient principalement un composant optoélectronique qui peut être une diode électroluminescente DEL, ou une diode LASER, chacune de ces diodes s'adapte au type de multiplexage [4]. La figure 1.11 montre le symbole d'une source optique.



Figure 1.11: Symbole d'une source optique

La figure 1.11 montre une source optique qui est un dipôle unidirectionnel dont les bornes sont l'anode qui est la zone P et la cathode qui est la zone N d'une jonction P-N.

### 1.5.1 La diode LASER

La diode LASER est un composant où la lumière est confinée dans la couche active, elle doit remplir les deux fonctions suivantes : l'amplification et la résonance. La lumière amplifiée provient de l'émission spontanée du laser qui est le retour d'un atome dans son état fondamental après avoir été excité en libérant une quantité d'énergie figure 1.12.

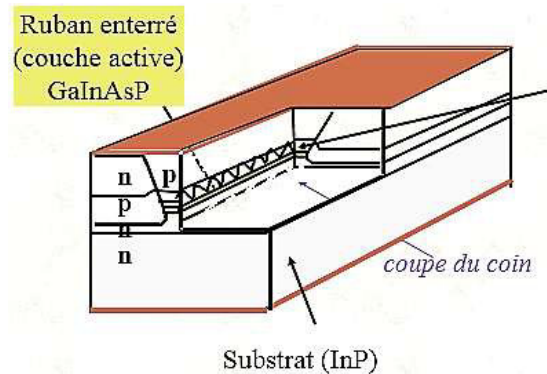


Figure 1.12 : Diode Laser

La diode laser émet une seule longueur d'onde avec une puissance importante, elle permet d'émettre de la lumière cohérente c'est-à-dire que les photons sont envoyés en phase (lumière monochromatique), utilisée pour les fibres monomodes, dont la longueur d'onde est de 1310 ou 1550 nm [5]. La diode laser est plus performante que la diode DEL mais elle nécessite une attention car elle chauffe beaucoup.

### 1.5.2 La diode DEL

La diode électroluminescente DEL est un composant simple qui réalise l'émission d'un photon des porteurs dans une jonction polarisée en directe figure 1.13. Dans une jonction la couche active est très mince (moins d'un micron) est entourée de couches de confinement.

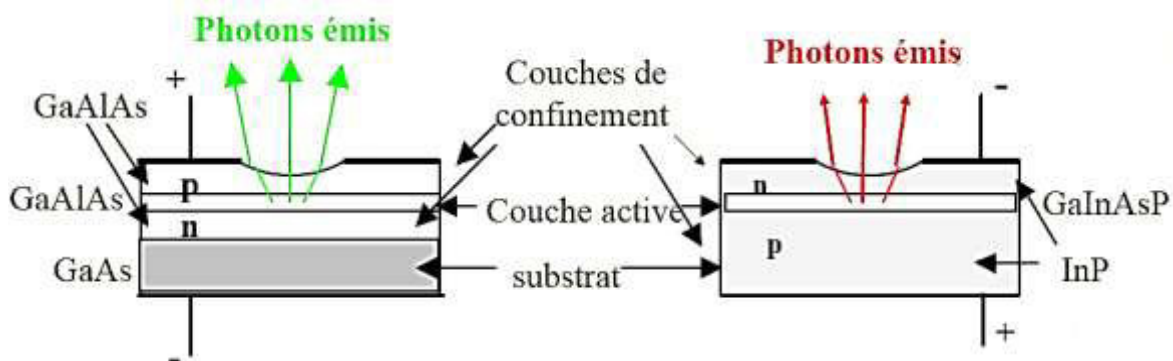


Figure 1.13 : Diode DEL

La diode DEL permet d'émettre un signal sur plusieurs longueurs d'onde à la fois avec une puissance faible, elle émet de la lumière incohérente. Ces paramètres font que la diode DEL est réservée aux fibres multimodes, qui fonctionnent dans le rouge visible 850 nm [5].

La structure d'une diode électroluminescente est simple, il suffit de moduler le courant dans la diode, pour que la puissance optique reproduise le courant électrique avec une linéarité satisfaisante.

Dans les émetteurs analogiques, le courant est amplifié par un transistor afin d'avoir une amplitude suffisante. Dans les émetteurs logiques, la diode fonctionne en tout ou rien, le courant étant commuté par un transistor en commutation.

## 1.6 Un récepteur optique

Dans le récepteur optique l'information est récupérée après la conversion optoélectronique grâce à la photodiode. C'est un composant semi-conducteur qui détecte un rayonnement optique et le transforme en signal électrique. La figure 1.14 montre le symbole d'un photodétecteur.



Figure 1.14: Symbole d'une photo détectrice.

La photodiode est constituée comme les diodes électroniques d'une jonction P-N (anode et cathode) comme on voit dans la figure la figure 1.14, cette jonction P-N est la configuration de base pour construire une photodiode PIN.

### 1.6.1 La photodiode PIN

La photodiode PIN permet de convertir un signal lumineux en un signal électrique avec un minimum de dégradation. Les diodes PIN sont les détecteurs les plus utilisés avec les fibres optiques, il s'agit de semi-conducteurs intrinsèques (i.e. non dopé).

La concentration de charges libres dans le semi-conducteur intrinsèque est très faible, ce qui lui procure une résistivité élevée. Le champ électrique sera donc élevée dans cette région de résistivité, et faible dans les parties n et p, de résistivité plus faible. La figure 1.15 montre le fonctionnement d'une photodiode PIN.

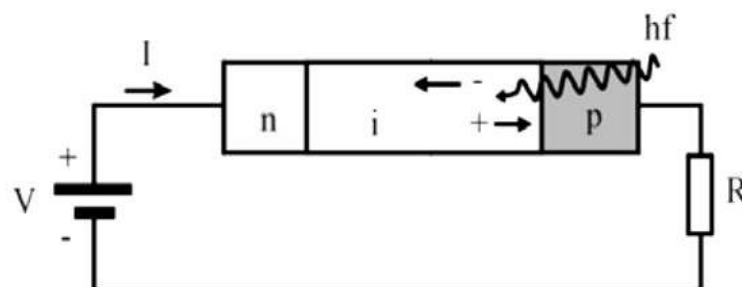


Figure 1.15 : Photodiode PIN

Par rapport à la jonction P-N simple, la zone de champ électrique non nul est élargie par rapport aux zones conductrices, ce qui fait augmenter l'absorption et donc la création de paires électron-trou dans cette région.

Puisque les paires électron-trou sont créées principalement dans la zone de champ électrique, donc l'augmentation du courant est plus rapide [10]. La photodiode PIN possède quelques avantages comme :

- Faible capacité de jonction.
- Temps de réponse très court.
- Bonne sensibilité.
- Faible bruit.

### 1.6.2 La photodiode a avalanche

Si on reprend la diode PIN mais qu'on lui applique une tension inverse élevée, on obtient un champ électrique intense dans la région intrinsèque, aussi appelée région semi-isolante.

Si le champ est suffisamment intense, les charges générées dans la zone semi-isolante peuvent acquérir suffisamment d'énergie pour ioniser un atome neutre. De cette manière, une nouvelle paire électron-trou est créée.

Pour chaque paire créée par l'absorption d'un photon, on obtient ainsi  $M$  paires au total: on dit qu'il y a multiplication des paires électron-trou par avalanche [10]. La figure 1.16 montre le principe d'une photodiode à avalanche.

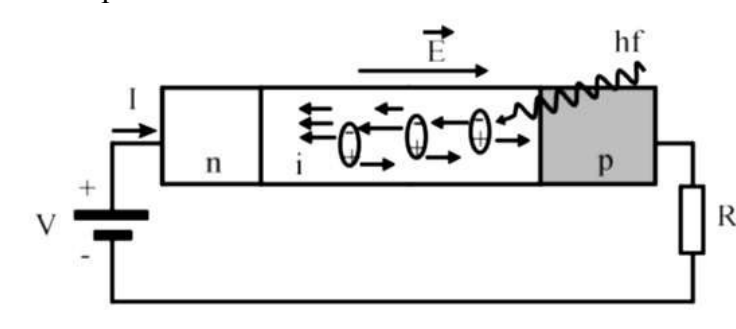


Figure 1.16:Photodiode a avalanche

D'après la figure 1.16 on remarque l'effet d'avalanche est un phénomène qui se produit dans des matériaux isolants et semi-conducteurs. C'est un effet multiplicateur du courant électrique à l'intérieur de matériaux.

## 1.7 La modulation

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une conversion des données électriques en données optiques. Il existe principalement 2 techniques : la modulation directe et la modulation externe.

### 1.7.1 La modulation directe

Dans les systèmes de télécommunication par fibre optique les lasers à semi-conducteur sont très utilisés car il est possible de les moduler facilement. La modulation du courant qui traverse ses systèmes entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Cette technique est appelée la modulation directe (la figure 1.17) [8].

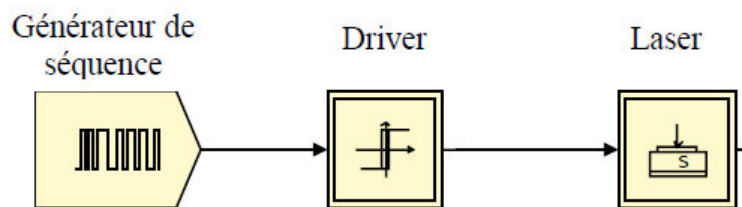


Figure 1.17: Modulation directe

La modulation directe possède peu de composant, le générateur émet un débit de données ou une séquence de données, le driver permet de commander la source optique au niveau des puissances émises en fixant les valeurs du courant d'alimentation, et le laser qui est une source optique [8].

### 1.7.2 La modulation externe

La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non pas le courant d'alimentation à l'entrée du laser.

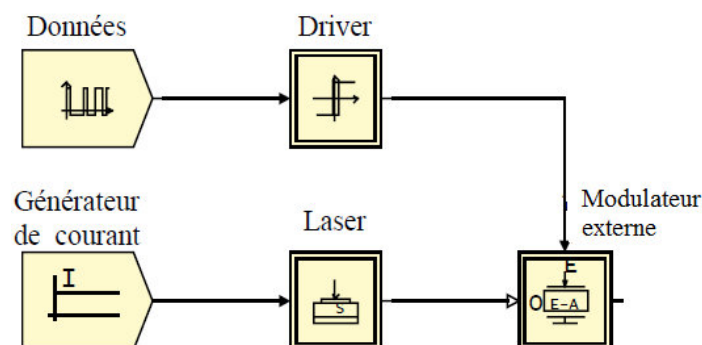


Figure 1.18: Modulation externe

La modulation est effectuée par un composant indispensable qui est le modulateur externe (figure 1.18). Celui-ci est commandé par une tension externe, elle permet de représenter l'information à transmettre. Cette tension est appliquée au modulateur et consiste à modifier le facteur de transmission.

Le signal optique continu émis par le laser est alimenté par un courant constant. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé. Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les niveaux de puissances et choisir les modifications du facteur de transmission [8].

### 1.8 Amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA)

En optique un amplificateur est un dispositif qui amplifie un signal lumineux sans avoir à le convertir en signal électrique, il est nécessaire de placer un amplificateur tous les 100Km, un EDFA permet de le faire [4].

Un EDFA fonctionne à la manière d'un laser, une fibre optique est dopée et est pompée optiquement afin de placer les ions dans l'état excité. Lorsqu'un signal lumineux passe par ce morceau de fibre optique il excite les ions par effet laser en produisant un autre photon en tout point identique au photon incident, le signal lumineux est donc doublé [5]. La figure 1.11 montre un amplificateur optique dopé à l'erbium.

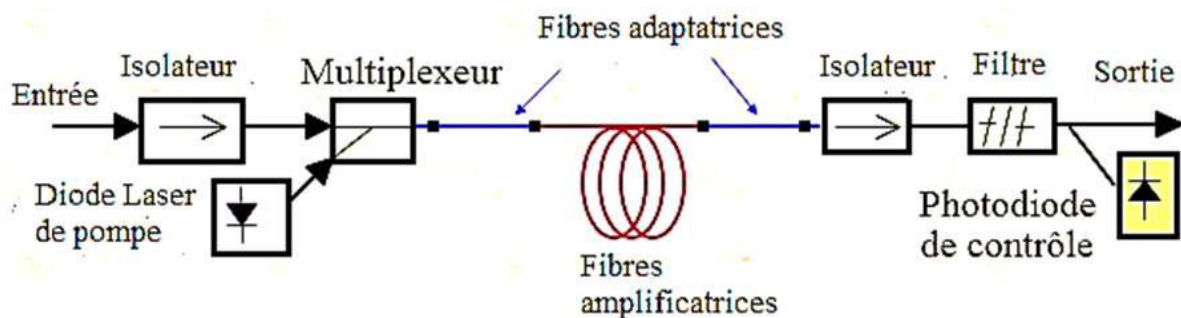


Figure 1.19 : Schéma d'un amplificateur dopé à l'erbium

Le signal et la pompe sont multiplexés en longueur d'onde afin de minimiser les pertes. Il est préférable d'ajouter deux isolateurs un à l'entrée et l'autre à la sortie d'un amplificateur dopée à l'erbium, pour que la lumière passe dans un sens afin d'éviter toutes les réflexions qui créent une cavité, osciller le dispositif et le transformer en laser figure 1.18.

Pour réduire encore les pertes aux raccordements avec les fibres de ligne, une section de fibres adaptatrices est utilisée, ceci permet d'augmenter la densité de puissance de l'onde pompe, donc le gain et le rendement.



On trouve à la sortie un filtre optique, destiné à éliminer les résidus de l'onde pompe et réduire l'émission spontanée amplifiée, ainsi qu'une photodiode permettant de contrôler automatiquement le gain. Un amplificateur EDFA permet d'obtenir des gains supérieurs à 28 dB avec des fortes puissances (> 20 dBm).

### 1.9 Compensation de la dispersion chromatique DCF

Une dispersion chromatique non nulle peut se compenser optiquement, par l'intermédiaire d'une courte section de fibre de forte dispersion négative (en général l'atténuation est élevée) dite DCF (DCF pour dispersion compensating fiber). On peut utiliser un dispositif compensateur de dispersion chromatique qui joue le rôle de retarder les longueurs d'onde arrivées en premier.

La réalisation de ces dispositifs est délicate mais leur principe est simple, la compensation est possible tant que l'on reste en régime linéaire, les différentes longueurs d'onde d'un même signal ne se couplent pas.

Dans un système à multiplexage en longueur d'onde WDM, la compensation de dispersion s'applique en 2 temps [15] :

- Une compensation grossière pour tout le spectre, au niveau de chaque section, cette méthode n'est pas précise car il est difficile d'avoir une fibre dont la dispersion est symétrique de celle de la fibre en ligne sur tout le spectre.
- Une compensation fine longueur d'onde par longueur d'onde après le démultiplexeur.

Si  $L_{SMF}$  et  $D_{SMF}$  sont respectivement la longueur (en km) et la dispersion (en ps/nm/km) de la fibre standard utilisée,  $L_{DCF}$  et  $D_{DCF}$  respectivement celles de la fibre de compensation on doit avoir [5] :

$$(L_{SMF} \times D_{SMF}) + (L_{DCF} \times D_{DCF}) = 0 \quad (1.3)$$

### 1.10 Conclusion

On conclut que la fibre optique est devenue un support de transmission indispensable dans les télécommunications optique vu les performances et les débits qu'elle présente. Car grâce à la fibre optique la transmission des informations est devenue beaucoup plus rapide et fiable.

Ce chapitre nous a permis de connaître le fonctionnement et l'utilité de chaque élément d'un système de transmission optique : la fibre optique, l'émetteur optique, et le récepteur optique, ainsi que la nécessité de placer des amplificateurs(EDFA) dans cette liaison. La transmission des informations sur fibre optique se fait à des débits élevés qui ne cessent d'accroître, de nouvelles architectures sont mises en œuvre tel que l'architecture passive optical network (PON) qu'on va l'étudier dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

---

Réseaux  
optiques

---

## 2-1-Introduction

Les systèmes basés sur l'emploi de fibres optiques à haute capacité sont devenus très fréquents dans les réseaux de transport, où le multiplexage et la concentration permettent un partage de l'infrastructure parmi les nombreux utilisateurs. Dans les réseaux d'accès, leur déploiement est d'autant plus difficile qu'il est absolument nécessaire de fournir une ligne dédiée à chaque abonné.

Pour les opérateurs nationaux disposant de leur propre réseau, déployer la fibre optique vers chaque abonné implique des coûts d'investissement, grâce au développement de nouvelles techniques de production de masse de composants optiques ainsi que de nouvelles méthodes d'installation de câbles à fibre optique adaptées aux réseaux d'accès. Aussi, l'identification de la solution la plus économique pour supporter un réseau d'accès à large bande de manière à faciliter la transition vers la 1<sup>ère</sup> large bande [16].

Un facteur clé dans ce processus est une solution capable de satisfaire à la fois les besoins en termes de type de services et d'emploi de bande passante des clients et des entreprises. Il se peut que des réseaux séparés soient requis, mais une solution unique pourrait être un avantage significatif en termes d'économie d'échelle et de gestion de réseau.

La dérégulation du marché des télécommunications ainsi que la demande croissante de services intégrant la voix, les données et la vidéo ont ouvert la voie au développement de nouvelles techniques de transmission dans le but ultime de réaliser ce réseau d'accès interactif à large bande. Diverses alternatives ont été proposées en ce sens, telles que l'utilisation du réseau filaire au moyen de techniques DSL (Digital Subscriber Line) ou encore l'utilisation des réseaux hybrides de télédistribution HFC (Hybrid Fiber Coax), basés sur le câble coaxial et la fibre optique.

Les réseaux optiques passifs constituent l'une des alternatives offertes aux opérateurs de télécommunications leur permettant de délivrer des services interactifs à haut débit jusqu'au domicile de leurs abonnés et ont été considérées comme étant la solution la plus économique pour l'introduction de la fibre optique dans les réseaux d'accès. L'objectif de ce chapitre consiste à présenter les réseaux sur fibre optique, dans la première partie nous allons décrire les différentes architectures FTTx (Fiber to the) tel que FTTH (Fiber to the home), et FTTB (Fiber to the building). Ensuite on va aborder la partie du réseau optique passif, son architecture (unidirectionnelle et bidirectionnelle), son principe de fonctionnement ainsi ses différents éléments tel que l'ONT, l'OLT, splitter [16].

Dans la deuxième partie de ce chapitre on va présenter les débits offerts par les réseaux optiques passifs car ils permettent d'autoriser des débits très importants, on va aussi voir la sécurité, la fiabilité ainsi que la confidentialité assuré par un tel réseau, enfin on présente quelques avantages et inconvénients du réseau PON (Passive Optical Network).

## 2-2-Historique

Dès l'apparition de la fibre optique, un des objectifs a été le déploiement de réseaux d'accès amenant chez les abonnés le téléphone, plusieurs canaux de télévision, des canaux son et des services interactifs. Vue l'importance des images dans le trafic les réseaux de vidéocommunication ont été expérimentés dans les années 80 et déployés dans quelques réseaux opérationnels.

Ces réseaux de première génération (1G) étaient basés sur une structure en étoile : chaque abonné est relié à sa propre fibre au centre de distribution, mais un deuxième abonné peut ultérieurement partager cette fibre grâce au multiplexage en longueur d'onde.

Le développement de réseaux à distribution optique est resté très marginal, pour des raisons de coûts bien que les fibres optiques aient vite été utilisées dans la partie transport des réseaux à distribution coaxiale. L'effort a été fourni sur le développement de technologies optoélectroniques pour leurs faibles coûts, qui permet une compétitivité dans la distribution grand public, mais a été entravé par le succès de l'ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), permettant des débits dépassant 10Mbit/s sur des lignes téléphoniques déjà installées.

Depuis quelques années l'ADSL atteint ses limites, que le déploiement d'accès optiques a très haut débit (10 à 100 Mbit/s par abonné), réutilisé principalement en Asie (Japon, Corée, Chine), en Europe (Suède, Italie), les Etats-Unis privilégiant les architectures hybrides fibre-coaxiale pour profiter de la présence massive du câble coaxiale dans la distribution de télévision [15].

## 2- 3- Les différentes architectures FTTx

L'arrivée de la technologie Ethernet dans les réseaux d'accès a permis le déploiement à grande échelle de raccordement optique résidentiels FTTx(Fiber To The...) qui permet des débits de 10, 50 ou 100Mbit/s, puisque l'affaiblissement de la fibre est moins important que celui du cuivre à très haut débit, la solution envisageable est d'amener la fibre plus près du client d'où la nécessité d'ajouter un équipement actif entre le NRO (Nœud de Raccordement Optique) et le client [20].

Afin d'offrir 100Mb/s à chaque client, la méthode utilisée est de déployer la fibre jusqu'à la maison (FTTH), donc des réseaux d'accès sont tout optique. Cette technique ne nécessite plus d'équipement actif entre le NRO et le client, mais des composants optoélectroniques chez le client, qui verra arriver la fibre dans son appartement ou sa maison.

En fonction de considérations économiques et historiques (type de réseaux d'accès déjà installés), il existe plusieurs architectures :

### 2-3-1 FTTH (Fiber To The Home)

La fibre optique est déployée de bout en bout du réseau, jusqu'au domicile de l'utilisateur. C'est la technologie la plus intéressante en termes de débit pour l'abonné mais la plus onéreuse en termes de coût de déploiement pour l'opérateur.

Dans ce cas (FTTH) deux options sont principalement utilisées qui ne diffèrent que par l'architecture de la liaison terminale en fibre optique [17].

#### a- L'architecture Point à Point (P2P)

Dans cette architecture, chaque abonné est raccordé au répartiteur optique du réseau le plus proche, avec une fibre dédiée (point à point). Ce modèle est identique à celui de la boucle locale téléphonique actuelle. Cette architecture permet une étanchéité absolue entre les lignes des différents abonnés : aucun risque de sécurité, et garantie absolue de disponibilité totale de la ligne. Mais c'est un inconvénient pour les opérateurs, chaque fibre étant dédiée à un abonné, il y a autant de fibres que d'abonnés (figure 2.1).

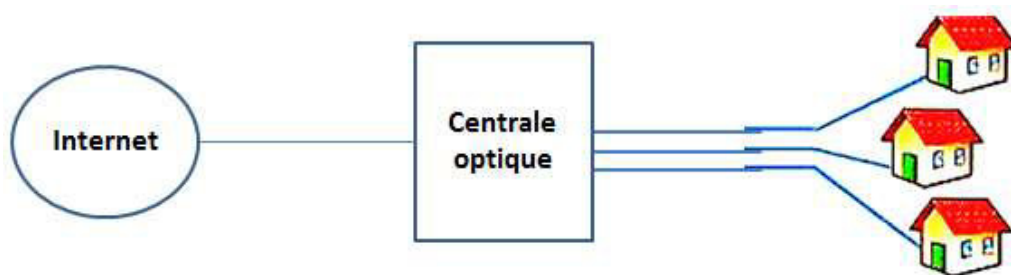


Figure 2.1 : Architecture point à point

Différents protocoles pour le transport des données peuvent être utilisés mais le plus souvent c'est Ethernet qui est choisi. Ces solutions sont alors dénommées Ethernet P2P ou Ethernet Direct Fiber. Elles permettent des débits de 10 Gb/s. Commercialement, les débits sont limités à des valeurs moindres, par exemple 100 Mb/s symétriques [17].

#### b- L'architecture point à multipoint

Dans cette architecture, une fibre unique part du central optique dans le réseau et dessert plusieurs habitations, sur lesquelles sont raccordées à cette fibre au niveau d'un équipement passif (coupleur ou splitter) placé à proximité de la zone à desservir. Chaque site reçoit toutes les informations envoyées par l'équipement central OLT (Optical Link Terminal); et les reçoivent par l'équipement récepteur ONT (Optical Network Terminaison) de chaque abonné, et assure la fonction du filtrage : chacun des ONT et OLT n'exploitent que les données qui concerne l'utilisateur qui y est raccordé (figure 2.2) [17].

Ce type de réseau est souvent désigné sous le terme de PON (Passive Optical Network ou Réseau optique passif), le terme de passif s'appliquant au splitter qui ne comporte aucun élément électronique.

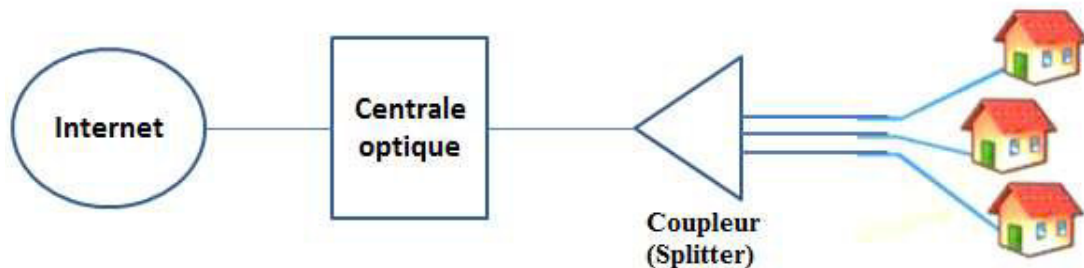


Figure 2.2 : Architecture point à multipoint

Cette architecture permet des économies sur la quantité de fibres à poser et donc sur le dimensionnement des infrastructures d'accueil OLT.

Les principaux inconvénients sont le partage du débit et la nécessité de chiffrer les connexions des abonnés qui utilisent la même fibre.

Les architectures passives PON se déclinent ensuite en plusieurs catégories :

- APON : ATM PON, il est issu des techniques PON associées à l'ATM. Il offre un débit 155/622 Mbit/s (sens descendant) et 155 Mbit/s (sens montant) pour 32 abonnés. La solution APON est complexe et coûteuse. Elle ne peut pas offrir de services vidéo. Le débit est limité et la récupération d'horloge peut poser des difficultés [23].
- BPON : Broadband PON : évolution de la norme APON, c'est une technologie APON modifiée pour permettre la diffusion de la vidéo. Elle supporte le WDM et possède une allocation de bande passante dynamique. Le BPON transmet sur la même fibre la voix et les données, et réserve des fréquences pour la télévision numérique et analogique (overlay wavelength).

Le BPON autorise des débits de 1Gb/s dans le sens descendant et 622Mb/s dans le sens remontant mais son utilisation est usuellement vue pour des débits de 622Mb/s descendant et 155Mb/s remontant.

- EPON : Ethernet PON, La technologie utilise une transmission à base de paquets Ethernet. La différence majeure avec le APON est que les données sont transmises en paquets de longueur variable jusqu'à 1.518 octets, alors que l'APON oblige à utiliser les paquets ATM de 48 octets (avec 5 octets supplémentaires = contrôle). Selon le protocole Ethernet, chaque paquet descendant porte l'adresse de l'ONU auquel il doit être fourni, mais ce paquet est transmis à tous les ONU. L'ONU auquel il est destiné le transmet, les autres le jettent.

Le débit maximal est 1,25 Gbit/s symétrique, dans ce réseau une longueur d'onde est utilisée par sens de transmission et peut atteindre 32 abonnés par OLT.

- GPON : Gigabit capable PON, la technique de ce réseau est basée sur le multiplexage temporel. Une longueur d'onde est utilisée pour le sens montant et une autre pour le sens descendant. GPON se différencie de BPON par sa capacité à transporter des paquets et des trames Ethernet de longueurs variables. Le GPON offre un débit de 1.2-2,4 Gbit/s (débit asymétrique). De plus, GPON permet une plus grande distance de déploiement, jusqu'à 60 km, avec 20 km maximum entre les ONT. Enfin, le GPON permet jusqu'à 64 lignes sortantes d'un coupleur optique (splitter).
- WDM PON : la technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) consiste à illuminer la fibre optique, non pas avec une seule source laser, mais simultanément avec plusieurs sources en utilisant pour chacune d'entre elles une longueur d'onde différente, ce qui permet le transport en parallèle (et non pas séquentiellement comme dans le PON classique) d'autant de flux de données, chacun d'entre eux avec un débit identique à celui qui serait possible sans cette technologie [17].

### c- Architectures mixtes

A l'opposé des architectures précédentes où la fibre optique était déployée d'un bout, dans cette architecture la fibre optique est jusqu'à proximité du domicile du client final. Une série d'acronymes est déclinée du réseau PON pour caractériser ce type d'architecture, ils dépendent de l'implantation de la jonction [18] :

- FTTB (fiber to the building), la fibre va au pied de l'immeuble, c'est une technique visant à réutiliser les techniques xDSL (x Digital Subscriber Line) car la terminaison étant ensuite effectuée via xDSL, cette technique repose sur l'installation de la fibre optique plus près de l'abonné tout en utilisant la paire de cuivre téléphonique, les réseaux de télévision câblés pour les derniers mètres [23].
- FTTN (fiber to the neighborhood), la fibre est déployée dans le quartier, elle correspond à une installation dans laquelle la fibre arrive à un point de distribution (sous-répartiteur) desservant un ensemble de bâtiments. Le raccordement d'abonné s'effectue ensuite sur le réseau cuivre ou par liaison radio (Wifi – Wimax).
- FTTC (fiber to the curb), fibre au niveau du trottoir, ou de la rue, la fibre va au plusieurs maisons. FTTC a presque la même signification technique que FTTN, cependant la zone desservie en FTTN est généralement plus large que celle desservie en FTTC, le point de distribution est une armoire de rue, aussi bien qu'un sous répartiteur.
- FTTCab (fiber to the cabinet), c'est-à-dire fibre va aux coffrets des répartiteurs (sous répartiteurs).

- FTTP (fiber to the premises), la fibre va à un local technique de l'opérateur ou entreprises [23].

### 2-3-2 Etat du déploiement mondial

Le marché FTTx global représente un total de 48 millions d'abonnés. Le FTTH et FTTB restent les architectures dominantes en raccordant plus de 61% des abonnées connectées via la fibre. Ces architectures, et plus particulièrement celles basées sur le FTTB, sont en effet les plus économiques et les mieux adaptées pour permettre aux opérateurs d'augmenter leur bande passante dans la plupart des pays et notamment en Asie en zones particulièrement denses [20].

En effet, FTTH et FTTB sont les architectures dominantes et connaissent surtout une croissance rapide. A la fin 2008, on comptait ainsi plus de 8 millions de nouveaux abonnés ce qui a permis de dépasser les 29 millions d'abonnés FTTH/B au niveau mondial.

La concentration la plus importante d'abonnées FTTH/B est localisée en Asie et plus particulièrement au Japon et en Corée du Sud) avec près des quatre cinquièmes de l'ensemble des abonnés FTTH/B à fin 2008. Le nombre d'abonnés FTTH/B en Asie-Pacifique passe de 17.9 millions à plus de 22,7.

Le marché nord-américain est principalement animé par les Etats-Unis avec 5 millions d'abonnés à la fin 2008. Les Etats-Unis s'imposent ainsi comme le marché FTTH/B à la plus forte croissance et comptabilise 16% des abonnés au niveau mondial, ce qui le classe en troisième position derrière le Japon et la Corée du Sud. Au niveau mondial, le nombre de ports FTTx installés est estimé à 83.3 millions en fin 2008.

L'accès très haut débit devrait connaître une croissance continue durant les prochaines années, pour atteindre les 140 millions d'abonnés au niveau mondial en 2014 [20].

### 2-4 Les réseaux optiques passifs (PON)

L'architecture qui semble avoir actuellement la préférence des opérateurs est le PON (Passive Optical Network), grâce à des coupleurs passifs ou splitter formant des topologies en arbre, le réseau optique passif peut atteindre 32 à 64 abonnées qui se partagent la même fibre monomode, et permet d'offrir un débit qui se compte en Gbit/s [15].

#### 2-4-1 Qu'est-ce qu'un réseau optique passif (PON)

La technologie PON constitue une référence en matière de réseaux d'accès très haut débit, car elle permet d'offrir une très forte capacité de transport et minimisation des infrastructures (fibres nécessaires).



Cette technologie utilise des réseaux optiques passifs, optiques car ils utilisent comme infrastructure des fibres optiques, passifs car les équipements de la partie intermédiaire de ces réseaux sont inactifs, ils ne sont pas alimentés en électricité et n'embarquent aucune électronique. Ces réseaux permettent un service d'acheminement de flux bidirectionnels et multimédia à très haut débit, jusqu'à l'utilisateur final, entreprise ou particulier [19].

Les réseaux PON sont normalisés au niveau international par les principaux organismes de normalisation : l'ITU (International Telecommunication Union) et le FSAN (Full Service Access Network), l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Afin de réduire les coûts d'infrastructure, les réseaux PON innovent par l'utilisation de composants passifs sur le parcours de la fibre optique, permettant de diviser le signal optique sur plusieurs branches secondaires. Les informations seront donc démultipliées dans leur trajet vers l'utilisateur final. Des mécanismes d'allocation permettent d'éviter les collisions entre informations émises par les utilisateurs en partageant l'usage de la ressource optique dans le temps. En outre, en éliminant la nécessité d'installer des équipements actifs intermédiaires, alimentés électriquement, entre l'opérateur et l'abonné, les réseaux PON diminuent fortement les contraintes d'exploitation des réseaux optiques.

Les services de transport proposés dans cette technologie est accessible à tous les types d'opérateurs. Les réseaux PON trient les flux et permettent de partager des VLAN (Virtual Area Network, réseau local virtuel) sans contraintes pour l'utilisateur, chacun des VLAN étant spécifique aux opérateurs qui partagent ces infrastructures. Ces réseaux sont en fait configurés pour être utilisés par plusieurs opérateurs simultanément [19].

#### 2-4-2 Architecture d'un réseau optique passif (PON)

Grâce aux différents composants optiques passifs (coupleurs, répartiteurs, multiplexeur en longueur d'onde), les fibres optiques permettent de constituer des réseaux multi-terminaux.

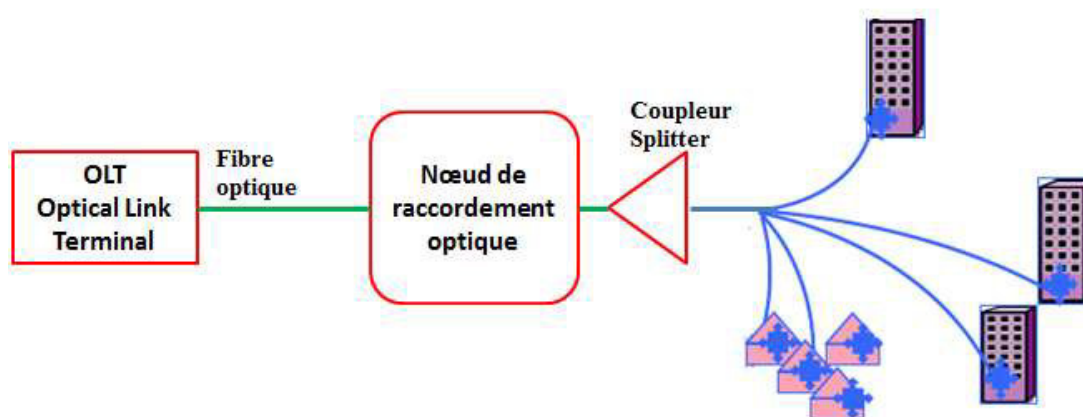


Figure 2.3 : Architecture d'un réseau optique passif (PON)

La figure 2.3 montre l'architecture d'un réseau PON qui est la même que celle du point à multipoint, dans cette architecture un coupleur (Splitter) diffuse simultanément le même signal à un certain nombre de récepteurs, leur nombre peut être de quelques dizaines et porté à plusieurs milliers par l'utilisation d'un amplificateur optique entre la source et le coupleur.

L'architecture d'un réseau PON vise à réduire l'utilisation des fibres optiques. Il s'agit de réseaux arborescents, où chaque nœud permet de séparer la fibre optique en branches secondaires connectées à un coupleur. Plusieurs coupleurs peuvent être utilisés sur le parcours d'une fibre optique [18].

L'utilisation des coupleurs permet de constituer des arbres de transmission passifs. Ces arbres, sont caractérisés par le départ d'une seule fibre à l'OLT qui constitue un élément de base des réseaux PON. Le PON utilise à la fois un multiplexage temporel et fréquentiel en longueur d'onde afin de réduire au minimum le nombre de fibres optiques utilisées dans le réseau.

#### a- Sens montant

Le coupleur étant passif, et les ONT émettent tous dans la même longueur d'onde, si les signaux émis par deux ONT parviennent simultanément au coupleur, ils ressortiraient sous la forme d'un mélange illisible par l'OLT. On utilise donc un partage du temps de parole (TDM : Time Division Multiplexing) [20].

L'OLT attribue à tour de rôle à chaque ONT un intervalle de temps (quelques micro secondes) pendant lequel cet ONT est seul autorisé à émettre (figure 2.4). S'il a beaucoup de données à transmettre, l'OLT lui attribue d'avantage de temps de paroles, et inversement elle réduit pour les ONT qui émettent peu.

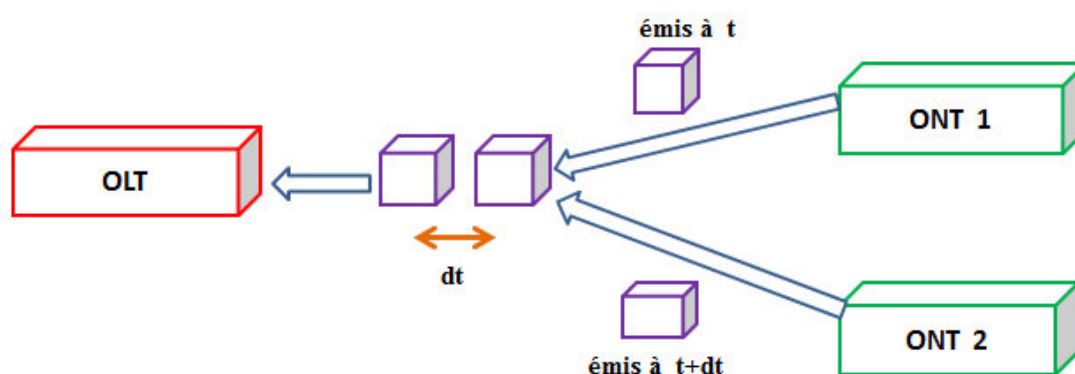


Figure 2.4 : Architecture du sens montant

Une autre solution de partage dans le sens montant consiste à utiliser une longueur d'onde par ONT (multiplexage en longueur d'onde), chacun disposant d'un couloir étanche jusqu'à l'OLT. Cette solution est très coûteuse pour qu'elle soit déployée à grande échelle.

### b- sens descendant

Dans le sens descendant chaque abonné ne reçoit que les informations qui le concernent. Tous les ONT reçoivent l'ensemble des données mais seul l'ONT concerné les retransmet dans le réseau interne de l'abonné la figure 2.5 montre ce principe [20].

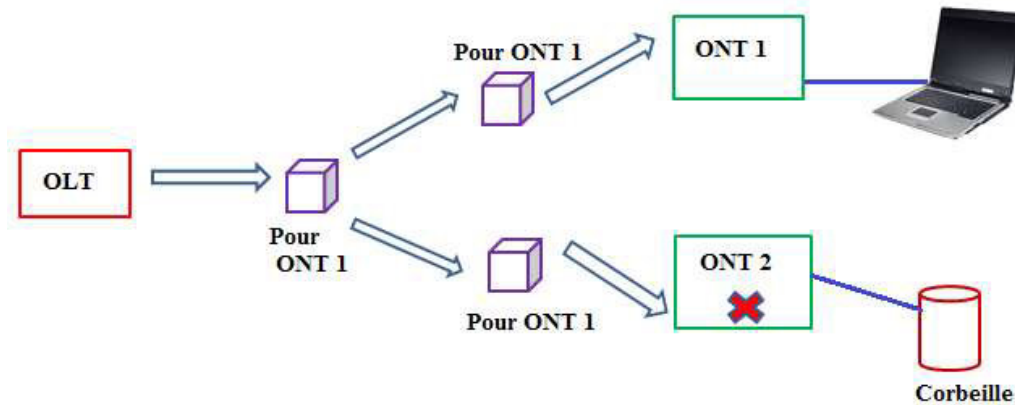


Figure 2.5 : Architecture du sens descendant

Dans le réseau PON et sur l'architecture du sens descendant, le débit instantané est partagé entre tous les abonnés qui reçoivent les données.

#### 2-4-2-1 Architecture PON unidirectionnelle

L'architecture PON unidirectionnelle se caractérise par un émetteur OLT (Optical Line Terminal), coupleurs et ONT (Optical Network Terminaison), chaque ONU (Optical Network Unit) ne reçoit que les données qui lui sont destinées, chaque client a un intervalle de temps bien précis pour émettre afin de ne pas interférer avec un autre client.

La figure 2.6 montre une liaison unidirectionnelle ou une fibre est dédiée pour le sens montant et une autre pour le sens descendant [20].

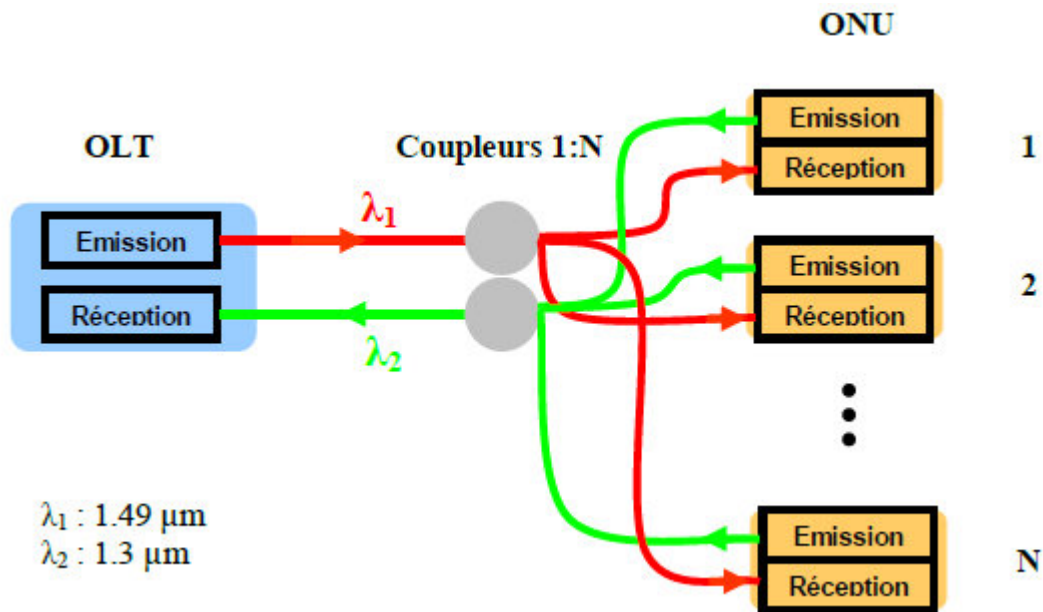
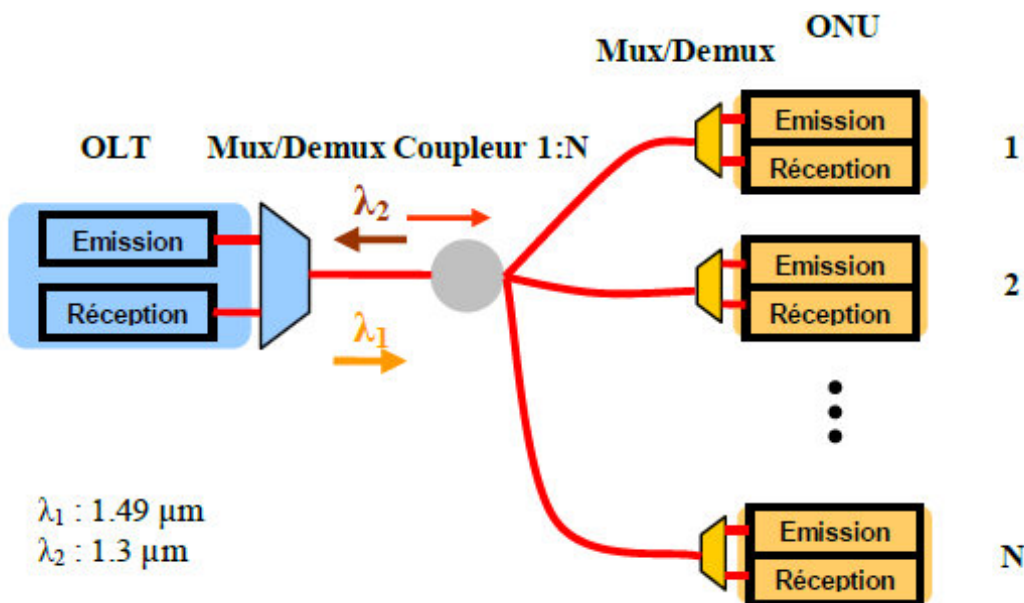


Figure 2.6 : Architecture PON unidirectionnelle.

Dans cette architecture Une composante WDM est présente dans les PON TDM de la norme car le signal descendant est émis à 1.49  $\mu\text{m}$  et celui du sens est émis montant à 1.31  $\mu\text{m}$  (figure2.4).

**2-4-2-2 Architecture PON bidirectionnelle**

L'architecture PON bidirectionnelle est utilisée afin de simplifier le réseau, économiser de la fibre et limiter les points de raccordements. L'utilisation d'un duplexeur est alors nécessaire, il peut s'agir d'un coupleur, d'un circulateur ou d'un multiplexeur en longueur d'onde, ce dernier noté MUX (Multiplexeur/DMUX (Démultiplexeur) est celui qui est généralement utilisé et intégré aux modules d'émission et de réception [20].



Figure

2.7 : Architecture PON bidirectionnelle

La figure 2.7 montre bien l'utilisation des multiplexeurs afin de combiner les signaux émis, et à la réception il y'a des démultiplexeurs afin de reconstituer le signal initial et l'envoyer à la destination.

### 2-4-2-3 PON avec multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Le multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) est une augmentation des débits et du taux de partage dans le réseau d'accès. Le WDM est une solution qui permet le partage du réseau en utilisant la longueur d'onde comme composante de multiplexage, le WDM offre le plus haut débit possible par ONT. Il est possible de combiner les méthodes de multiplexage TDM et WDM, on parle alors de multiplexage hybride [20].

Le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing) est une technique utilisée en communications optiques qui permet de faire passer plusieurs signaux de longueur d'onde différentes sur une seule fibre optique, en les mélangeant à l'entrée à l'aide d'un multiplexeur (MUX), et en les séparant à la sortie à l'aide d'un démultiplexeur (DEMUX).

Le principe consiste à transporter plusieurs signaux sur un brin de fibre optique. Chaque signal est placé sur une longueur donnée grâce à un transpondeur. Puis via un multiplexeur optique, toutes les longueurs d'onde sont envoyées sur le même brin de fibre optique. A l'autre extrémité, un démultiplexeur va séparer les longueurs d'onde les unes des autres.

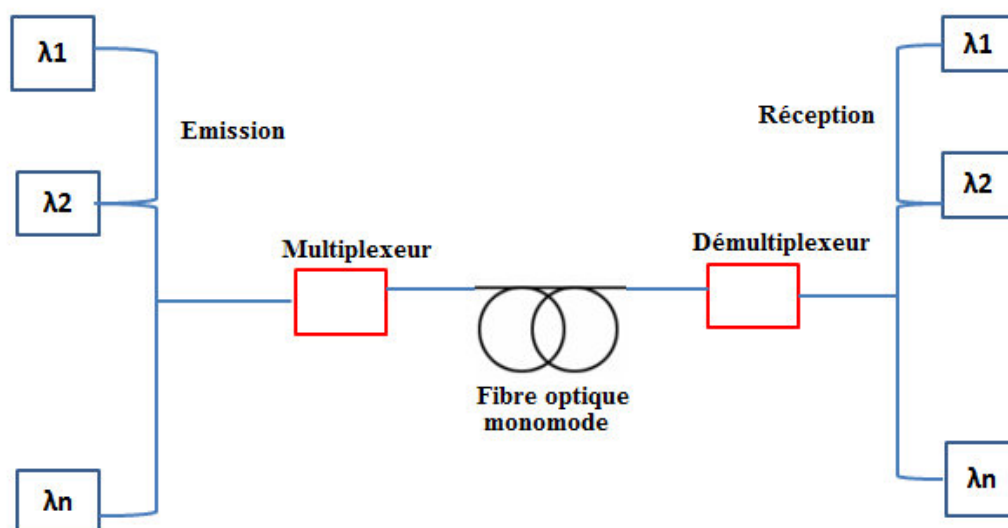


Figure2.8 : Le multiplexage en longueur d'onde WDM

Un multiplexage optique par longueur d'onde est possible à plusieurs degrés : CWDM pour Coarse WDM dans ce type de multiplexage l'espacement entre deux longueurs d'ondes est 20nm, le nombre maximum de longueurs d'ondes est 18, elle peut atteindre une portée de 70km.

DWDM pour Dense WDM, dans ce type de multiplexage l'espacement entre longueur d'onde est 8nm, le nombre maximum des longueurs d'onde est 160 elle peut atteindre une portée de 600 km. Le but est d'allouer une longueur d'onde par client.

#### a- Architecture PON WDM broadcast and select

Dans ce type d'architecture il existe un élément principal qui est le coupleur passif ce dernier va diffuser les longueurs d'onde vers tous les ONU (broadcast). Chaque abonné reçoit toutes les longueurs d'onde mais il y'a un filtre optique différent chez chaque client qui permet de sélectionner la longueur d'onde qui lui est attribuée (select). Il existe une configuration unidirectionnelle avec deux fibres, une pour chacune des voies montante et descendante.

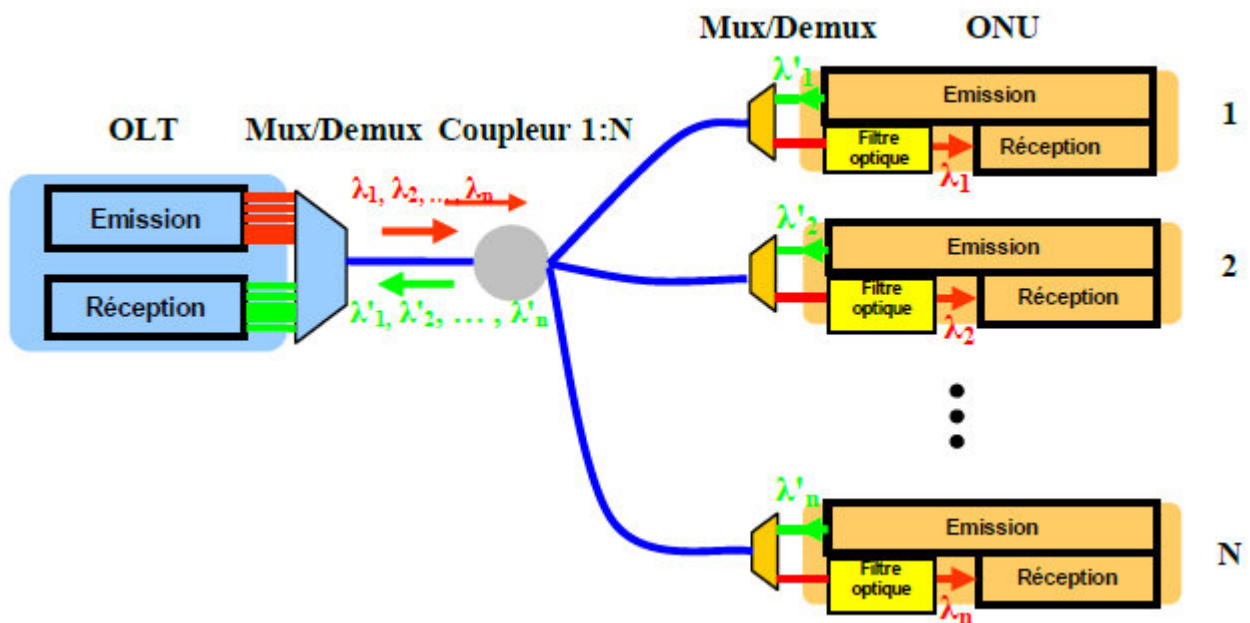


Figure 2.9: Architecture PON WDM broadcast and select

La figure 2.9 montre l'existence des filtres optiques au niveau des ONU afin que chaque abonnée ne puisse lire que les données qui lui sont destinées.

#### b- Architecture PON WDM avec aiguillage des longueurs d'ondes

Dans cette architecture le composant principale est un multiplexeur et non pas un coupleur optique car grâce à cet élément les longueurs d'ondes sont orientées vers leurs destinations (figure 2.10).

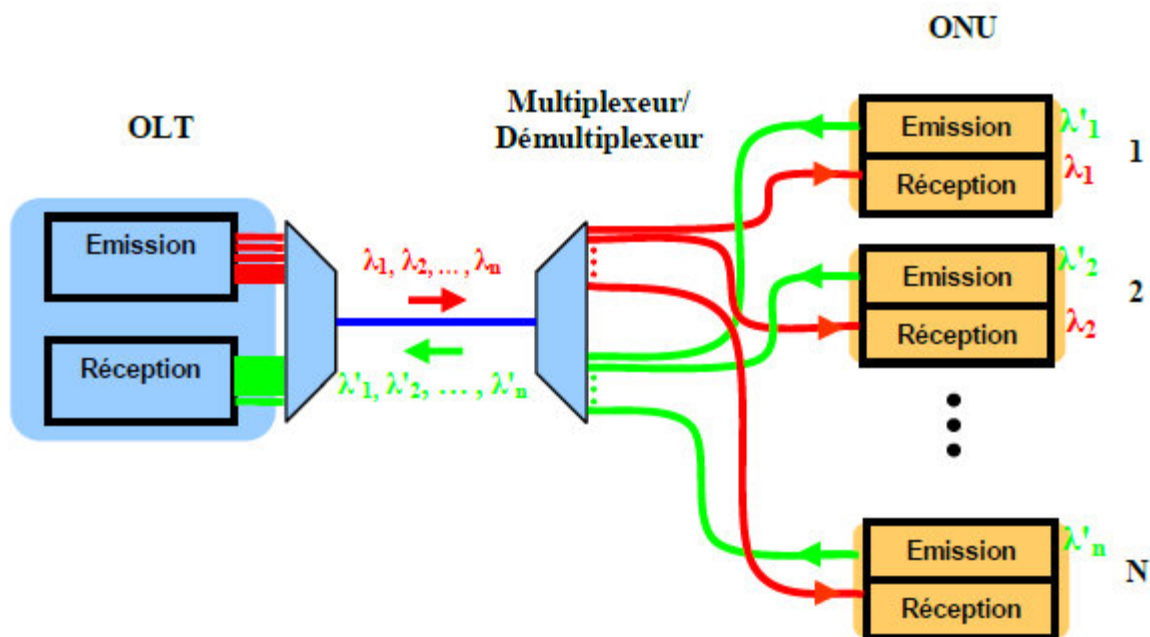


Figure 2.10 : Architecture PON WDM avec aiguillage des longueurs d'ondes

Ce type d'architecture permet d'atteindre un maximum d'efficacité en bande passante par client. De plus, les pertes optiques du multiplexeur sont indépendantes du nombre de ports de sortie.

### 2-4-3 Le fonctionnement d'un réseau optique passif

Un réseau PON, comporte un nœud de raccordement optique (NRO), sur lequel sont connectées des sources multiples de services (vidéo, Internet et téléphonie classique). Ce NRO est interconnecté via la fibre optique, aux utilisateurs finals [19].

Dans un réseau PON un équipement actif positionné au NRO qui a pour fonction d'assurer d'un côté l'interconnexion du réseau PON avec les autres réseaux, de l'autre de gérer l'information au sein du réseau PON par l'illumination des différentes fibres optiques. Cet équipement est appelé OLT pour Optical Line Terminal ou Terminaison de Ligne Optique.

Des équipements actifs sont installés chez les utilisateurs finals du réseau qui assurent la connexion avec les terminaux de l'utilisateur, par plusieurs interfaces (RJ45 cuivre pour le PC sur Internet, connecteur coaxial pour la télévision, RJ11 cuivre pour le téléphone analogique). Cet équipement est appelé ONU pour Optical Network Unit, ou ONT Optical Network Terminaison, Terminaison de Réseau Optique [19].

Des composants passifs sont installés sur le chemin de la fibre optique entre l'OLT et les ONU. Ils ont pour rôle de partager le signal optique dans la voie dite descendante (de l'OLT vers les ONU) et de recomposer le signal à partir des multiples signaux remontants dans l'autre sens (sens descendant des ONU vers l'OLT). Ces équipements sont appelés splitter ou coupleurs.

### **2-5-Etude des éléments d'un réseau passif**

L'architecture d'un réseau optique passif PON est basée sur 3 éléments essentiels : terminaison de ligne optique qui est OLT (Optical Line Terminal), terminaison de réseau optique qui est ONT (Optical Network Termination) et l'élément passif qui est le coupleur (Splitter).

#### **2-5-1 OLT (Optical Line Terminal)**

L'OLT est l'équipement maître d'accès optique pour des clients connectés au FTTx, un lien de collecte permet de distribuer des services tel que : l'internet, la téléphonie et la vidéo, cet équipement est actif, placé au central, envoie et reçoit des signaux lumineux porteurs des données [21].

Le transmetteur optique est composé d'un module dont l'émetteur est généralement une diode LASER. Un récepteur qui permet d'adapter le seuil de décision de la photodiode en fonction des paquets de données reçues. L'OLT doit être conforme à la norme ITU.

#### **2-5-2 ONT (Optical Network Termination)**

L'ONT peut être considéré comme un modem optique auquel le client vient connecter sa passerelle d'accès au haut débit. C'est un élément terminal du réseau optique. L'ONU désigne un élément générique terminal du réseau d'accès optique FTTx. L'ONT se compose d'un module, d'un émetteur optique à base d'une diode LASER et un photorécepteur [21].

L'ONT est l'interlocuteur direct de l'OLT, les ONT émettent sur une même longueur d'onde pour des raisons de coût et de gestion des équipements.

#### **2-5-3 Coupleur optique (Splitter)**

On appelle coupleur le composant qui est intégré dans la ligne, assure la fonction diviseur ou concentrateur de la transmission. C'est un équipement passif qui nécessite aucune alimentation électrique, son fonctionnement est basé sur la seule propagation de la lumière à l'intérieur de la fibre [20].

Dans le sens montant le coupleur permet de combiner par addition les signaux optiques, dans le sens inverse (sens descendant) il divise le signal optique qui vient de l'OLT. Le coupleur n'est pas capable d'aiguiller, de modifier, de retarder ou de bloquer les signaux qui le traversent.



## 2-6 Les débits offerts par le réseau optique passif (PON)

Le réseau PON permet d'offrir des débits importants qui peuvent aller de 1 jusqu'à 2.5 Gbit/s, ces débits sont partagés entre N utilisateurs (N utilisateurs= 64 utilisateurs), les ONU possèdent une interface RJ45 et autorisent des débits instantanés jusqu'à 1 Gbit/s [19].

Les architectures PON offrent une grande flexibilité pour l'allocation de la bande passante. La bande passante est allouée de manière dynamique à l'ensemble des utilisateurs ayant besoin de débit à un instant donné. Le reste de la bande passante disponible est alloué équitablement entre les utilisateurs actifs tout en respectant la qualité de service.

Cette gestion dynamique de la bande passante est d'autant plus importante que l'ensemble des services qui migrent progressivement vers IP avec le développement de services caractérisés par la succession rapide des données sur des courtes périodes. C'est le cas du téléchargement de fichiers (Peer to Peer), de la vidéo à la demande (téléchargement de DVD), du chargement d'une page Web avec un contenu multimédia.

Le tableau 2.1 montre les différents débits offerts par les différents types du réseau PON ainsi que le format de transmission [22].

	<b>B-PON</b>	<b>E-PON</b>	<b>G-PON</b>
<b>Taux des données au sens descendants</b>	600 Mbit/s	1 Gbit/s	2.4 Gbit/s
<b>Taux des données au sens montant</b>	150 Mbit/s	1 Gbit/s	1.2 Gbit/s
<b>Format de transmission</b>	Ethernet	ATM	ATM + TDM + Ethernet

Tableau 2.1 : Tableau comparatif entre les standards du PON

D'après le tableau 2.1 on remarque que le standard G-PON permet d'offrir des débits importants dans le sens montant et descendant par rapport aux deux autres standards B-PON et E-PON, et qu'il utilise ATM, TDM, Ethernet lors de la transmission des données.

## 2-7 La sécurité et la fiabilité d'un réseau passif

Le réseau PON offre un mode de fonctionnement sécurisé en ce qui concerne la confidentialité des données, il permet aussi d'assurer une fiabilité car la probabilité de défaillance d'un équipement est faible.

### 2-7-1 La fiabilité du PON

Le dysfonctionnement du réseau PON peut être repéré au niveau des ONU qui, pour une raison quelconque commence à émettre de la lumière en continu et perturbe les OLT, empêchant ainsi de localiser l'ONU défaillant [19].

Pour assurer la fiabilité du réseau PON, l'ITU a utilisé le principe de la redondance des réseaux, en cas de panne d'un lien il bascule sur le lien secondaire. Pour les raccordements sensibles l'accès est dupliqué.

### 2-7-2 La sécurité du PON

Dans la technologie PON il est difficile pour une personne malveillante d'essayer de capturer des données qui ne lui seraient pas destinées, le réseau PON a mis en œuvre des mécanismes afin que l'abonné ne puisse lire que les données qui lui sont adressées. Le mécanisme de sécurisation employé est le suivant [19]:

- Le trafic descendant est crypté. Il utilise l'algorithme standardisé AES à 128-bits : chaque équipement client a sa propre clé cryptage/décryptage privée, de nouvelles clés sont automatiquement échangées par l'OLT et l'ONU à des intervalles de temps réguliers.
- Le trafic remontant est émis en utilisant une couleur optique de 1310 nm. Les modems client n'ont aucun moyen de détecter ce signal optique et par conséquent de lire le trafic remontant des autres clients.
- L'interception des données provoque l'interruption temporaire de tous les flux optiques, ce qui serait immédiatement détectée par l'OLT et générerait une alerte majeure.

Les mécanismes d'authentification des ONT permettent de refuser la connexion pirate d'un nouvel ONT sur le réseau.

### 2-8 L'économie d'investissement et d'exploitation des réseaux PON

L'architecture PON est plus flexible lors de la montée en charge du réseau et de l'accroissement de la pénétration. Cela permet un investissement étalé dans le temps, là où une architecture point à point nécessite d'anticiper dès le premier jour les capacités en fibres. Les réseaux PON permettent de réduire la consommation électrique dans les NRO (nœud de raccordement optique)

Les investissements d'un déploiement du réseau PON sont progressifs. Cette technologie ne nécessite pas le financement de l'intégralité du réseau dès sa mise en œuvre. Les investissements d'un réseau PON sont directement liés à la montée en charge du réseau. Les éléments de réseau (cartes OLT, ONT, splitter) sont installés en fonction du taux de pénétration.

### 2-9 Les avantages et les inconvénients d'un réseau optique passif (PON)

Le réseau PON permet d'autoriser des débits très importants tout en minimisant l'infrastructure (moins de fibres optique), il présente certains points positifs :

- Peu de fibres optiques sont employées dans le réseau PON.
- Aucun local alimenté en énergie n'est nécessaire dans ce type de réseau, ce qui entraîne des économies d'investissement, d'exploitation et de maintenance.
- Au niveau de la centrale, le PON permet d'économiser de l'espace grâce au partage des ports des équipements actifs entre plusieurs abonnés.

Le réseau PON a des avantages importants mais présente aussi quelques points négatifs :

- Si les câbles optiques mis en place correspondent au strict nécessaire à la réalisation d'un PON, alors la capacité d'évolution du réseau est limitée. On ne dispose d'aucune réserve de capacité d'aucune fibre excédentaire. On ne peut évoluer sans réaliser de nouvelles infrastructures d'accueil.
- Si un réseau est construit sur une architecture PON strict, celui-ci ne peut être partagé entre plusieurs fournisseurs des services qu'au niveau transport : un opérateur unique gère les OLT, et transporte jusqu'à l'abonné les données apportées au centrale par des fournisseurs de service.

Ceux-ci sont dépendants des choix technologiques, des offres et du niveau de service de l'opérateur. Le niveau d'indépendance est donc de compétitivité des fournisseurs des services y est amoindri.

### 10. Conclusion

Ce chapitre nous a donné une idée sur les réseaux optique, grâce à de tels réseaux, la transmission des informations est devenue plus rapide, facile et fiable.

Ce chapitre met en évidence l'intérêt des réseaux optiques passifs (PON), les débits, la sécurité ainsi que la confidentialité que peut offrir de tels réseaux, on a vu aussi que la technologie PON est économique en ce qui concerne l'investissement et la maintenance comme la minimisation des infrastructures.

Dans le chapitre suivant nous allons analyser la qualité de transmission d'un réseau optique passif.

## Chapitre 3

---

Etude d'une liaison

B-PON

bidirectionnelle

---

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire l'étude d'une liaison B-PON bidirectionnelle à l'aide du logiciel « OPTISYSTEM », ce logiciel permet de faire la simulation de telle liaison et d'optimiser la qualité de transmission. Dans un premier temps nous allons présenter ce logiciel, ainsi que les différents composants et éléments utilisés dans notre liaison.

Ensuite nous allons présenter les résultats obtenus avec l'architecture point à multipoint (PON), et cela en variant des paramètres de la liaison tel que le nombre d'utilisateurs, le débit, le type de modulation (NRZ, RZ), et la puissance émise. Enfin nous allons étudier l'architecture point à point et comparer les résultats avec ceux de l'architecture précédente (architecture PON).

### 3.2 Présentation du logiciel OPTISYSTEM

Les systèmes de la communication optiques présentent une complexité dans leur conception et leur simulation. Le dessin et l'analyse de systèmes incluent des composants non linéaires et des sources non Gaussienne du bruit, ce qui rend la tâche du concepteur difficile.

Afin d'aboutir à la réalisation et l'optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique haut débit, nous pouvons procéder à une méthodologie de caractérisation et de mesure sur une liaison optique. Pour cela nous utilisons un simulateur système dans le but de faciliter la tâche.

Notre système est une liaison B-PON (Broadband PON) bidirectionnelle qui se compose d'un OLT (Optical Line Terminal), d'un ONT (Optical Network Terminaison), et d'un splitter, cette liaison permet d'atteindre des débits importants qui peuvent aller jusqu'à 2.5 Gbits/s avec une bonne qualité de transmission

Notre simulateur sera le logiciel OPTISYSTEM qui nous aide non seulement à visualiser et analyser les résultats obtenus mais aussi à mesurer la qualité de transmission tout en optimisant les performances de la liaison.

#### 3.2.1 Description du logiciel OPTISYSTEM

OPTISYSTEM est un logiciel pour la simulation optique qui permet la conception, le test et l'optimisation virtuelle des liaisons optiques de tous types, il se caractérise par sa simplicité d'utilisation et par variété de sa bibliothèque de composants, c'est une application complète pour établir des simulations et des tests de montage optique.

OPTISYSTEM est une application WINDOWS, elle comprend essentiellement une fenêtre principale réparti en plusieurs parties

- Vue d'ensemble du projet : permet la visualisation miniature du lay-out en cours d'édition.
- Bibliothèque : une base de données de divers composants existants.
- Editeur du lay-out : permet l'édition et le configuration du schéma en cours de conception.
- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.

La figure 3.1 présente les sous fenêtres du logiciel OPTISYSTEM.

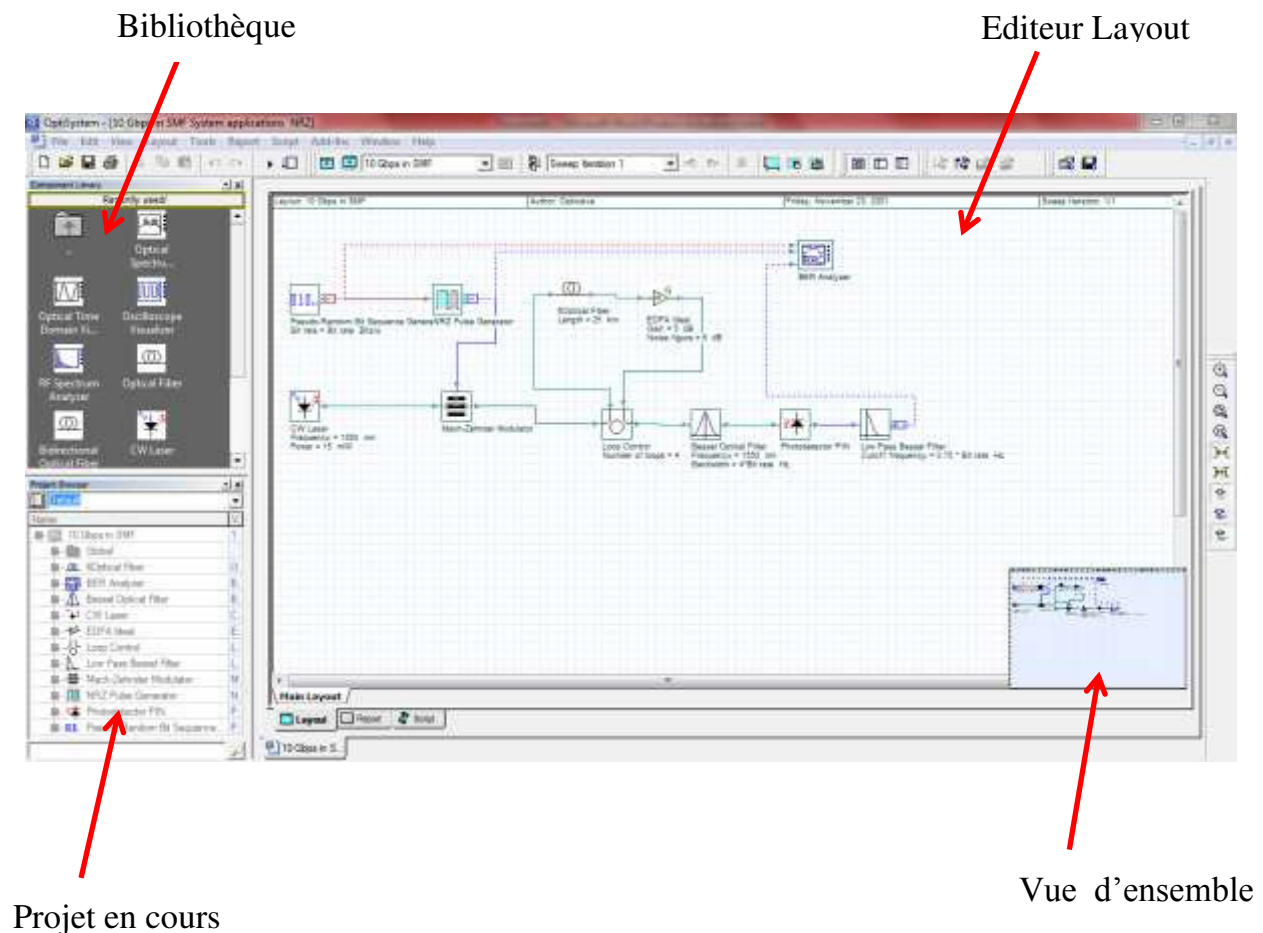


Figure 3.1 : Les sous fenêtres d'OPTISYSTEM

Afin d'utiliser un composant, il suffit de le glisser de la bibliothèque vers le layout pour le placer, OPTISYSTEM permet aussi le paramétrage pour chaque composant définie dans le layout. En effet, un double-clic sur le composant, permet l'affichage de ses paramètres (figure 3.2).

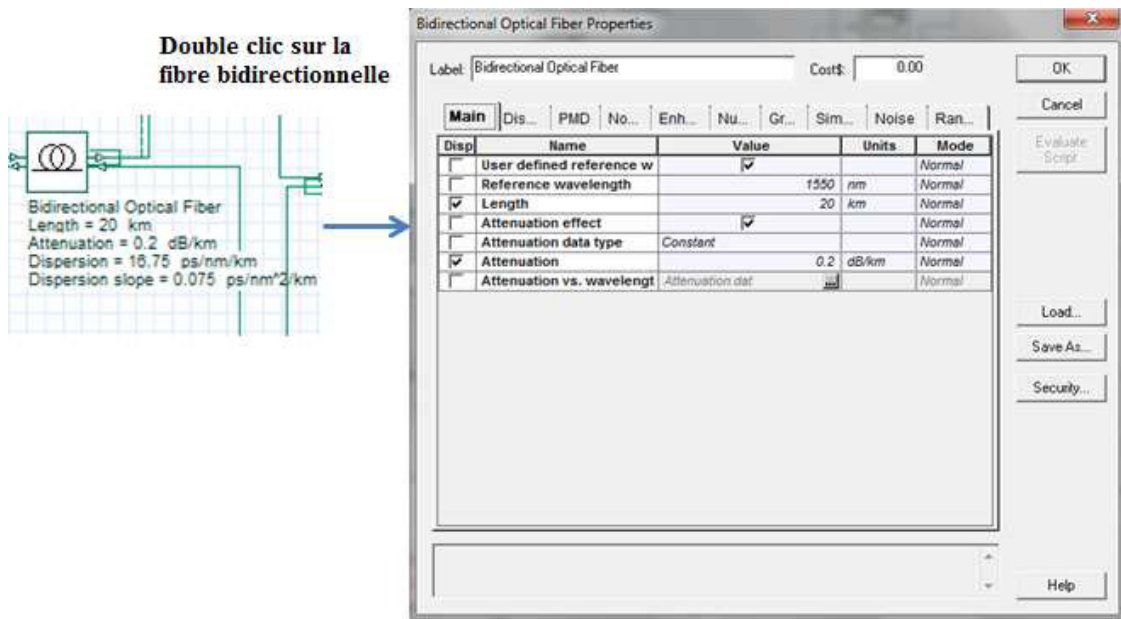


Figure 3.2 : Les paramètres de la fibre bidirectionnelle utilisée.

Au niveau de cette fenêtre (figure 3.2) on peut changer les paramètres de la fibre bidirectionnelle, tel que la longueur d'onde, la longueur de la fibre, l'atténuation et la dispersion.

### 3.3 Etude de la liaison B-PON

Notre système, le B-PON bidirectionnel contient 3 éléments essentiels : OLT (Optical Line Terminal), ONT (Optical Network Termination) et le coupleur (Splitter, dans cette liaison il existe 2 sens, le sens montant (les données partent de l'ONU vers l'OLT), et le sens descendant (les données partent de l'OLT vers l'ONU), la figure 3.3 résume les différents composants utilisés dans notre simulation.

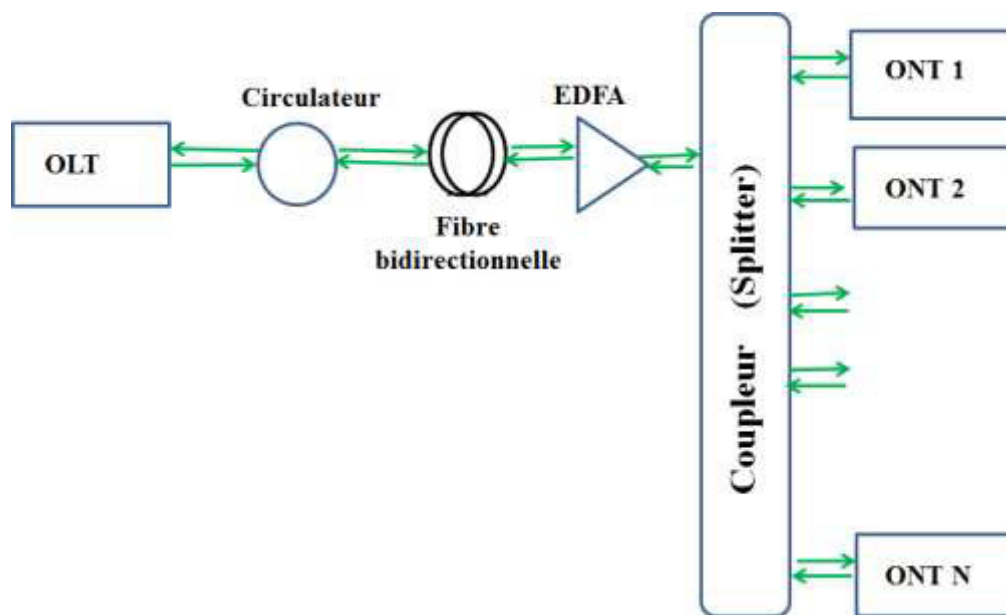


Figure 3.3 : Liaison B-PON bidirectionnelle

### 3.3.1 Description de l'OLT

La partie d'émission de notre système est un OLT (Optical Line Terminal) qui contient un transmetteur de type WDM (Wavelength Division Multiplexing), cet OLT possède une longueur d'onde de 1550nm, la puissance d'émission -3 dBm, le débit 622Mbits/s, le type de modulation est le NRZ (Non-Retour à Zéro).

La partie d'émission contient aussi une partie de réception qui provient de l'ONT (Optical Network Termination), elle contient une photodiode et un filtre de BESSEL, cette partie présente le sens descendant du système B-PON bidirectionnel.

La figure 3.6 présente l'OLT (Optical Line Terminal) de notre système (B-PON bidirectionnel).

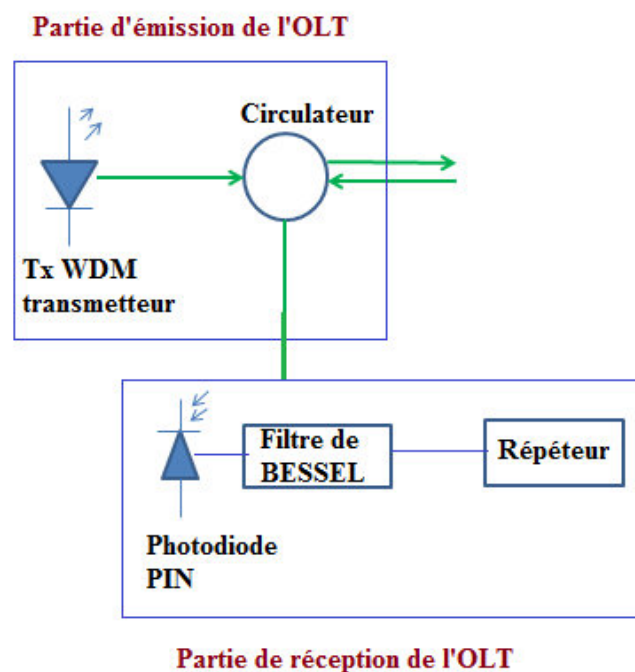


Figure 3.6 : Présentation de l'OLT

Dans ce qui suit nous allons définir les différents éléments de la liaison non abordés auparavant

#### a- Le circulateur optique

Le circulateur optique est un appareil non-réciproque qui redirige la lumière de port en port de manière séquentiel dans seulement une seule direction, il impose au signal un sens de circulation et oblige un signal à sortir par la "porte" qui suit immédiatement celle par où il est entré. Il présente une excellente isolation optique.

Le circulateur optique est utilisé dans les réseaux DWDM, amplificateurs de fibre optique et les systèmes de transmission optique bidirectionnels.



Dans notre système (B-PON) le circulateur est utilisé pour véhiculer le signal optique dans un seul sens, soit il dirige le signal dans le sens montant (de l'ONT vers l'OLT), ou bien dans le sens descendant (de l'OLT vers l'ONT).

### b- Le filtre de BESSEL

Le filtre de BESSEL désigne un type de réponse, il dispose d'un retard de groupe dans la bande passante, c'est la caractéristique de ce filtre qui le rend indispensable pour les conceptions numériques. La plupart de temps, les signaux filtrés sont des ondes sinusoïdales pour que l'effet des harmoniques soit négligé.

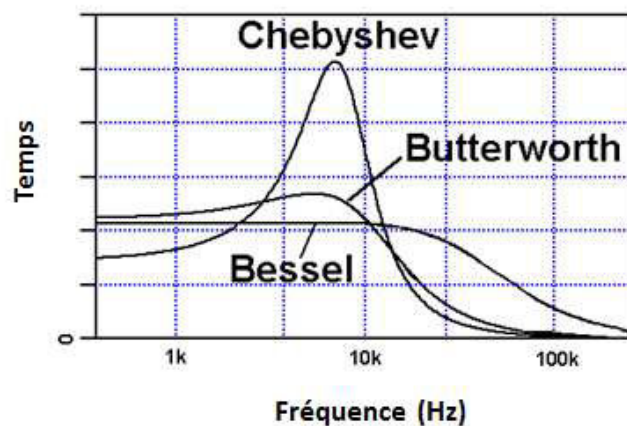


Figure 3.4 : Réponses fréquentielles de différents filtres

Le rapprochement de BESSEL a une bande passante en douceur et une réponse bande d'arrêt. Pour le même ordre de filtre, l'atténuation de bande coupée de BESSEL est beaucoup plus faible que celle de l'approximation de BUTTERWORTH.

La caractéristique du filtre est optimisée pour la phase, en effet cette caractéristique permet d'obtenir un déphasage pratiquement linéaire pour les fréquences à l'intérieur de la bande passante.

Dans notre système le filtre de BESSEL a une fréquence de coupure de 0.75 Hz, il permet de minimiser la distorsion que subit le signal optique, et d'offrir un délai constant en bande passante, c'est-à-dire que les fréquences le traverse en un temps égal,

### c- Le format NRZ (Non-Retour à Zéro)

La donnée binaire « 1 » est associée à une impulsion optique de durée égale au temps symbole (inverse du débit), la donnée « 0 » correspond à l'absence du signal. Le format NRZ est utilisé pour les débits inférieurs à 10Gbit/s, il est utilisé beaucoup dans les systèmes WDM (Wavelength Division Multiplexing) [5].

La figure 3.5 montre le codage d'une donnée (1001) en format NRZ.

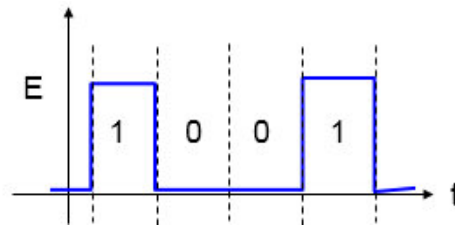


Figure 3.5 : Format NRZ

#### d- Les répéteurs

Lorsque la longueur de la liaison le nécessite, on insère un ou plusieurs répéteurs, qui contiennent des interfaces de réception et d'émission reliés par des circuits d'amplification, et de régénération pour les transmissions numériques car le signal optique aura besoin d'être régénéré (R), remis en forme (2R), et resynchronisé (3R).

Dans notre système le signal optique traverse des distances qui peuvent aller jusqu'à 200 km, c'est pour cela on insère des répéteurs, pour permettre au signal optique de parcourir des distances importante sans distorsion et affaiblissement.

#### 3.3.2 Canal de transmission

Pour ce qui concerne le canal de transmission on dispose d'une fibre optique bidirectionnelle avec les paramètres suivants : la longueur de la fibre 20 km, l'atténuation 0.2dB/km, la dispersion 16.75 ps/nm/km, et la pente de dispersion est de 0.075 ps/nm<sup>2</sup>/km.

La fibre optique est suivit d'un amplificateur dopée a l'erbium (EDFA) qui compense les pertes linéaires.

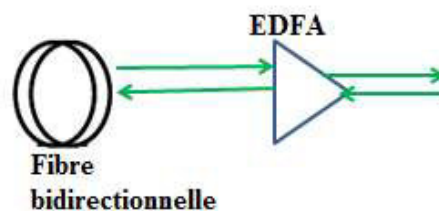


Figure 3.7 : Canal de transmission

#### 3.3.3 Description de l'ONT

Dans la structure FTTH l'abonné est représenté par ce qu'on appelle ONU (Optical Network Unit). Chaque ONU est composée d'une partie émission et d'une partie réception. Pour ce qui concerne la partie réception des ONU on trouve des composants tels que la photodiode et le filtre de Bessel. Chaque ONU est relié à un répéteur qui assurent les fonctions de régénération, remise en forme et resynchronisation du signal (figure 3.8).

L'élément ONT (Optical Network Terminaison) possède les paramètres suivants :

La longueur d'onde 1300nm, la puissance d'émission -3 dBm, le débit 622Mbit/s, et le type de modulation est le NRZ.

L'ONT est décrit sur la figure 3.8.

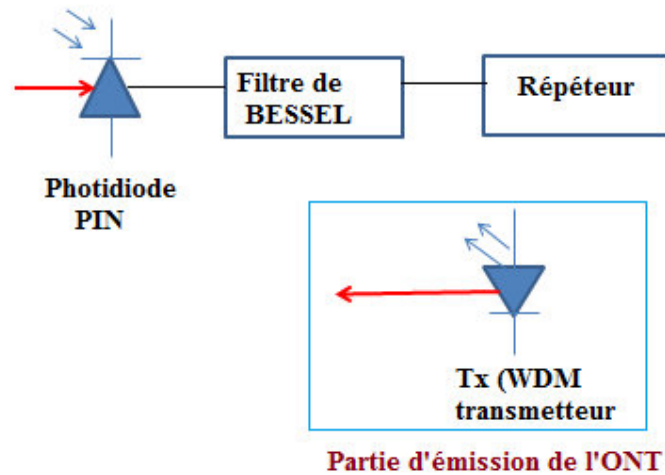


Figure 3.8 : Présentation de l'ONT

### 3.4 Qualité de transmission d'une liaison optique

Afin de connaître le bon fonctionnement d'un système, il faut mesurer la qualité de transmission, pour cela il y'a trois critères principaux qui sont : le facteur de qualité, le taux d'erreur binaire et le diagramme de l'œil.

#### 3.4.1 Le facteur de qualité

Le facteur de qualité, appelé facteur Q, est un paramètre permettant de caractériser la qualité d'un signal.

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\delta_1 - \delta_2} \quad (3.1)$$

Où  $I_1$  et  $I_0$  sont les valeurs moyennes des photo-courants des symboles 1 et 0,  $\delta_1$  et  $\delta_2$  les racines carrées des variances des densités de probabilité des symboles 1 et 0. La mesure expérimentale du facteur Q d'un signal est difficile c'est-à-dire  $I_1$ ,  $I_0$ ,  $\delta_1$  et  $\delta_2$ , ne sont souvent pas directement mesurables.

Afin de résoudre ce problème, on peut utiliser la relation du TEB (Taux D'erreur Binaire) optimal en fonction du facteur Q à condition des distributions gaussiennes de probabilités des niveaux du signal :

$$\text{TEB} = \frac{1}{2} \left[ \text{erf} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (3.2)$$

Avec **erf** est la fonction d'erreur complémentaire.

### 3.4.2 Le taux d'erreur binaire

Puisque dans un système de communication il y'a une transmission de données numériques, c'est-à-dire une succession de 0 et de 1, le critère pour juger la caractérisation de la qualité du signal transmis est le taux d'erreurs binaire, ou BER (Bit Error Ratio). Du fait du bruit et des effets de propagation, le signal se déforme et il peut arriver qu'un 1 soit détecté en lieu et place d'un 0 ou réciproquement. Le BER représente la probabilité d'une prise de décision erronée sur un élément binaire. Il se définit comme suit :

$$\text{TEB} = \frac{\text{Nombre de bits envoyés}}{\text{Nombre de bits reçus}} \quad 3.3$$

Un système est généralement considéré de bonne qualité en télécom optique si ce BER est inférieur à une valeur de  $10^{-9}$ ,  $10^{-12}$  ou  $10^{-15}$  suivant les systèmes.

### 3.4.3 Le diagramme de l'œil

La façon visuelle pour estimer la qualité d'un signal est d'observer le diagramme de l'œil qui représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise (figure 3.9).

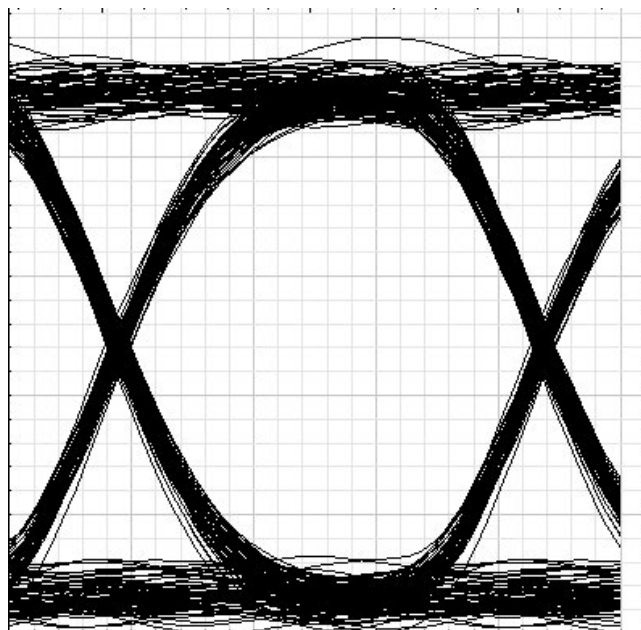


Figure 3.9 : Le diagramme de l'œil

- Interférences entre symboles qui sont la conséquence principale de l'élargissement temporel des impulsions du signal due à la dispersion chromatique
- Bruit d'amplitude qui résulte de l'accumulation du bruit d'émission amplifiée sur le signal tout au long de son parcours dans la liaison.

- Gigue temporelle provoqué par la dispersion mais également du couplage entre les impulsions et le bruit d'émission amplifiée.

### 3.5 Résultats de simulation

L'EDFA, le nombre d'utilisateurs, variation du débit, le type du code utilisé, variation de puissance par utilisateur.

#### 3.5.1 Effet de l'EDFA

Dans cette partie on va comparer la qualité de transmission avec et sans l'amplificateur dopée à l'erbium EDFA.

##### a- Sans EDFA

Dans ce qui suit on va utiliser notre système sans l'utilisation de l'amplificateur dopée à l'erbium (EDFA), la figure 3.10 présente la qualité de transmission en fonction de la distance entre l'OLT et le coupleur

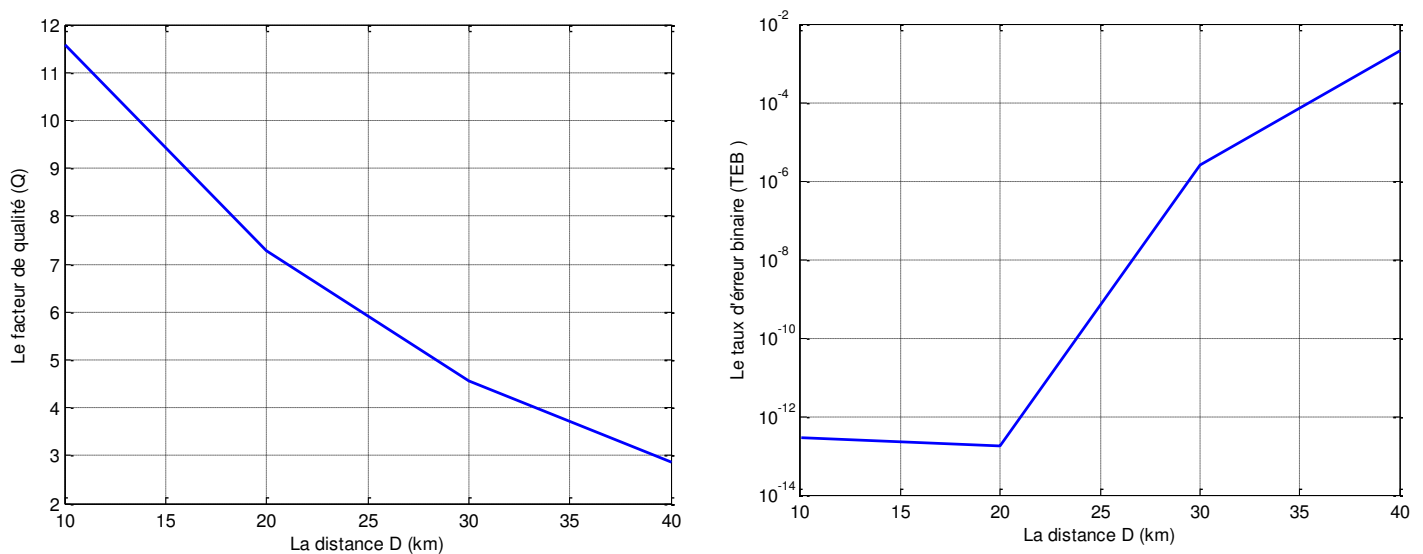


Figure 3.10 : Qualité de transmission en fonction de la distance sans EDFA

D'après les figures 3.10 on remarque que sans l'utilisation d'amplificateur EDFA la distance maximale atteinte est 22 km ce qui correspond à un taux d'erreur binaire de  $10^{-10}$  et un facteur de qualité de 6.6, ce taux d'erreur ainsi que le facteur de qualité seront considérés comme référence pour la suite. Pour une bonne qualité de transmission, maintenant on rajoute l'EDFA et on compare les résultats.

**b- Avec EDFA**

Dans cette partie on rajoute l'amplificateur dopé à l'erbium (EDFA), et on compare avec le cas précédent (sans EDFA). Les résultats sont présentés sur les figures 3.11.

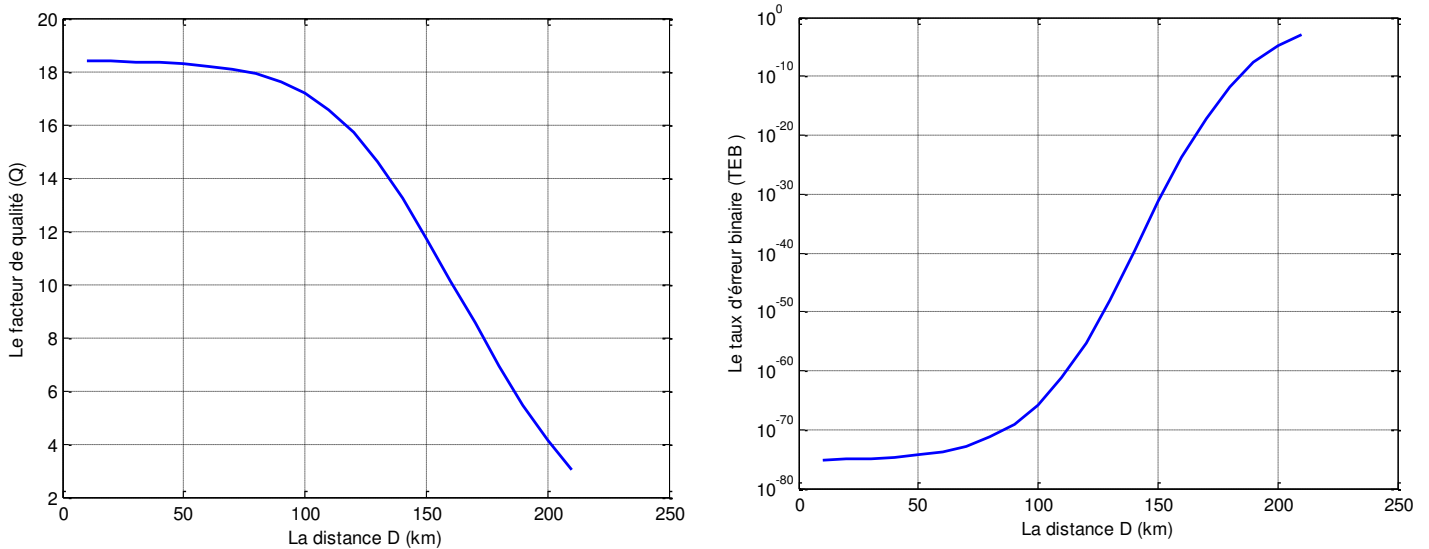


Figure 3.11 : Qualité de transmission en fonction de la distance avec EDFA

Les figures 3.11 montrent bien qu'en utilisant l'amplificateur dopé à l'erbium EDFA la distance maximale atteinte est de l'ordre de 160 km, largement plus importante que les 22 km du système sans EDFA.

Les figures 3.12, 3.13 montrent une comparaison du facteur de qualité ainsi que le taux d'erreur binaire avec et sans EDFA.

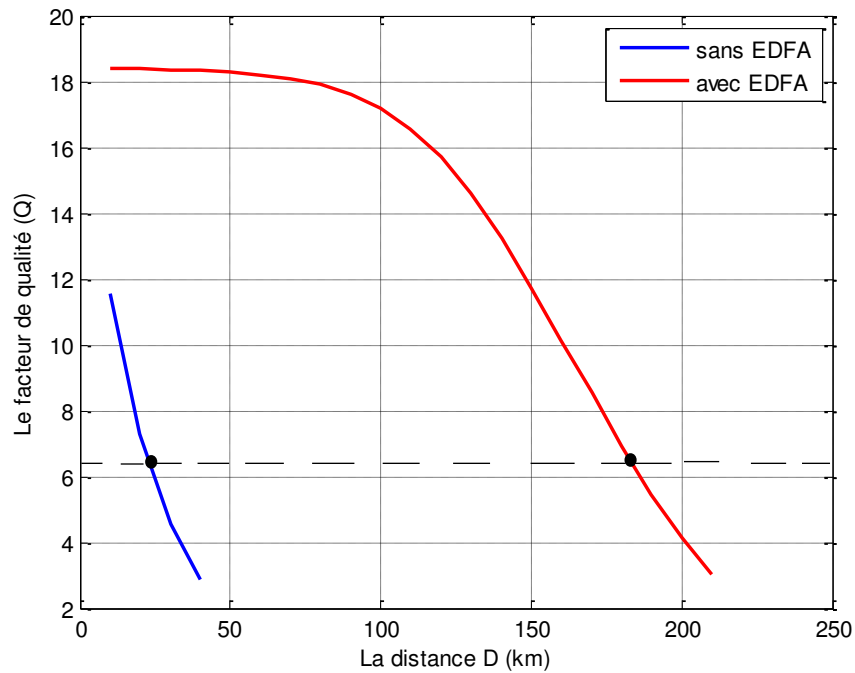


Figure 3.12 : Comparaison du facteur de qualité en fonction de la distance avec et sans EDFA

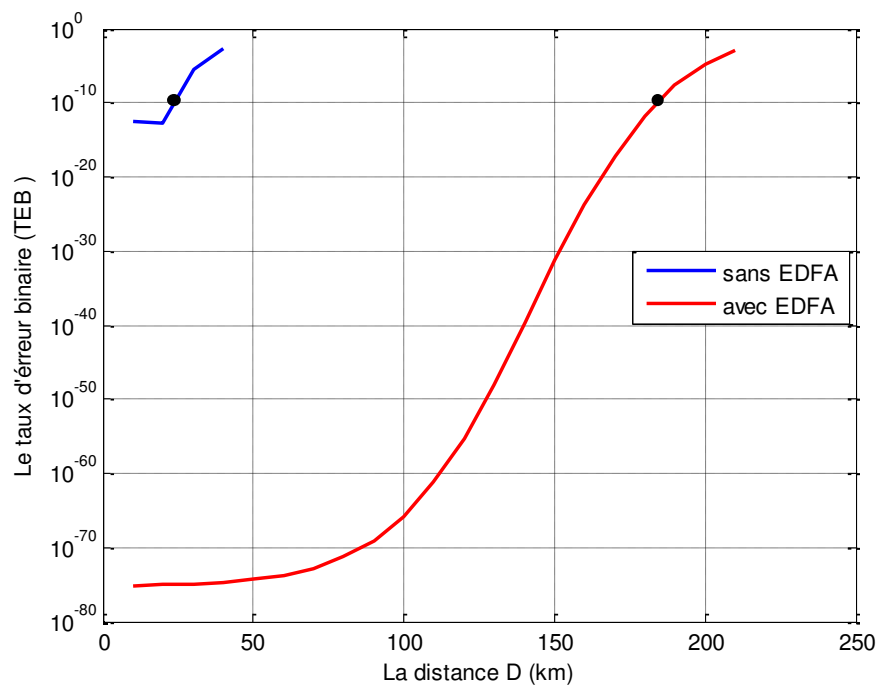


Figure 3.13 : Comparaison du taux d'erreur binaire en fonction de la distance avec et sans EDFA

D'après les figures 3.12, 3.13 on conclut qu'il est nécessaire d'ajouter un amplificateur EDFA pour améliorer les paramètres : facteur de qualité, taux d'erreur binaire et donc la qualité de transmission de la liaison optique, l'EDFA nous permet d'atteindre des distances importantes dans de telles liaisons.

### 3.5.2 Effet de variation du débit et du nombre d'utilisateurs

On va faire varier dans ce qui suit le débit dans le sens montant et le débit dans le sens descendant, ainsi que le nombre d'utilisateurs et voir l'influence de ces paramètres sur la qualité de transmission.

#### 3.5.2.1 8 utilisateurs

Dans cette partie, on a 8 utilisateurs, la longueur de la fibre varie de 20 à 200km, et les débits utilisés sont respectivement 622 Mbits/s (pour la catégorie APON), 1244 Mbits/s (pour le BPON), 1 Gbits/s (Pour la catégorie EPON et BPON), 1.25Gbits/s dans le sens montant et 2.5Gbits/s dans le sens descendant (pour la catégorie GPON). Les résultats sont présentés sur les figures 3.14, 3.15.

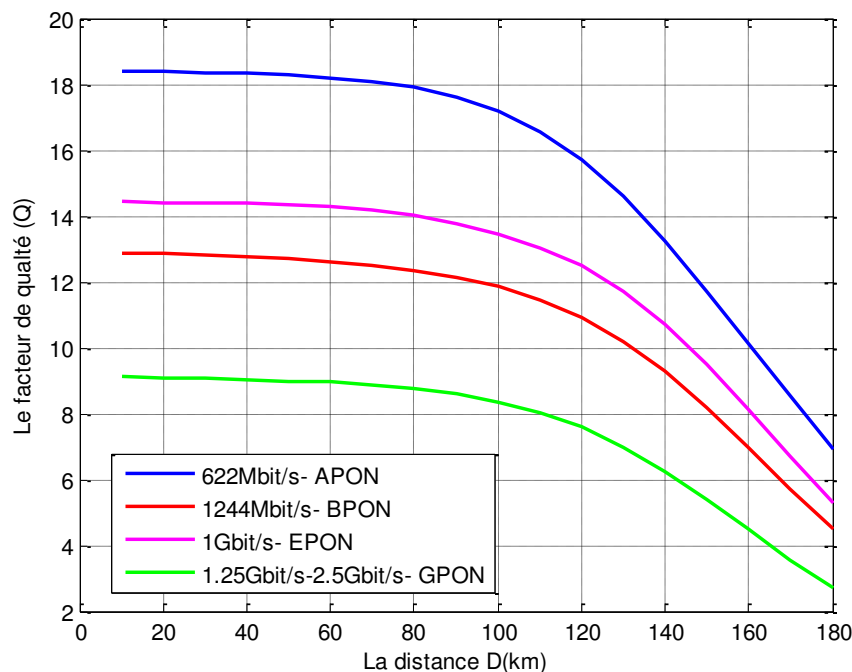


Figure 3.14: Effet du débit et de la distance sur le facteur de qualité



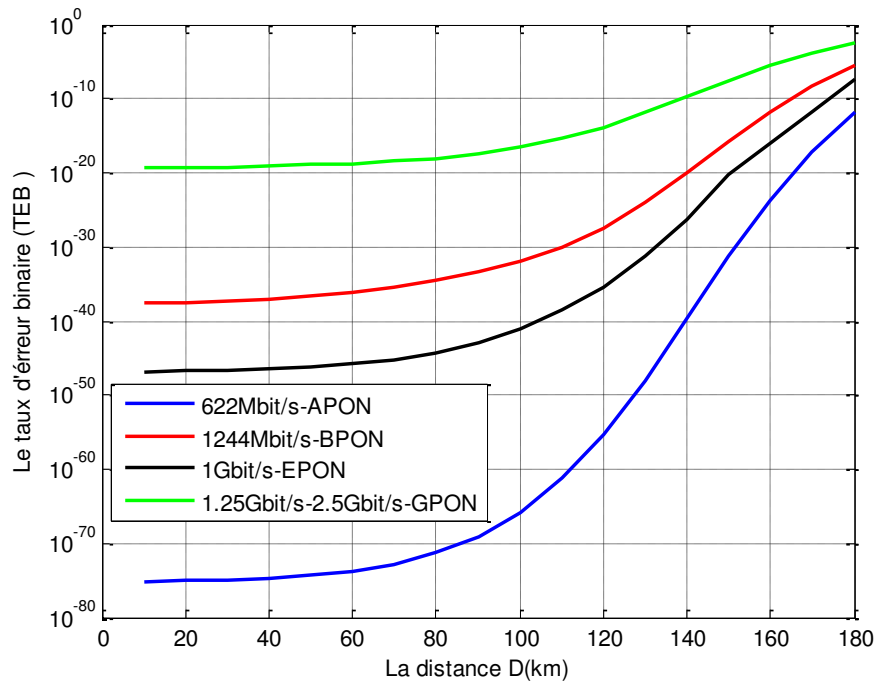


Figure 3.15 : Effet du débit et de la distance sur le taux d'erreur binaire

Les figures 3.14, 3.15 montrent une diminution du facteur de qualité en fonction de la distance, ainsi qu'une augmentation du taux d'erreur binaire et cela quel que soit le débit.

Dans un premier temps on constate une meilleure qualité de transmission pour l'APON (ATM PON-622 Mbit/s) par rapport aux autres catégories, et cette qualité se détériore en augmentant le débit, que ce soit dans le sens montant ou le sens descendant.

Ensuite on remarque que pour les 3 autres cas BPON (Broadband PON), EPON (Ethernet PON), et GPON (Gigabit capable PON), on obtient une qualité de transmission acceptable ( $TEB < 10^{-10}$ ) pour une distance variant entre 160km et 180km.

### 3.5.2.2 16 utilisateurs

Nous allons procéder de la même manière que précédemment, mais en utilisant un nombre d'utilisateurs de 16 au lieu de 8, les résultats sont présentés sur les figures 3.16, 3.17.

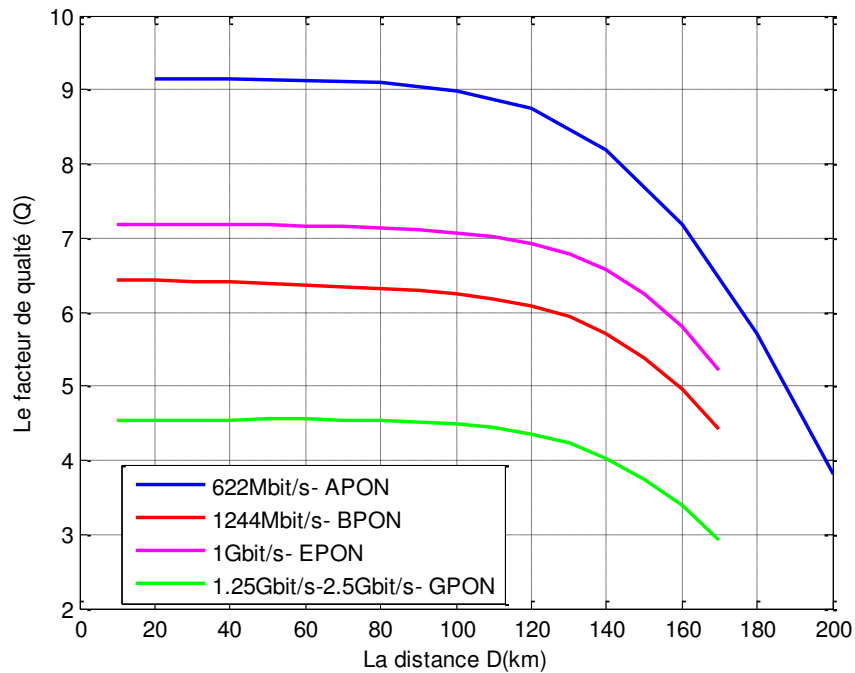


Figure 3.16 : Effet du débit et de la distance sur le facteur de qualité

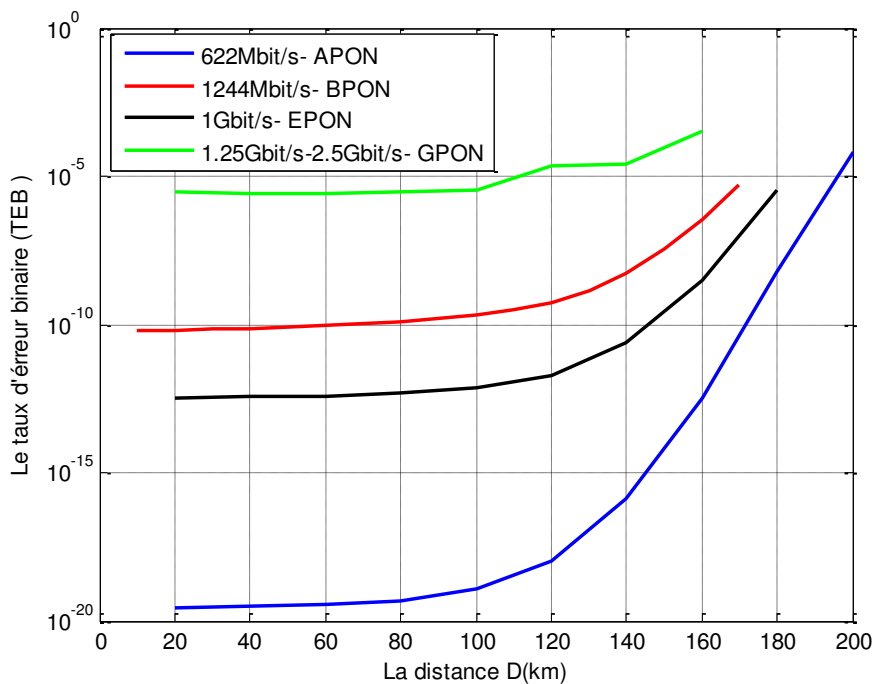


Figure 3.17 : Effet du débit et de la distance sur le taux d'erreur binaire

La première remarque que l'on peut faire c'est que les résultats obtenus avec 16 utilisateurs, ne sont pas les mêmes que pour 8 utilisateurs, dans le sens où le taux d'erreur binaire est supérieur pour 16, prouvant ainsi que la qualité se détériore avec le nombre d'utilisateurs.

La deuxième remarque est la même que pour la partie précédente, à savoir que la qualité de transmission est réduite dès qu'on augmente le débit que ça soit dans le sens montant ou le sens descendant.

Enfin la dernière remarque concerne la distance entre l'émetteur et le récepteur pour avoir une bonne qualité de transmission, elle est de 60km pour 1244Mbit/s, de 150km pour 1Gbit/s, et de 170km pour 622Mbit/s.

### 3.5.2.3 32 utilisateurs

On passe maintenant à un nombre d'utilisateurs de 32. Les résultats sont présentés sur les figures 3.18, 3.19.

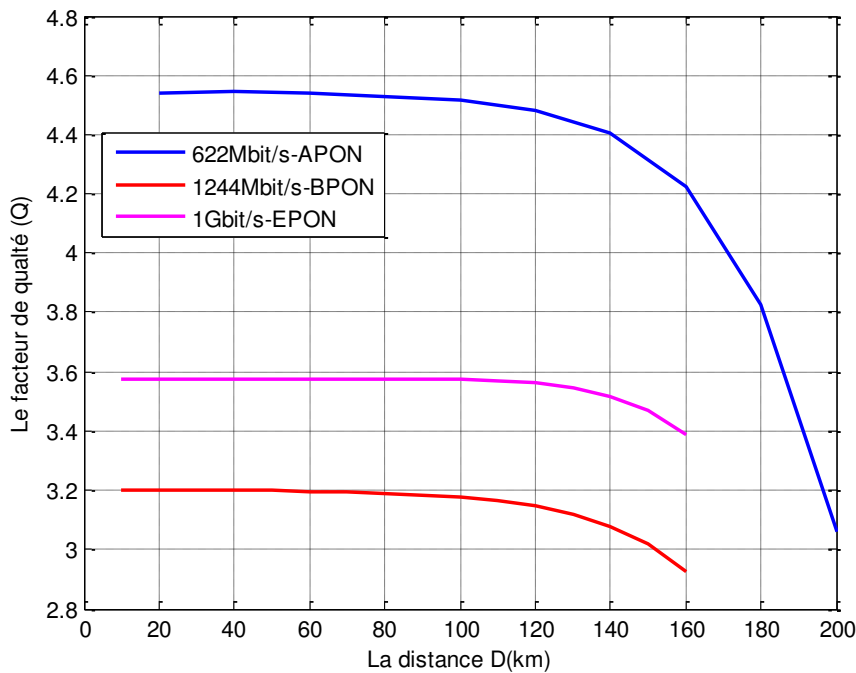


Figure 3.18 : Effet du débit et de la distance sur le facteur de qualité

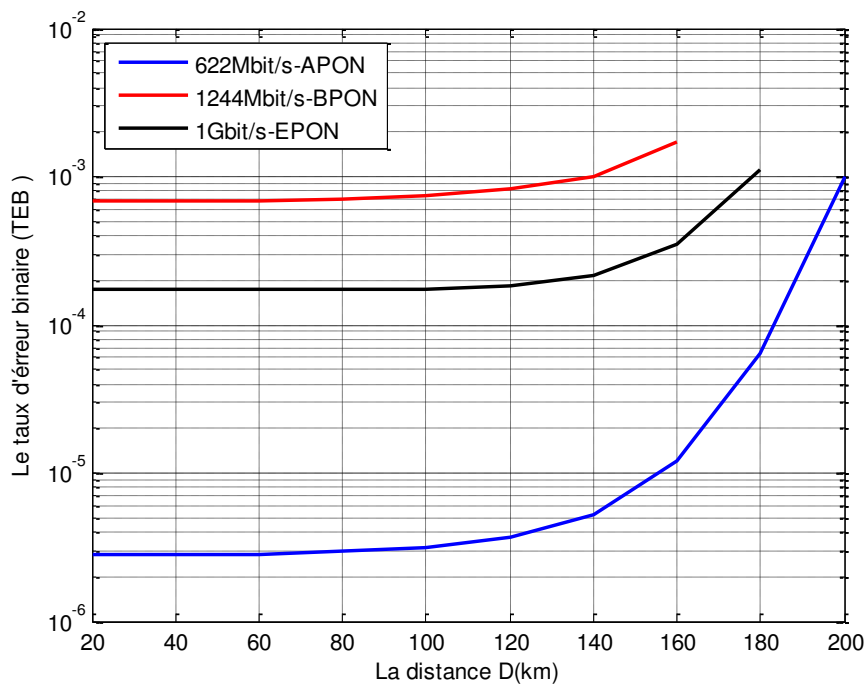


Figure 3.19: Effet du débit et de la distance sur le taux d'erreur binaire

Tout d'abord pour le cas 1.25Gbit/s montant et 2.5 Gbit/s descendant le taux d'erreur est maximale, donc on n'a pas présenté ces résultats sur la figure 3.19. Ensuite d'après cette figure (3.19), pour toutes les distances et tous les débits de cette liaison, on constate la même chose pour la qualité de transmission non seulement elle se dégrade en fonction de la distance mais aussi elle n'est pas bonne pour tous les débits utilisés.

Donc on conclut que le cas de 8 utilisateurs offre un meilleur résultat du point de vue de qualité de transmission et du taux d'erreur binaire pour une distance allant jusqu'à 140 km voir 160km.

### 3.5.3 Codage RZ / Codage NRZ

Dans ce qui suit on va utiliser 2 codes RZ et NRZ et on va effectuer un comparatif en changeant le nombre d'utilisateurs.

#### a- Format RZ

Dans ce format, l'impulsion associée à la donnée « 1 » est de durée inférieure au temps symbole, la donnée « 0 » correspond à l'absence de signal. C'est un format utilisé pour les débits élevés (au-delà de 10Gbit/s) [5]. La figure 3.20 présente le codage de la donnée (1001)

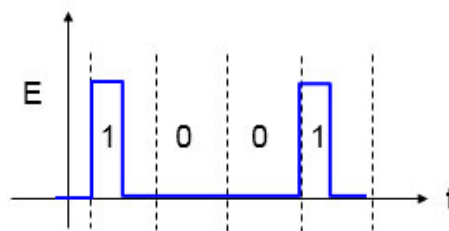


Figure 3.20 : Format RZ

#### 3.5.3.1 8 utilisateurs

Pour ce qui concerne la comparaison entre RZ et NRZ avec 8 utilisateurs, on obtient les résultats présentés sur les figures 3.21, 3.22

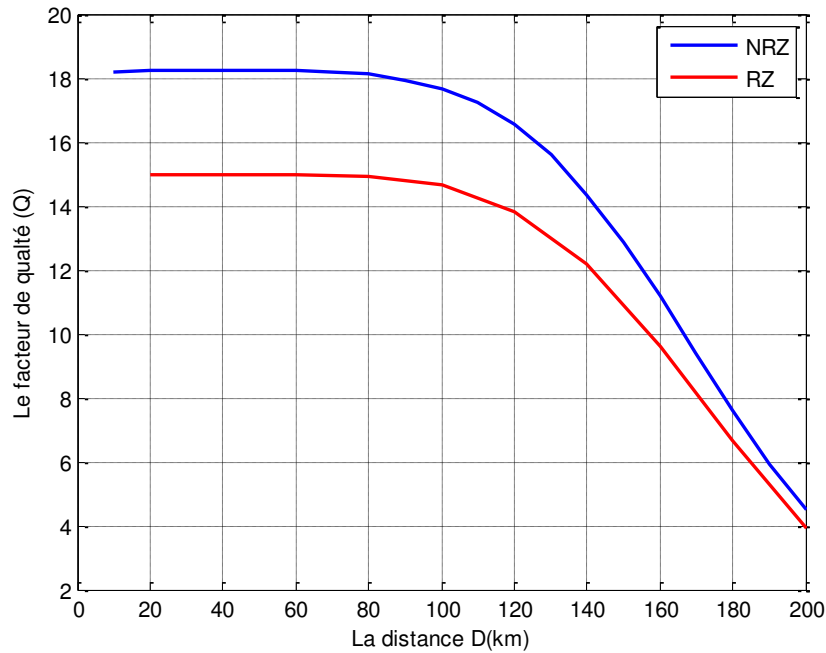


Figure 3.21 : Comparaison du facteur de qualité RZ/NRZ en fonction de la distance

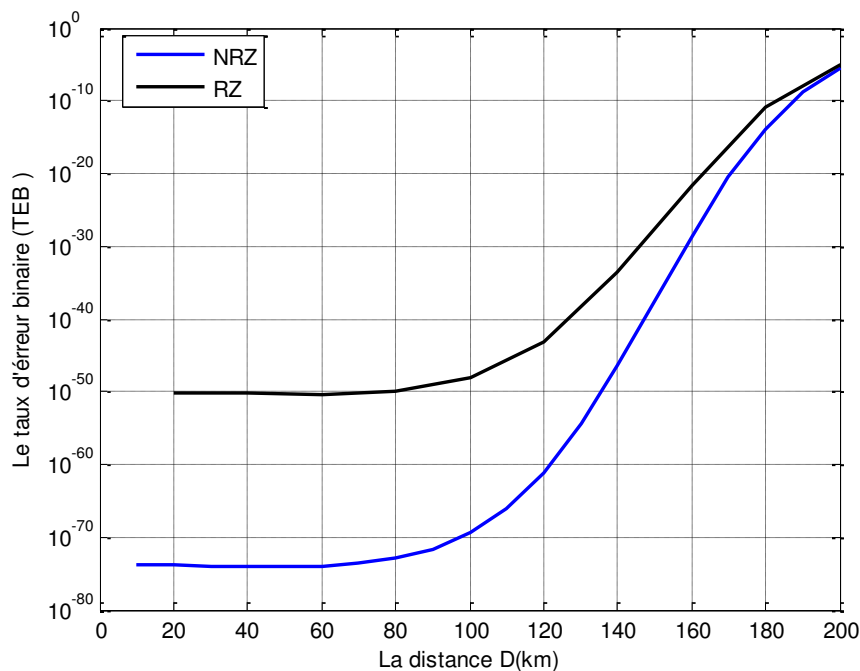


Figure 3.22 : Comparaison du taux d'erreur RZ/NRZ en fonction de la distance

D'après les figures 3.21, 3.22 on remarque que le taux d'erreur binaire pour le type NRZ est meilleur que celui de RZ, à titre de comparaison pour une distance de 80km, le TEB du type NRZ est égal à  $10^{-73}$ , alors que pour RZ il est de  $10^{-50}$ .

On note une dégradation de la qualité de transmission en fonction de la distance, ou on obtient une distance maximale de 180 km pour RZ et 190 km pour NRZ (le TEB= $10^{-10}$ ).

### 3.5.3.2 16 utilisateurs

Pour ce qui concerne la comparaison entre RZ et NRZ avec 16 utilisateurs, on obtient les résultats présentés sur les figures 3.23 et 3.24

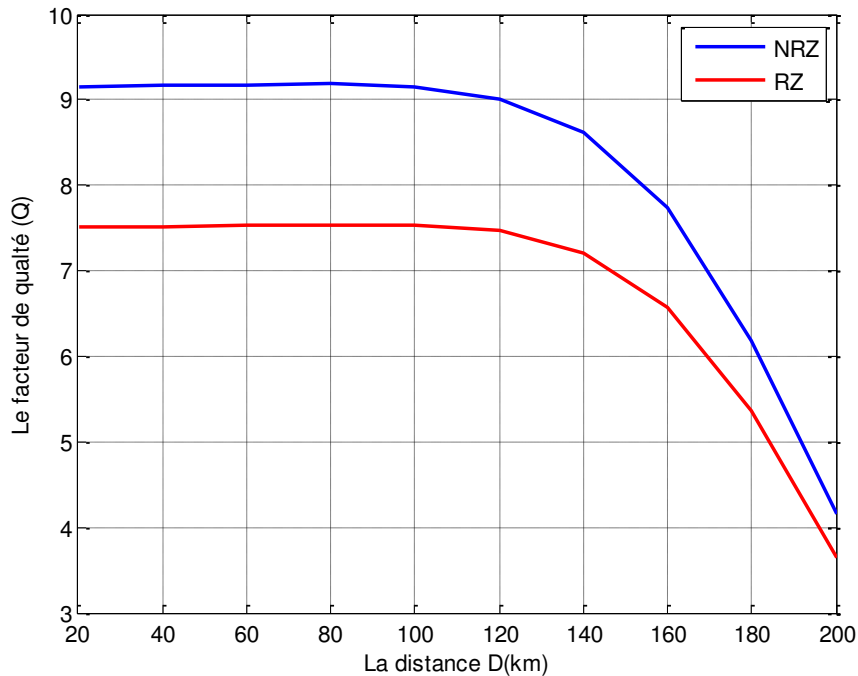


Figure 3.23 : Comparaison du facteur de qualité RZ/NRZ en fonction de la distance

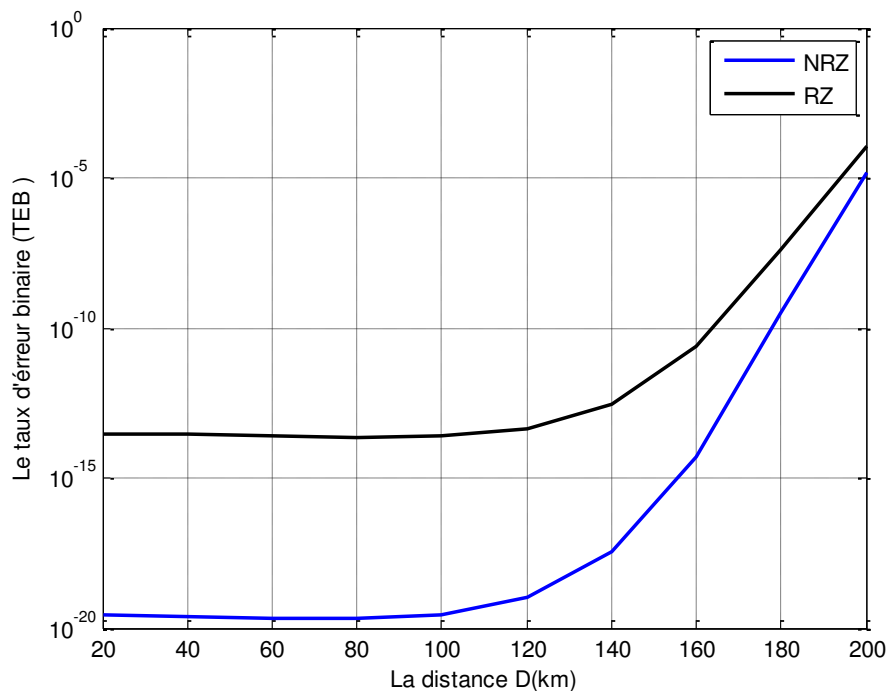


Figure 3.24 : Comparaison du taux d'erreur binaire RZ/NRZ en fonction de la distance

Les mêmes remarques peuvent être faites avec 16 utilisateurs, à savoir que NRZ donne de meilleurs résultats que RZ. La distance maximale est 140 km pour RZ et 170 km pour NRZ.

### 3.5.3.3 32 utilisateurs

Pour ce qui concerne la comparaison entre RZ et NRZ avec 32 utilisateurs, on obtient les résultats présentés sur les figures 3.25 et 3.26

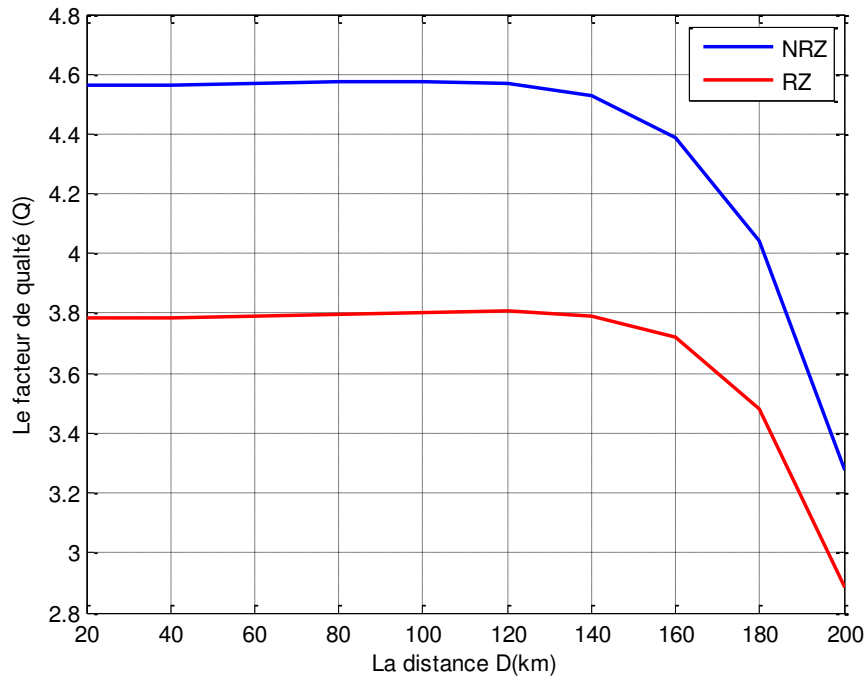


Figure 3.25 : Comparaison du facteur de qualité RZ/NRZ en fonction de la distance

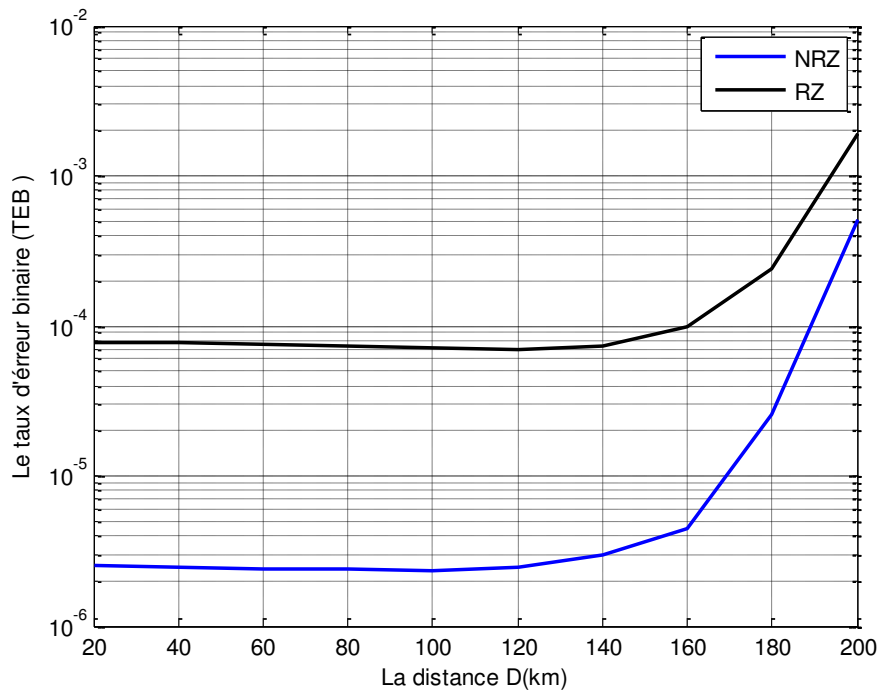


Figure 3.26 : Comparaison du taux d'erreur binaire RZ/NRZ en fonction de la distance

La remarque principale qu'on peut faire est que la qualité de transmission est mauvaise, et cela quel que soit la distance, et qu'il n'est pas souhaitable d'avoir 32 utilisateurs, car dans tous les cas on a un TEB supérieur à  $10^{-10}$ .

### 3.5.4 Effet de variation de puissance par utilisateurs

Dans la partie précédente on avait fixé la puissance totale à 0.5 mW pour 8, 16, 32 utilisateurs. On a noté qu'il y a une dégradation importante de la qualité de transmission quand le nombre d'utilisateurs augmente.

Pour corriger ce défaut on va fixer la puissance par utilisateurs à 0.0625 mW et on va faire la même étude (facteur de qualité et taux d'erreur binaire en fonction de la distance). Les résultats sont présentés sur les figures 3.27 et 3.28.

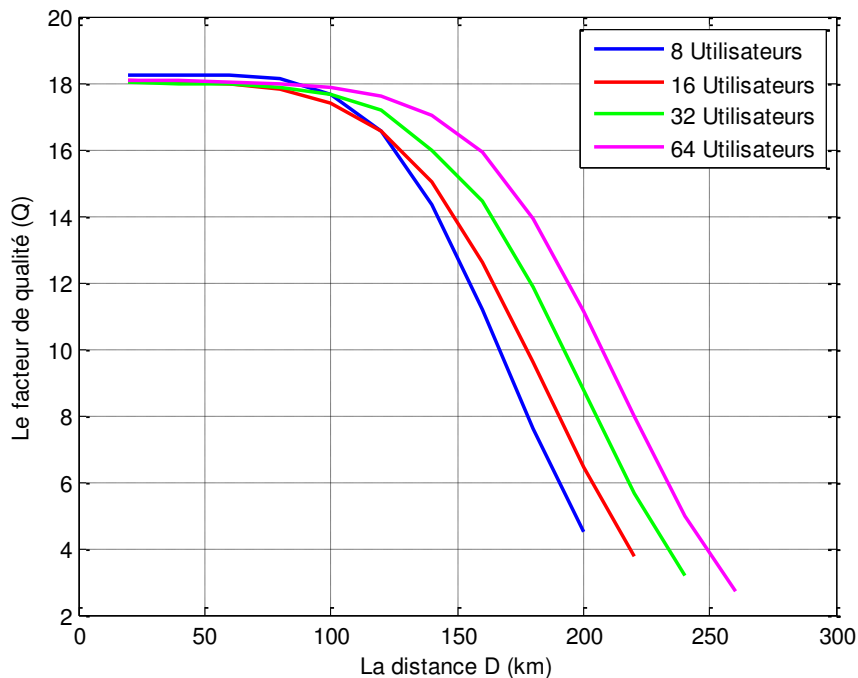


Figure 3.27 : Facteur de qualité en fonction de la distance



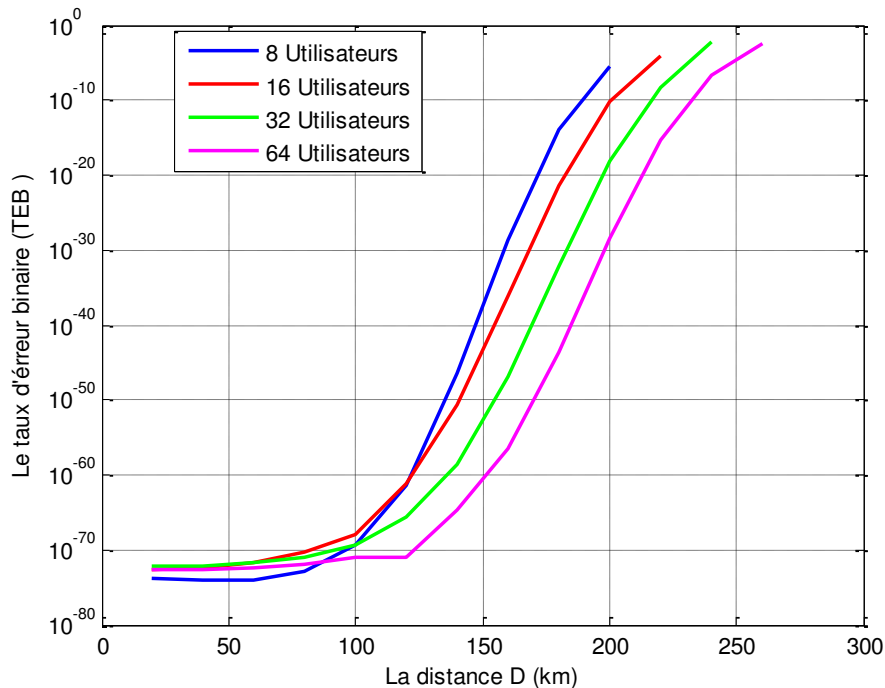


Figure 3.28 : Taux d'erreur binaire en fonction de la distance

On note sur les figures ci-dessus une nette amélioration du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire, notamment quand le nombre d'utilisateurs est important (16, 32, 64). Une autre remarque importante est le fait qu'on obtient les meilleurs résultats pour 32 et 64 utilisateurs.

Une question se pose, pourquoi ne pas augmenter indéfiniment le nombre d'utilisateurs à 128, 256,.... Il faut savoir que la puissance déployé pour ces configurations est assez importante et qu'on ne peut pas dépasser une certaine puissance, donc il faudrait faire un compromis nombre d'utilisateurs / puissance émise pour le choix du réseau utilisé.

### 3.5.5 Architecture point à point

Le point-a-point est l'architecture la plus simple à mettre en œuvre parmi les topologies physiques du réseau d'accès optique (figure 3.29). Elle consiste à avoir un lien physique en fibre optique directement entre le central et l'abonné (généralement bi-fibre).

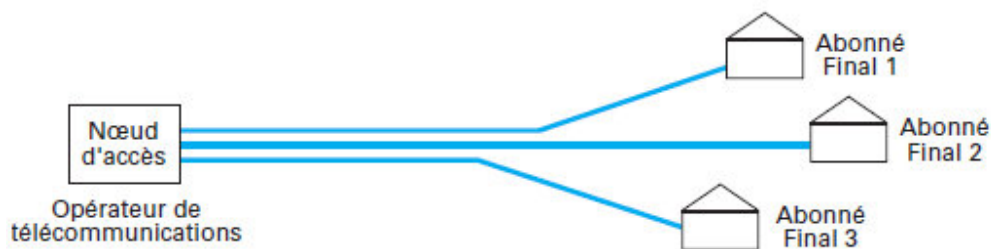


Figure 3.29 : Architecture point à point

Dans la structure point à point il n'y a pas de composant optique entre l'OLT (Optical Line Terminal) et l'ONT (Optical Network Terminaison), cette architectures permet d'atteindre des distances importantes avec des débits qui peuvent aller jusqu'à 10Gbit/s.

Dans cette partie, on a utilisé un seul utilisateur, on a fixé les distances de 10km à 180km, et on a varié les débits à chaque fois. Le système point à point utilisé est présenté sur la figure 3.30.

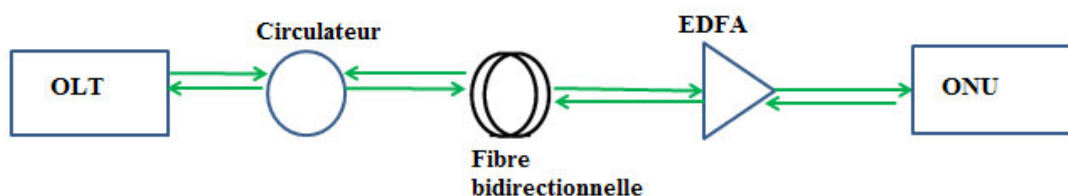


Figure 3.30 : La structure point à point dans OPTISYSTEM

En variant le débit on obtient les résultats présentés sur les figures 3.31 et 3.32.

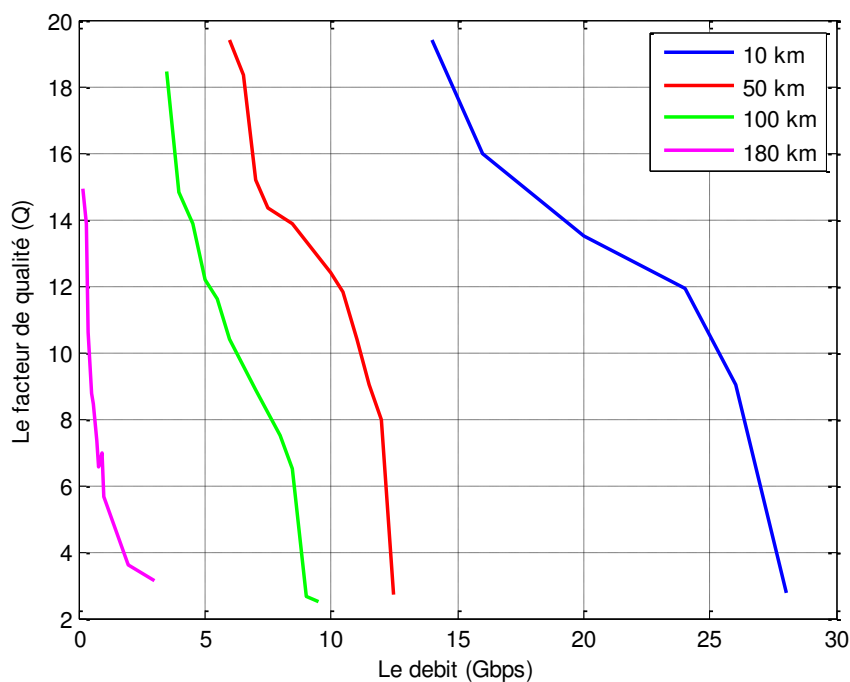


Figure 3.31 : Facteur de qualité en fonction du débit

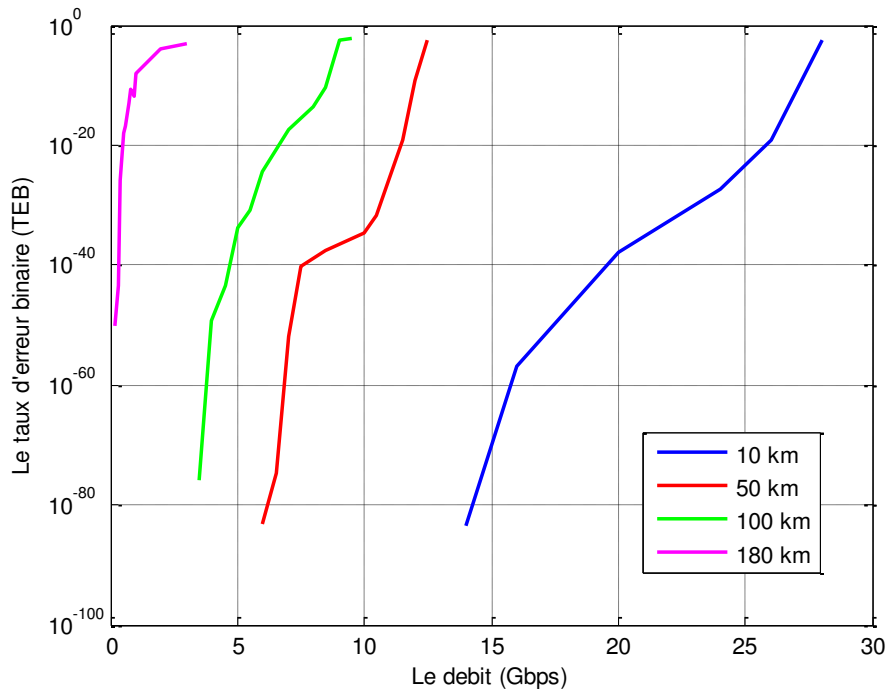


Figure 3.32 : Taux d'erreur binaire en fonction du débit

La première remarque est la forte dégradation de la qualité de transmission avec l'augmentation du débit pour les 4 distances. La deuxième remarque concerne les débits atteints avec chaque distance qui sont de 4 Gbit/s pour 180 km, 6 Gbit/s pour 100 km, 13.5 Gbit/s pour 50 km, et 28 Gbit/s pour 10 km.

Une autre courbe peut être intéressante à tracer c'est le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire en fonction de la distance en fixant le débit à 1 Gbit/s dans un premier temps et 10 Gbit/s dans un second temps. Les résultats sont présentés sur les figures 3.33 et 3.34.

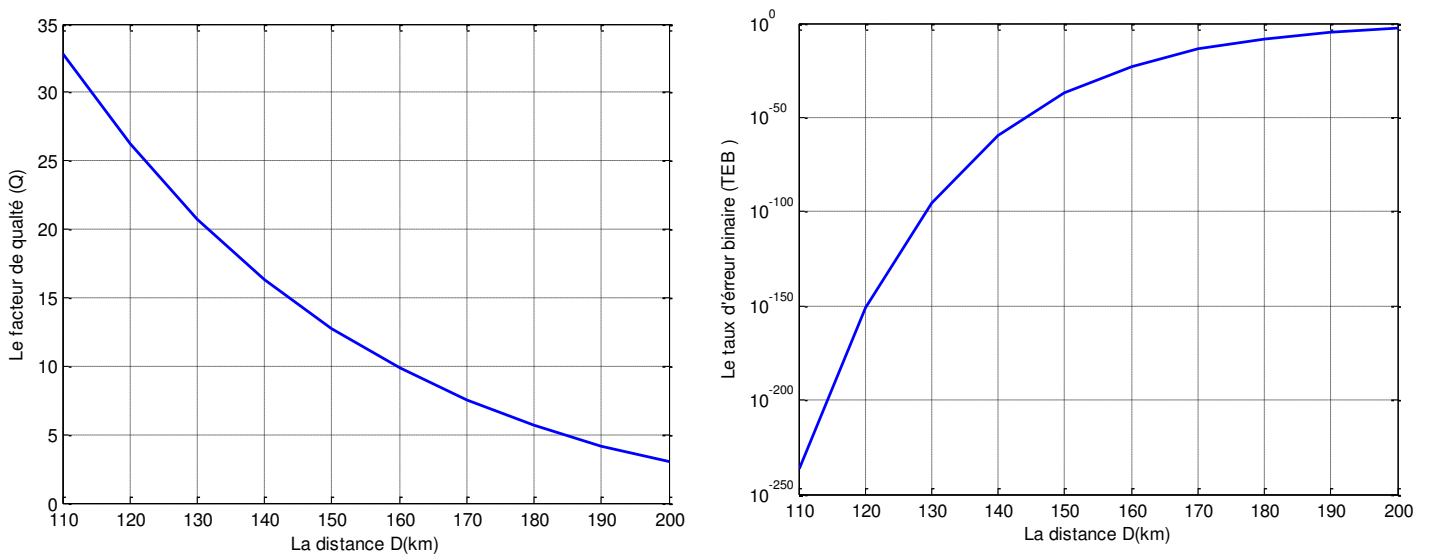


Figure 3.33 : Qualité de transmission en fonction de la distance (1 Gbit/s)

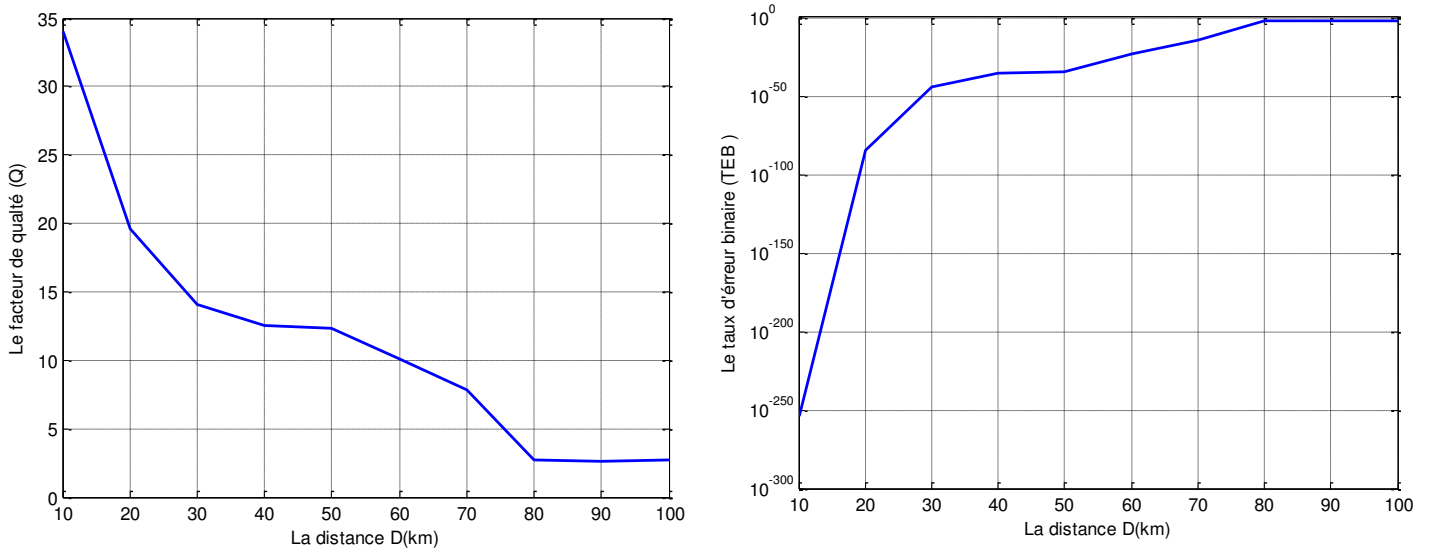


Figure 3.34 : Qualité de transmission en fonction de la distance (10 Gbit/s)

On note que la distance maximale avec le débit 1 Gbit/s est 170 km alors qu'avec 10 Gbit/s elle est de 70 km. Dans ce cas il faut faire un compromis entre distances / débits et voir les besoins pour le choix des paramètres de la liaison.

### 3.5.6 Comparaison entre l'architecture PON et l'architecture Point à Point

Nous allons maintenant fixer une distance de 100 km et tracer la courbe de qualité de transmission en fonction du débit et cela pour l'architecture point à multipoint (PON) et l'architecture point à point, les résultats sont présentés sur les figures 3.35 et 3.36.

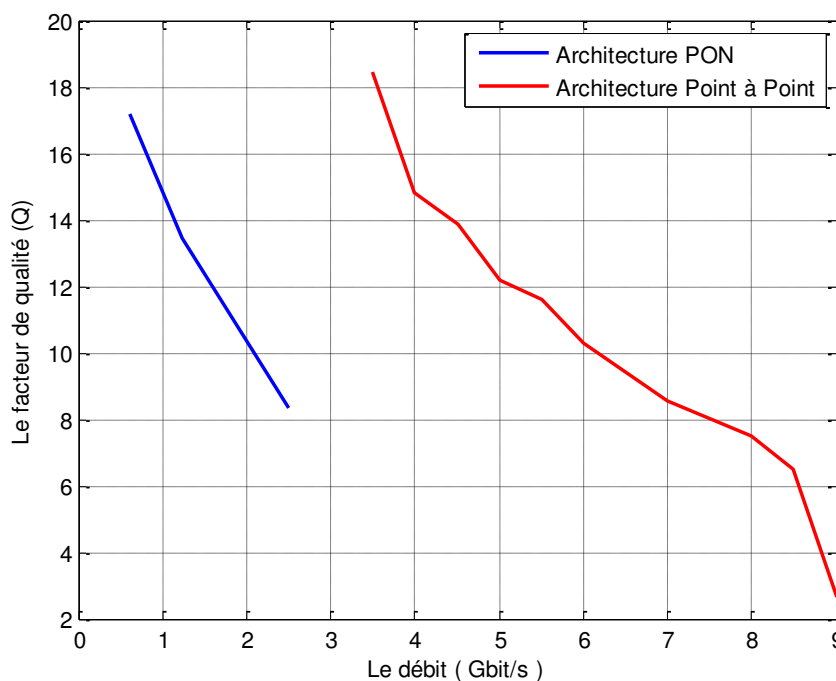


Figure 3.35 : Comparaison de facteur de qualité en fonction du débit pour 100 km

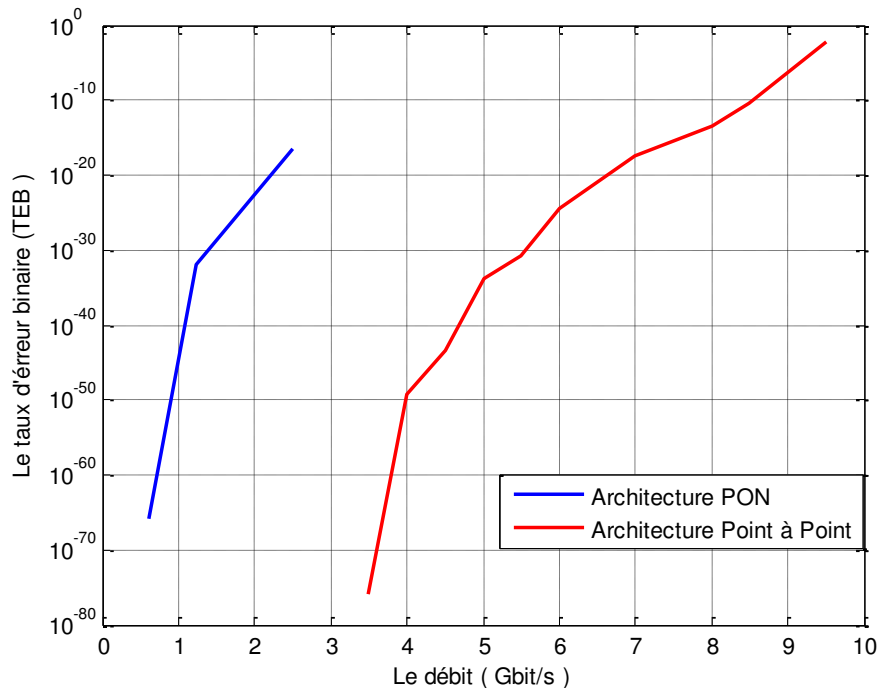


Figure 3.36 : Comparaison du taux d'erreur binaire en fonction du débit pour 100 km

D'après les figures 3.35 et 3.36 on remarque que les débits atteints avec l'architecture point à point sont importants (environ 28 Gbit/s) avec une bonne qualité de transmission alors que le débit maximal avec l'architecture point à multipoints (PON) est de l'ordre de 2.5 Gbit/s, donc l'architecture qui répond le mieux au besoin des télécom optique en terme de débit et qualité de transmission est l'architecture point à point, mais cette architecture demande un coût assez élevé.

### 3.6 Conclusion

Lors de notre étude de la liaison B-PON bidirectionnelle, on a remarqué que plusieurs paramètres peuvent influencer sur la qualité de transmission en termes de débit. Le premier est l'amplificateur optique dopée à l'erbium (EDFA), on a constaté que son utilisation permet d'atteindre des distances importantes et d'améliorer la qualité de transmission. Après on a joué sur le nombre d'utilisateurs et les débits, on a utilisé les débits suivants 622Mbit/s, 1244Mbit/s, 1Gbit/s, 1.25Gbit/s (dans sens montant), et 2.5Gbit/s (dans le sens descendant) qui correspondent, respectivement aux catégories suivantes APON, BPON, EPON, GPON. On a remarqué qu'en augmentant le nombre des utilisateurs et les débits, le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire se détériorent, et que le meilleur résultat est obtenu avec 8 utilisateurs, car la qualité de transmission est meilleure et cela pour toutes les catégories.

Ensuite on a fait une comparaison entre le code RZ et le code NRZ pour 8, 16, 32 utilisateurs. Dans tous les cas on a trouvé que le NRZ donne de meilleurs résultats que RZ en terme de facteur de qualité et de taux d'erreur binaire, à part pour le cas de 32 utilisateurs avec des résultats qui ne sont pas satisfaisants. On a conclu que la qualité de transmission se dégrade en augmentant le nombre d'utilisateurs.

Pour corriger ce défaut on a limité la puissance par utilisateurs à 0.0625mw, cette méthode permet d'atteindre un nombre d'utilisateurs important (64 utilisateurs) tout en ayant une bonne qualité de transmission.

On a fait une étude de l'architecture point à point, avec un seul utilisateur, on a trouvé que la qualité de transmission se détériore en augmentant le débit. Pour un débit de 1 Gbit/s la distance permise est 170km, et pour 10 Gbit/s elle est de 70 km. Par la suite on a fait une comparaison entre l'architecture point à multipoint et l'architecture point à point, on a constaté que cette dernière offre des résultats intéressants en terme de débit.

L'étude de la liaison B-PON bidirectionnelle s'est basé sur la qualité de transmission en fonction des paramètres tels que : nombre d'utilisateurs, débits de la liaison, distances, et puissance. Pour faire cette étude on a ciblé deux critères importants qui définissent une bonne qualité de transmission : le facteur de qualité et taux d'erreur binaire.

---

# Conclusion générale

---

# CONCLUSION GENERALE

La transmission optique a pris le pas sur toutes les autres solutions comme technologie de transport de l'information. La bande passante des fibres permet théoriquement l'établissement de systèmes de transmission à des débits très élevés. Cependant, le traitement électronique des données à l'émission et à la réception, impose des limitations en termes de débits, dues aux composants électroniques dont la bande passante reste bien inférieur de celle accessible par l'optique.

Au vu de la recherche que nous avons effectuée, nous pouvons estimer que les technologies FTTx sont des technologies d'avenir intéressantes pour tous les fournisseurs d'accès Internet mondiaux, elles constituent un énorme progrès pour les réseaux d'accès et elles sont appelées désormais à combler dans les années à venir, les limites des réseaux sur paires de cuivre à cause de l'émergence de nouveaux services toujours aussi demandeur en bande passante.

Le premier chapitre nous a permis de connaître l'utilité de la fibre optique qui est devenue un support de transmission indispensable dans le domaine des télécommunications optiques, ainsi que l'utilité de chaque élément d'une liaison optique. Le deuxième chapitre met en évidence l'intérêt des réseaux optiques passifs (PON), les débits, la sécurité ainsi que la confidentialité que peut offrir de tels réseaux, plusieurs catégories peuvent être dérivées du réseau PON tel que, l'APON, le BPON, l'EPON, et le GPON, chacune offre des débits importants. Grâce à ces réseaux optiques, la transmission des informations est devenue plus rapide, facile.

La liaison B-PON est composée d'un OLT, d'une fibre bidirectionnelle, et d'un amplificateur optique EDFA qui compense les pertes de transmission, afin de rendre le plus fidèlement possible le signal émis à la réception. Notre liaison est composée aussi d'un coupleur optique (Splitter), et des ONU (Optical Network Terminaison).

Cette liaison B-PON bidirectionnelle, consiste à desservir à partir d'un seul OLT (Optical Line Terminal), plusieurs utilisateurs ONT (Optical Network Terminaison) avec un débit précis, et une longueur de la fibre bidirectionnelle qui varie de 20km à 200 km.

Dans le troisième chapitre nous avons étudié une liaison B-PON bidirectionnelle avec le logiciel OPTISYSTEM, en agissant sur les paramètres de la liaison, comme la longueur de la fibre, le débit de l'OLT et de l'ONT, la puissance émise, le nombre des utilisateurs, ainsi que le type de modulation. Ceci nous a permis de dire que la distance maximale atteinte est de 180 km jusqu'à 190 km, avec un débit qui peut aller jusqu'à 2.5 Gbit/s, et un nombre d'utilisateur de 64. En dernier on a fait une étude comparative entre l'architecture PON et l'architecture point à point, on a trouvé que cette dernière offre des résultats intéressants avec une bonne qualité de transmission, mais elle nécessite des coûts de déploiement très importants.



## Conclusion Générale

---

Suite à notre étude, on a conclu que les réseaux optiques passifs (PON) peuvent atteindre des débits importants avec une bonne qualité de transmission, l'évaluation de ces débits varie selon l'architecture utilisée, mais il faut toujours garder le compromis utilisateurs / débits, et distances / débits.

---

# Bibliographie

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Jean-Louis VERNEUIL, thèse de doctorat « Simulation de systèmes de télécommunications » par fibre optique à 40 Gbits/s Université DE LIMOGES, 21/11/2003
- [2] : MARTIN Kom, EYEBE Jean Fouda, GUILLAUME Kom- Thèse Master (2) en télécom: « Technologie de l'optique guidée ».
- [3] : LAURENT Jérôme- Thèse « Communication optique à très haut débit » ; 3/31/2004 Présenté au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris Département STIC dans la spécialité ELECTRONIQUE.
- [4] : Jean-François - L'haire ; Octobre 1997  
<http://www.htrr.ups-tlse.fr/pedagogie/cours/fibre/fotheori.htm> .
- [5] : KIMBIRI Seydou, KPEMISSI EYNANA Piham ; Juillet 2012- Thèse Master (2) « Etude d'une liaison optique multiplexée RZ/NRZ 16x40 Gbits/s ». Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- [7] : M. Hamroune, A Harhouze, « Etude et caractérisation de la commutation optique », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en télécommunication, Institut des télécommunications Abedlhafid Boussouf- Oran, Promotion 2005.
- [8] : Enthony REGIS/ Romains VENO, « les techniques de transmission optique », projet bibliographique. [web.univ-pau.fr/~cpham/M2SIR/BIBLIO/DOC04-05/TechOptique](http://web.univ-pau.fr/~cpham/M2SIR/BIBLIO/DOC04-05/TechOptique).
- [9] : GUILLARD Jérôme ; 2007- Thèse « Illustration de la jonction P-N » ; encadré par Hicham DAMMAK ; centrale paris ;  
[http://www.etudes.ecp.fr/physique/illustrations/jonction\\_PN.htm](http://www.etudes.ecp.fr/physique/illustrations/jonction_PN.htm).
- [10] : Les détecteurs 2120-9 ; <http://perso.fundp.ac.be/~jllongue/syllabus/Eing2120-9.pdf>
- [11] : Article de LAROUSSE- La jonction P-N.  
[http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/jonction\\_P-N/180567](http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/jonction_P-N/180567)
- [12] : Terminale Baccalauréat Professionnel de SEN\_TR ; Système Electronique Numérique Télécommunication & Réseaux. LA FIBRE OPTIQUE
- [13] : I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled « ETUDE DE LA JONCTION PN D'UN SEMI-CONDUCTEUR A L'EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE »; Université Abou-

## Bibliographie

---

Bakr Belkaïd, Faculté des Sciences Unité de Recherche de Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) ; Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007.

[14] : TPE ; 2011-2012- « La fibre optique » ; lycée : Viollet Le DUC.

<http://www.lyc-violletleduc.ac-versailles.fr/spip/spip.php?rubrique81>

[15] : LECOY Pierre- Titre « Télécom sur fibre optique ». Edition 2008

[16] : DUTHILLEUL François ; TE 7119 – 10/8/2000

[17] : Septembre 2009 -43, rue de Meuniers, 94300 Vincennes- Thème « Etude de chiffrage pour le développement du très haut débit en aquitaine »

[18] : GASSER Philippe- Thème « Les architectures FTTX » – MSH Paris Nord –Plate-forme arts, sciences, technologies

[19] : Livre Blanc- Titre « Les réseaux PON (Passive Optical Network) » -18/12/2006.

[20] : « Mémoire SUR LES RESEAUX FTTH » - Juillet 2009 ; COGISYS ; Architecture des systèmes de communication

[21] : FABIENNE Saliou ; Thème « Etudes des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée »- 14/06/2010.

[22] : NAKANO Yuluo Hitachi- Thème « Technologie and applications of Passive Optical Networks (PON) »

[23] : R et M France ; 09/2006 – Thème « Déploiement FTTX ».

# RESUME

Les réseaux d'accès optiques viennent palier les limites enregistrés par les technologies xDSL notamment la portée, on parle alors du très haut débit.

On dispose de différents types de technologies et d'architectures optiques FTTX, de point de vue technique et économique, chacune de ces architectures présente les avantages et les limites, elles sont alors adoptées suivant les applications et les services.

Le réseau optique passif (PON) est une référence en matière de réseaux d'accès très haut débit, le PON est une architecture qui possède deux sens, le sens montant (de l'ONT vers l'OLT), et le sens descendant (de l'OLT vers l'ONT), grâce a des coupleurs passifs, le réseau optique passif peut atteindre 32 à 64 abonnés qui se partagent la même fibre monomode, et permet d'offrir un débit qui se compte en Gbit/s. plusieurs catégories peuvent être dérivées de ce réseau tel que : APON, BPON, EPON, GPON

Le but de ce travail est d'étudier la liaison B-PON bidirectionnelle, et de déterminer la qualité de transmission, en prenant en compte certains paramètres de la liaison à savoir, les débits utilisés, le nombre d'utilisateurs, la longueur de la fibre, la puissance émise, et le type de modulation.

**Mots Clés :** BPON, PON, FTTX, réseau optique, fibre optique.

### Abstract

The limits recorded by xDSL are improved by optical access networks technologies with very high speed. FTTx has different types of technologies and architectures. From the technical and economical point of view, each of these architectures has advantages and limitations, they are adopted according to applications and services.

Passive Optical Network (PON), is considered as a standard for high-speed networks access, the architecture of PON has two links, the first one is: uplink (from the ONT to the OLT) the other one is: downlink (the OLT to ONT), PON can reach 32 to 64 subscribers with passive couplers, they share the same single mode fiber, and can offer a bit rate in order of Gbit/s. Several categories can be derived from the network such as: APON, BPON, EPON, and GPON.

The aim of this work is to study the B-PON bidirectional link, and determine the quality of transmission, taking into account certain parameters of the link, like, bit rates used, the number of users, the length of the fiber, the power transmitted, and the modulation type.

**Key Words:** BPON, PON, FTTX, optical network, optical fiber.