



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

MEMOIRE

Présenté

A L'UNIVERSITE DE TLEMCCEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER en

Photoniques et Réseaux Optiques de Télécommunications

Par

NAÏT ZERRAD Warda & NEBBACHE Siham

**ETUDE DES PERFORMANCES D'UN SYSTEME WDM-PON
REPOSANT SUR LA RE-MODULATION NRZ-DQPSK**

Soutenu le 14 juin 2015 devant le Jury

Mr. S. KAMECHE	Maître de Conférences-A- à l'Université de Tlemcen	Président
Mr. H. ZERROUKI	Maître de Conférences-B- à l'Université de Tlemcen	Examineur
Mr. A. ABDELMALEK	Maître de Conférences-B- à l'Université de Tlemcen	Encadreur

Année Universitaire 2014/2015

Remerciement

Nous tenons à remercier tout d'abord, **Allah** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et le courage pour terminer nos études et à élaborer ce modeste travail.

Nous remercions tout particulièrement notre encadreur Monsieur **ABDELMALEK Abdelhafid**, Maitre de conférences à l'Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, pour ses conseils pendant la réalisation de ce mémoire, son aide appréciable et ses encouragements tout au long de notre travail.

Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur **KAMECHE Samir**, Professeur à l'université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, d'avoir fait l'honneur de juger et présider le jury de ce travail.

Nous tenons à exprimer également nos remerciements à Monsieur **ZERROUKI Elhadj**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de l'enrichir par ses propositions.

Nous les remercions sincèrement pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture et à l'évaluation de notre travail.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenu de près ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma Mère ...

A mon Père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant tous mon cursus,

Que Dieu le tous puissant les gardes et les protège.

A mes chers Frères et Sœurs : Karim, Ilyes, Fares, Saadia, Samia et son époux Mohammed,

A mon petit neveu Rayan,

A mes amis qui ont toujours étaient là quand j'ai eu besoin d'eux,

A Djamel-eddine, qui ma accompagné et encouragée tout au long de mes études,

A ma très cher binôme « NEBBACHE Siham »,

A mes professeurs à qui je suis très reconnaissante,

A toute la promotion PROTON de l'année 2014 – 2015,

A moi-même,

Warda... 

J'ai l'immense honneur de dédier ce travail ce mémoire à mes chers parents qui m'ont toujours soutenue tout au long de mes études,

A mon très cher et unique frère Houcine qui était toujours à mes côtés par ses conseils et sa précieuse attention,

Une spéciale dédicace pour deux chères amies qui comptent déjà énormément pour moi et pour qui je porte beaucoup de tendresse et respect. A vous Asma.A et Asma.M

A ma cher binôme « NAIT ZERRAD Warda »,

A mes professeurs qui m'ont enseigné et qui par leurs compétences m'ont soutenu dans la poursuite de mes études.

Siham... 

Résumé

Le haut débit, la grande distance de propagation et la bonne qualité de transmission combinés à un coût réduit sont des critères de plus en plus demandés pour la réalisation d'un système de télécommunications optique. Dans ce sens, les institutions de normalisation comme l'ITU-T et le FSAN se tournent aujourd'hui vers des solutions de multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing) pour satisfaire les exigences de la nouvelle génération de réseau d'accès optique passif (NG-PON2) et faire face ainsi à plusieurs enjeux majeurs notamment l'augmentation des débits, du nombre de clients raccordés et l'étalement des infrastructures pour couvrir des zones toujours plus importantes.

Ce mémoire a pour objectif l'investigation de l'augmentation des capacités (débit, portée, nombre d'ONU) de la future génération NG-PON2 de type WDM. Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés à une architecture PON-WDM basée d'une part, sur une modulation DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) en downlink pour accroître le débit en combattant le phénomène d'interférence inter-symboles (ISI) dû à la dispersion chromatique, et d'autre part sur une re-modulation NRZ en uplink pour réduire les coûts de déploiement en éliminant les sources laser au niveau des ONU. Le modèle de liaison optique proposé ainsi que ses paramètres sont explicités et différentes architectures WDM-PON sont simulées. Les résultats obtenus sont fort prometteurs, ouvrant ainsi la voie à d'autres investigations visant à atteindre les objectifs des réseaux NG-PON2.

Mots-clés: haut débit, l'ITU-T, FSAN, nouvelle génération de réseau d'accès optique passif (NG-PON2), WDM, ONU, ISI, DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), re-modulation NRZ (Non Return to Zero), downlink, uplink.

Abstract

High bandwidths, great distance of propagation and the good transmission quality combined with a low cost are criteria increasingly required for the realization of an optical telecommunications system. In this sense, standardization institutions such as the ITU-T and FSAN is now turning to solutions multiplexing wavelength (WDM, Wavelength Division Multiplexing) to meet the requirements of the new generation of passive optical access network (NG-PON2) and face and several major challenges including increased rates, the number of connected clients and spreading the infrastructure to cover ever larger areas.

This thesis aims at investigating the increase in capacity (throughput, range, number of ONU) of future generation NG-PON2 in WDM mode. In this context, we are interested in a WDM-PON architecture based firstly on a DQPSK modulation (Differential Quadrature Phase Shift Keying) in downlink to increase throughput by combating inter-symbol interference (ISI) phenomenon due to the chromatic dispersion, and secondly on a re-modulation NRZ in the uplink to reduce deployment costs by eliminating the laser sources at the ONUs. The optical link proposed model and its parameters are explained and different architected WDM-PON are simulated. The results are very promising, paving the way for further investigations to achieve the objectives of NG-PON2 networks.

Keywords : broadband, l'ITU-T, FSAN, new generation of passive optical access network (NG-PON2), WDM (Wavelength Division Multiplexing), ONU (Optical Network Unit), ISI, DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) re-modulation NRZ (Non Return to Zero), downlink, uplink.

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	x
Liste des acronymes.....	xi
Introduction générale	1

Chapitre 1 : Réseaux optiques passifs

1.1 Introduction	4
1.2 Les réseaux optiques	4
1.2.1 Réseaux de transport	4
1.2.2 Réseau d'accès.....	4
1.3 Architecture des réseaux FTTH	6
1.3.1 L'architecture point à point	7
1.3.2 L'architecture point à multipoint passive ou PON (Passive Optical Network).....	7
1.4 Les réseaux optiques passifs PON (Passive Optical Network).....	7
1.4.1 Architecture d'un réseau PON.....	8
1.4.1.1 OLT (Optical Line Termination).....	8
1.4.1.2 ONU/ONT (Optical Network Unit / Optical Network Terminal).....	9
1.4.1.3 Coupleur optique.....	9
1.4.1.4 Fibre optique.....	9
1.4.2 Principe de fonctionnement d'un réseau PON.....	11
1.5 Les différents standards d'un réseau PON.....	12
1.5.1 La norme APON.....	12
1.5.2 La norme BPON.....	12
1.5.3 La norme EPON.....	13
1.5.4 La norme GPON.....	13
1.5.5 La norme 10 GEAPON.....	14
1.5.6 La norme NG-PON.....	14
1.6 Bilan de liaison.....	16

1.7	Les technologies pour le NG-PON.....	16
1.7.1	TDM-PON (Time Division Multiplexing-PON).....	16
1.7.2	WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-PON).....	18
1.7.3	OFDM-PON.....	21
1.8	Pénalités de la transmission par fibre optique dans le réseau d'accès.....	23
1.8.1	Effets linéaires dus à l'augmentation du débit.....	23
1.8.2	Effets non-linéaires dus à l'augmentation de la puissance optique.....	26
1.9	Les solutions proposées pour réduire l'impact des effets linéaire et non linéaires.....	27
1.10	Les performances d'un réseau optique passif.....	28
1.11	Conclusion.....	28

Chapitre 2 : Modulations optiques

2.1	Introduction.....	31
2.2	Transmission numérique	31
2.2.1	Numérisation.....	31
2.3	Critères de qualité d'une transmission optique.....	33
2.3.1	Diagramme de l'œil.....	33
2.3.2	Taux d'erreur binaire (BER).....	33
2.3.3	Facteur de qualité (Q).....	34
2.3.4	Rapport signal sur bruit optique (OSNR)	35
2.4	Modulation directe vs modulation externe.....	35
2.4.1	Modulation directe.....	35
2.4.2	Modulation externe.....	36
2.4.2.1	Modulateur Mach-Zehnder.....	37
2.5	Techniques de modulation optique.....	37
2.5.1	Codage en intensité OOK (On-Off Keying).....	38
2.5.1.1	Format NRZ (Non Return to Zero)	38
2.5.1.2	Format RZ (Return to Zero).....	38
2.5.2	Modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).....	39
2.5.3	Modulation DPSK (Differential Phase Shift Keying).....	40
2.5.4	Modulation DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying).....	42
2.5.4.1	Méthodes de génération.....	42
2.5.4.2	Détection différentielle de la DQPSK.....	43

2.6 Conclusion.....	44
---------------------	----

Chapitre 3 : Simulations & Résultats

3.1 Introduction.....	46
3.2 Présentation du logiciel OptiSystem.....	46
3.2.1 Applications du logiciel OptiSystem.....	47
3.3 Schémas du réseau à simuler.....	47
3.3.1 Simulation d'un réseau WDM-PON à quatre ONU's (4 abonnés).....	48
3.3.1.1 Résultats et interprétation.....	51
3.3.2 Simulation d'un réseau WDM-PON à seize ONU's (16 abonnés).....	60
3.3.2.1 Résultats et interprétation.....	60
3.3.3 Simulation d'un réseau WDM-PON à trente-deux ONU's (32 abonnés).....	65
3.3.2.1 Résultats et interprétation.....	65
3.4 Conclusion.....	68
Conclusion générale	69
Références bibliographiques.....	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Architecture d'un réseau de télécommunication	5
Figure 1.2 : Structure d'un réseau FTTH	5
Figure 1.3 : Structure d'un réseau FTTB	6
Figure 1.4 : Structure d'un réseau FTTC/FTTCab	6
Figure 1.5 : Structure d'un réseau FTTN	6
Figure 1.6 : Topologies des réseaux FTTH, (a) point à point et (b) point à multipoint	7
Figure 1.7 : Schéma d'un réseau PON	8
Figure 1.8 : Trafic montant et descendant dans un réseau PON, (a) Sens descendant, (b) sens montant	11
Figure 1.9 : Format de la trame ATM	12
Figure 1.10 : Structure d'une trame GFP	13
Figure 1.11 : Technique de multiplexage TDM-PON	17
Figure 1.12 : Programme de la trame descendante	17
Figure 1.13 : Technique de multiplexage WDM-PON.	18
Figure 1.14 : Les principales variantes du WDM, (a) CWDM, (b) DWDM	19
Figure 1.15 : Architecture PON WDM bidirectionnelle "broadcast and select".	20
Figure 1.16 : Architecture PON WDM bidirectionnelle "démultiplexage spatial"	20
Figure 1.17 : Exemple de WDM hybride avec un diviseur de puissance dans l'ODN pour la NG-PON	21
Figure 1.18 : Principe de multiplexage OFDM en sous porteuses	22
Figure 1.19 : Schéma de principe de l'OFDMA-PON	22
Figure 1.20 : Elargissement temporel d'une impulsion d'enveloppe Gaussienne après propagation dans une fibre	24
Figure 2.1 : Numérisation d'un signal analogique (a) échantillonnage, (b) quantification, (c) codage	32
Figure 2.2 : La construction du diagramme de l'œil à partir de la séquence temporelle	33
Figure 2.3 : Principe d'évaluation du taux d'erreur par le facteur Q : à gauche, trace temporelle du signal avec les niveaux moyens « 1 » et « 0 » (respectivement I_1 et I_0) À droite : distributions des deux niveaux et écarts-types associés	34
Figure 2.4 : Schéma de principe de la modulation directe	36
Figure 2.5 : Schéma de principe de la modulation externe	36
Figure 2.6 : Interféromètre de Mach-Zehnder.	37
Figure 2.7 : Format de modulation de type NRZ, (a) Trace temporelle, (b) Diagramme de l'œil, (c) Le spectre	38
Figure 2.8 : Format de modulation de type RZ, (a) Trace temporelle, (b) diagramme de l'œil, (c) Le spectre	39
Figure 2.9 : Diagramme de constellation pour la modulation QPSK	40

Figure 2.10 : (a) Modulateur QPSK, (b) démodulateur QPSK	40
Figure 2.11 : Diagramme de constellation pour la modulation DPSK	41
Figure 2.12 : Modulateur DPSK	41
Figure 2.13 : Démodulateur DPSK	41
Figure 2.14 : Génération de la DQPSK par deux modulateurs de phase en série	42
Figure 2.15 : Génération de la DQPSK par deux modulateurs MZM en parallèle	43
Figure 2.16 : schéma de détection différentielle d'un signal DQPSK	44
Figure 3.1 : Schéma de l'interface OptiSystem	47
Figure 3.2 : Schéma du réseau à simuler	48
Figure 3.3 : Modulation DQPSK	49
Figure 3.4 : Démodulation DQPSK	50
Figure 3.5 : Partie réception NRZ de la liaison	50
Figure 3.6 : Spectre descendant dans la fibre optique	51
Figure 3.7 : Diagramme de l'œil pour le sens descendant à $D= 2.5\text{Gbit/s}$. (a) $L= 5\text{km}$, (b) $L=60\text{km}$, (c) $L= 80\text{km}$, (d) $L= 100\text{km}$	52
Figure 3.8 : Diagramme de l'œil pour le sens montant à $L= 80\text{km}$ (a) $D= 1.2\text{Gbit/s}$, (b) $D= 1.5\text{Gbit/s}$, (c) $D= 2\text{Gbit/s}$, (d) $D= 2.5\text{Gbit/s}$.	53
Figure 3.9 : Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre	54
Figure 3.10 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit	55
Figure 3.11 : Diagramme de l'œil pour le sens descendant à $D= 10\text{Gbit/s}$ et $L= 40\text{km}$	56
Figure 3.12 : Diagramme de l'œil pour le sens montant. (a) $D= 1.25\text{Gbit/s}$ et $L= 40\text{km}$, (b) $D= 1.5\text{Gbit/s}$ et $L= 35\text{km}$, (c) $D= 2\text{Gbit/s}$ et $L= 30\text{km}$, (d) $D= 2.5\text{Gbit/s}$ et $L=29\text{km}$, (e) $D= 5\text{Gbit/s}$ et $L= 20\text{km}$, (f) $D=10\text{Gbit/s}$ et $L= 10\text{km}$	57
Figure 3.13 : Variation du débit en fonction de la longueur de la fibre	58
Figure 3.14 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant à $D=20\text{Gbit/s}$, (b) sens montant à $D=1.25\text{Gbit/s}$	59
Figure 3.15: Schéma du réseau à simuler	60
Figure 3.16 : Spectre descendant dans la fibre optique	61
Figure 3.17 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant	61
Figure 3.18 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant	62
Figure 3.19 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant	62
Figure 3.20 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant	63
Figure 3.21 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant	63
Figure 3.22 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant	64
Figure 3.23 : Schéma du réseau à simuler	65
Figure 3.24 : Spectre descendant dans la fibre optique	66
Figure 3.25 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant	66
Figure 3.26 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant	67
Figure 3.27 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Comparaison des standards PON	15
Tableau 1.2 : Classification du budget optique	16
Tableau 3.1 : Résumé de résultat de facteur de qualité (Q) en fonction de la distance (L)	54
Tableau 3.2 : Résumé de résultat de taux d'erreur binaire en fonction de débit	55
Tableau 3.3 : Résumé des résultats en fonction de la distance et de débit	58

Liste des acronymes

A

ADSL: Asynchronous Digital Subscriber Line

AES: Advanced Encryption Standard

APD: Avalanche Photodiode

APON: ATM-Passive Optical Network

ATM: Asynchronous Transfer Mode

AWG: Arrayed Waveguide Grating

B

BER: Bit Error Rate

BPON: Broadband Passive Optical Network

C

CAN: Convertisseur Analogique-Numérique

CSMA/CD: Carrier Sens Multiple Access with Collision Detect

CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing

D

DBA: Dynamic Bandwidth Allocation

DCF: Dispersion Compensation Fiber

DFB: Distributed Feedback laser

DGD: Differential Group Delay

DPSK: Differential Phase Shift Keying

DQPSK: Differential Quadrature Phase Shift Keying

DSL: Digital Subscriber Line

DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing

E

EPON: Ethernet Passive Optical Network

F

FEC: Forward Error Correction

FP: Fabry-Perot

FSAN: Full Service Access Network

FTTB: Fiber To The Building

FTTCab: Fiber To The Cabinet

FTTC: Fiber To The Curb

FTTH: Fibre To The Home

FTTN: Fiber To The Node

FWM: Four Wave Mixing

G

GEAPON: Gigabit Ethernet Passive Optical Network

GFP: Generic Framing Protocol

GPON: Gigabit Passive Optical Network

GVD: Group Velocity Dispersion

H

HDSL : Highbit rate Digital Subscriber Line

I

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

I: In-Phase

ISI: Inter Symbol Interference

ITU-T: International Telecommunications Union

M

MZM: Mach-Zehnder Modulator

N

NGPON: Next Generation Passive Optical Network

NRO: Noeud de Raccordement Optique

NRZ: Non Return to Zero

O

ODN: Optical Distribution Network

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Access)

OLT: Optical Line Termination

ONT: Optical Network Termination

ONU: Optical Network Unit

OOK: On-Off Keying

OSA: Optical Spectrum Analyzer

OSNR: Optical Signal to Noise Ratio

P

PCM: Pulse Code Modulation

PM: Phase Modulator

PMD: Polarization Mode Dispersion

PON: Passive Optical Network

PSK: Phase Shift Keying

Q

Q: Quadrature

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

R

RZ: Return to Zero

S

SDH/ SONET: Synchronous Digital Hierarchy/ Synchronous Optical Network

SDSL : Single pair, ou Symmetric Digital Subscriber Line

SMF: Single Mode Fiber

SOA: Semiconductor Optical Amplifier

SPM: Self Phase Modulation

T

TDM (A): Time Division Multiplexing (Access)

U

UDWDM: l'Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing

V

VDSL : Very high Digital Subscriber Line

Vs : Versus

W

WDM (A): Wavelength Division Multiplexing (Access)

X

XG-PON: 10GPON asymétrique normalisé par le FSAN

XPM: Cross Phase Modulation.

Introduction générale

Les réseaux d'accès DSL (Digital Subscriber Line) à base de câble coaxial déployés atteignent leurs limites en termes de débit et de portée. Or, 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 nos foyers depuis quelques années, à travers les liaisons FTTx, afin de répondre aux futurs besoins de services exigeant un très haut débit.

L'architecture FTTH (Fiber To The Home) constitue l'une des alternatives offertes aux opérateurs de télécommunications leur permettant de délivrer des services interactifs à haut débit en amenant la fibre optique jusqu'au domicile. Parmi ces différentes implémentations on trouve le réseau optique passif PON (Passive Optical Network), qui est défini comme étant le segment réseau entre le premier équipement d'agrégation de l'opérateur d'accès et l'utilisateur. Plusieurs standards PON existent, soutenus par des organismes de normalisation: l'ITU (International Telecommunication Union), le FSAN (Full Service Access Network) et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Dans le contexte général de l'accès optique actuel, les possibilités d'évolution de l'architecture du réseau sont limitées par les performances du réseau G-PON (Gigabit Passive Optical Network) qui offre un débit de 1.25 Gbit/s pour le voie montante et 2.5 Gbit/s pour la voie descendante pour 64 jusqu'à 128 abonnés utilisant la technique de multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing).

Pour remplacer le GPON et par souci de réduire les coûts de déploiement de l'accès FTTH, le groupe FSAN et l'ITU-T ont projeté le lancement de la Nouvelle Génération de réseau PON (NG-PON, Next Generation of Passive Optical Network) dans ses versions NG-PON1 et NG-PON2.

Le NG-PON1 s'étend sur les réseaux PON de nouvelles générations prévues pour une évolution court terme des technologies actuellement déployées. Dans ce cadre, l'ITU-T propose deux variantes du NG-PON1 : le XG-PON1 et le XG-PON2 permettant la montée en débit jusqu'à 10Gbit/s.

Le NG-PON2 se concentre sur des technologies bas-coûts et évolutives offrant des débits allant jusqu'à 40 Gbits/s comme par exemple des PON TDM très haut débits, des PON WDM, des solutions hybrides de PON WDM-TDM, ou encore des solutions de multiplexage fréquentiel OFDM.

Ce mémoire a pour objectif l'investigation de l'augmentation des capacités (débit, portée, nombre de clients raccordés) de la future génération du réseau d'accès optique NG-PON2 de type WDM. Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés à une architecture

PON-WDM basée d'une part, sur une modulation DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) en downlink pour combattre le phénomène d'interférence inter-symboles et par conséquent accroître le débit, et d'autre part sur une re-modulation NRZ en uplink pour réduire les coûts de déploiement en éliminant les sources laser au niveau des ONUs.

La suite de ce mémoire est organisée comme suit :

Dans le premier chapitre, en partant du réseau d'accès de télécommunications général et d'une brève description des réseaux fibrés FTTx, on ciblera notre description sur les réseaux optiques passifs PON, leurs principaux composants constitutifs, leurs principes de fonctionnement, l'évolution de ces normes vers le NG-PON (Next Generation) ainsi que l'origine des principales dégradations subies par le signal lors de la montée en débit.

Dans le second chapitre, nous définissons tout d'abord la numérisation et les critères de qualité d'une transmission, par la suite, nous verrons les techniques de modulations optiques notamment la modulation DQPSK qui réduisent l'impact d'interférence entre symbole (ISI) dans les nouvelles générations PON.

Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation des performances de l'architecture WDM-PON en termes de capacité (débit et nombre d'utilisateurs) et de portée. Nous y présenterons le logiciel de simulation OptiSystem et les différents scénarios de simulations effectués, suivis des résultats et interprétations.

Chapitre 1

Réseaux optiques passifs

1.1 Introduction

Les réseaux optiques ont connu un développement rapide ces dernières années. Ce développement est dû à l'augmentation de la demande en débit. Téléchargements, vidéos et images en haute-définition et visioconférence, toutes ces applications nécessitent une grande bande passante afin d'accéder à l'information le plus rapidement possible.

La demande d'une bande passante plus élevée a provoqué la mise en place des réseaux d'accès de type FTTH (Fibre To The Home) à base large bande. Parmi les différentes implémentations FTTH on trouve le réseau optique passif (PON, Passive Optical Network), qui peut fournir des débits très élevés aux clients, une grande zone de couverture, un déploiement de la fibre réduit à la suite de son point-à-multipoint architecture, et un coût réduit de l'entretien grâce à l'utilisation de composants passifs dans le réseau [1].

Intégrer la division de longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing) dans un PON est la réponse à une augmentation des débits et du taux de partage dans le réseau d'accès, où chaque client va attribuer une longueur d'onde spécifique.

Ce chapitre introduit les réseaux optiques, en particulier les réseaux optiques passifs, ses éléments constitutifs, son principe de fonctionnement. Nous définirons par la suite les principaux standards de réseau PON ainsi que les différentes techniques de multiplexage (TDM PON, WDM PON, OFDM PON). Les performances d'un réseau passif ainsi que les effets qui limitent à la fois les distances de propagation et les débits de transmission vont être présentés à la fin de ce chapitre.

1.2 Les réseaux optiques

1.2.1 Réseaux de transport

Le réseau d'opérateur est constitué de réseau de transport et des réseaux d'accès. Le réseau de transport est constitué du cœur de réseau qui relie les principaux nœuds (commutateurs, multiplexeurs, routeurs...) entre eux, de la partie métró : métró-core près du cœur, et métró-edge près de l'accès (Figure 1.1) [2].

Le réseau de transport permet de réaliser des transmissions de données à des débits atteignant une centaine de Gigabit/s aujourd'hui, en partie grâce au multiplexage en longueur d'onde qui existe depuis une vingtaine d'années.

1.2.2 Réseaux d'accès

Le réseau d'accès est aussi appelé réseau de distribution ou boucle locale. Il englobe l'ensemble des moyens servant à relier des terminaux de télécommunication (fibre, mobile ou sans fil) entre un utilisateur final et un commutateur de réseau de transport.

Ce réseau assure l'accès au réseau téléphonique public pour les applications vocales, comme il permet l'accès aux applications de transfert de données (voix et vidéo) grâce à l'emploi des techniques numériques.

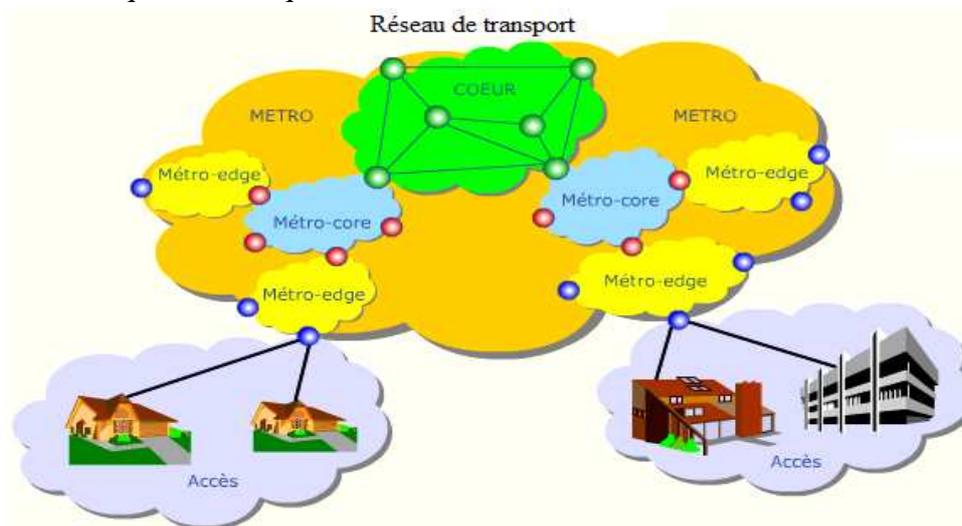


Figure 1.1 : Architecture d'un réseau de télécommunication.

Parmi ces derniers on distingue les techniques FTTx (Fiber To The x) qui consistent à amener la fibre optique au plus près de l'utilisateur afin d'augmenter la qualité de service en particulier le débit. Nous citons ici les configurations les plus répandues [3], selon la localisation de la terminaison de réseau optique :

- FTTH (Fiber To The Home) : Il s'agit d'une technologie qui apporte de la fibre optique jusqu'à l'abonné, permettant l'accès à l'internet et aux services à des débits de 10Mbit/s à 1Gbit/s (figure 1.2).

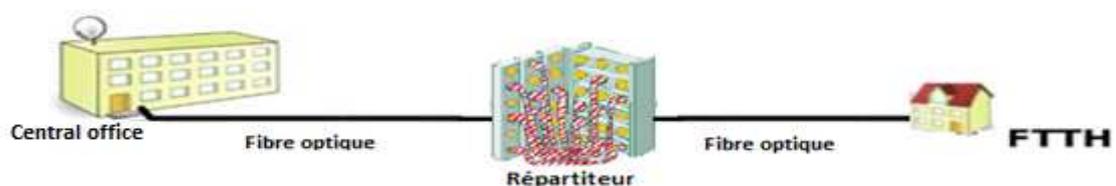


Figure 1.2 : Structure d'un réseau FTTH.

- FTTB (Fiber To The Building) : La transmission optique est localisée soit au pied de l'immeuble ou soit dans une armoire. La terminaison est ensuite effectuée via un fil en cuivre. (figure 1.3).

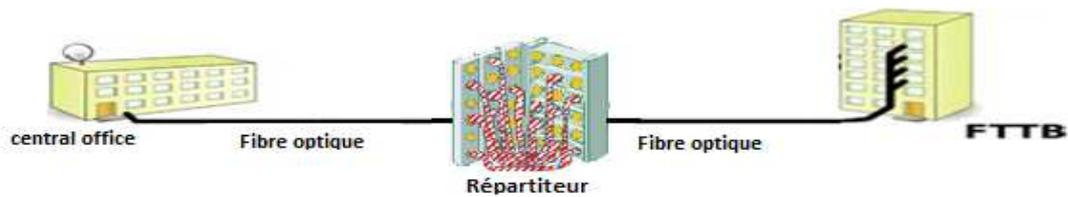


Figure 1.3 : Structure d'un réseau FTTB.

- FTTC/ FTTCab (Fiber To The Cabinet/ Fiber To The Curb) : La terminaison du réseau optique est localisée soit dans une chambre souterraine, soit dans une armoire sur la voie publique (sous répartiteur), ou soit dans un centre de télécommunication. Dans le cas où la fibre arrive jusqu'au trottoir (figure 1.4), on appelle cette configuration Fiber to the Curb (FTTC). D'autre part, si elle arrive jusqu'au sous répartiteur, on appelle cette configuration Fiber to the Cabinet (FTTCab).

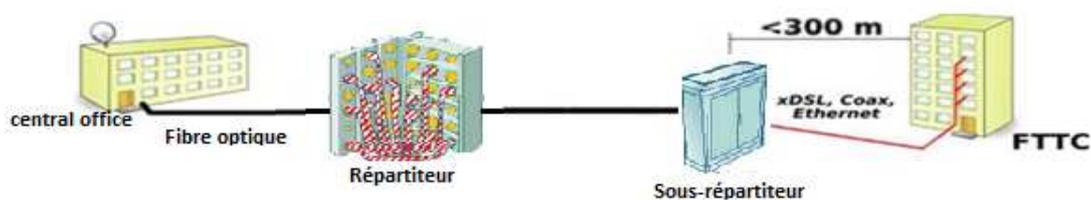


Figure 1.4 : Structure d'un réseau FTTC/FTTCab.

- FTTN (Fiber To The Node) : le raccordement par fibre s'effectue jusqu'au répartiteur. Au delà de ce point, la liaison se fait par un câble coaxial, ou paire cuivrée (figure 1.5).

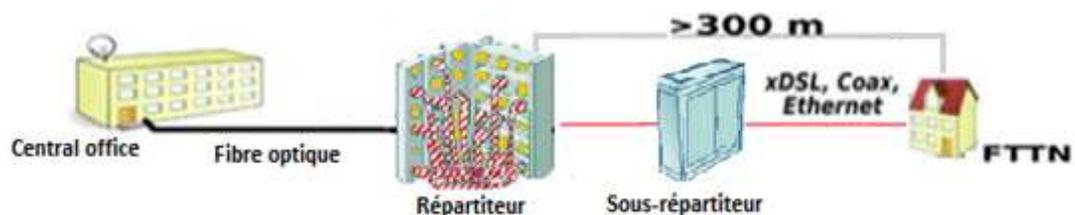


Figure 1.5 : Structure d'un réseau FTTN.

Pour les topologies FTTB, FTTC, FTTN, la partie terminale utilise généralement la paire téléphonique avec un système de transmission ADSL, ou VDSL selon la portée.

1.3 Architecture des réseaux FTTH

Deux types de topologies physiques permettent d'acheminer la fibre jusqu'au client final : architecture point à point et architecture point à multipoint.

1.3.1 L'architecture point à point

Le point-à-point est l'architecture la plus simple à mettre en œuvre parmi les topologies physiques du réseau d'accès optique, elle consiste à avoir un lien physique en fibre optique directement entre le central et l'abonné (figure 1.6 (a)). Elle est principalement associée avec des technologies telles que la technologie à hiérarchie numérique synchrone (SDH/SONET) et les technologies xDSL (ADSL, HDSL, SDSL, VDSL, ...).

Le déploiement de cette technologie revient plus cher, le nombre de fibres à produire et à connecter étant plus élevé.

1.3.2 L'architecture point à multipoint passive ou PON (Passive Optical Network)

Le PON représente une solution Point-à-Multipoint optique permettant la diffusion des données provenant du nœud de raccordement optique (NRO) vers chaque client. L'élément clé de l'architecture est un coupleur optique passif 1 vers N qui divise la puissance optique vers autant de ports de sortie (figure 1.6 (b)).

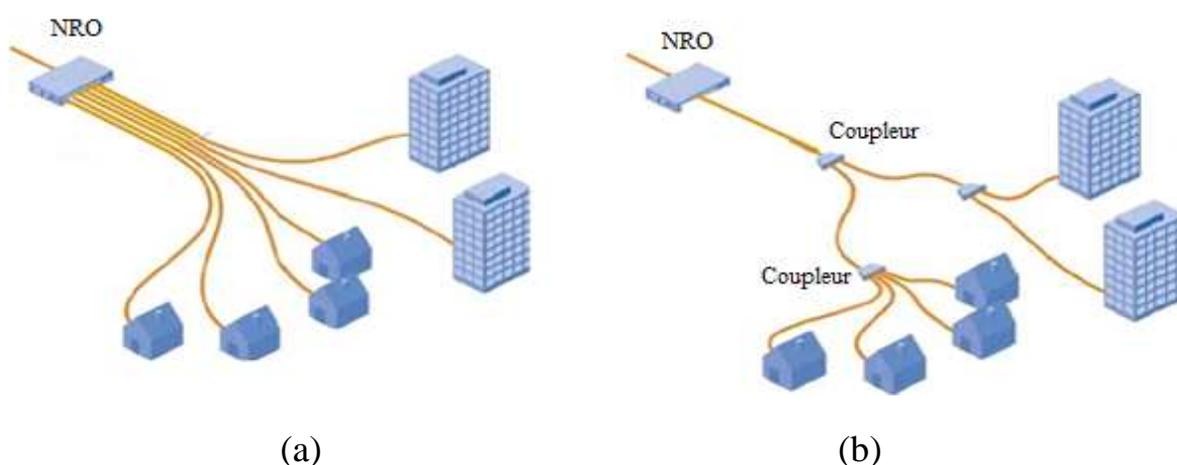


Figure 1.6 : Topologies des réseaux FTTH, (a) point à point et (b) point à multipoint.

Le choix de l'architecture point à point ou point à multipoint, dépend du type de services devant être fournis, du coût de l'infrastructure et des plans futurs de migration vers les nouvelles technologies.

1.4 Les réseaux optiques passifs PON (Passive Optical Network)

Les technologies PON constituent aujourd'hui une référence en matière de réseaux d'accès très haut débit dans la mesure où elles concilient très forte capacité de transport et minimisation des infrastructures fibres nécessaires. Ces technologies utilisent des réseaux optiques passifs : optiques, car ils utilisent comme infrastructure sous-jacente 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 [4].

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

1.4.1 Architecture d'un réseau PON

Un réseau PON, représenté schématiquement dans la figure (1.7), comporte le central qui se dénomme NRO (un nœud de raccordement optique), sur lequel sont connectées des sources multiples de services (vidéo, Internet et téléphonie classique). Ce NRO est lui même interconnecté, via la fibre optique, aux utilisateurs finals (résidences, entreprises...) appelé ONU ou ONT.

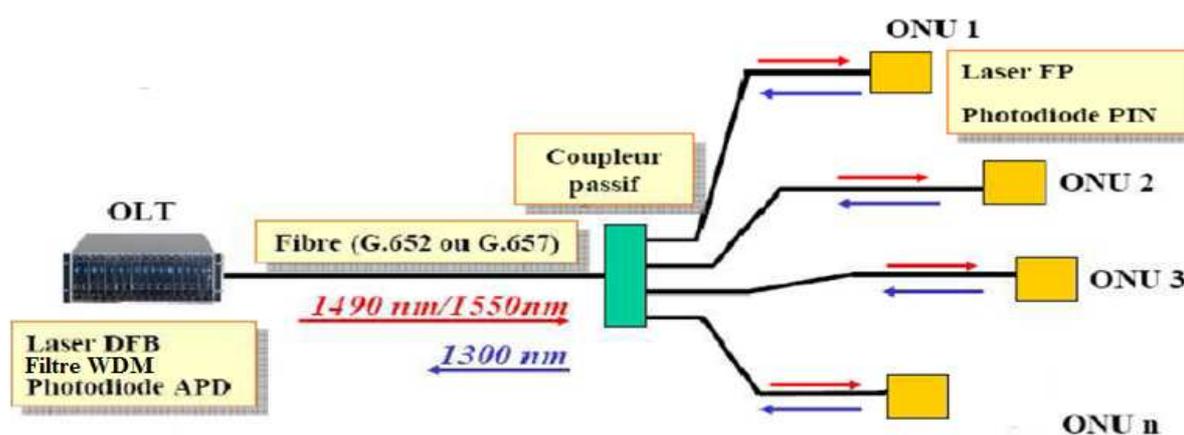


Figure 1.7 : Schéma d'un réseau PON.

Les réseaux PON ont classiquement une portée de 20 kilomètres, quels que soient les flux transportés, ce qui permet en réalité de couvrir une superficie de 20 kilomètres de rayon sans aucun répéteur [4].

Les principaux éléments constitutifs du PON sont discutés ci-dessous:

1.4.1.1 OLT (Optical Line Termination)

C'est un équipement actif appelé communément « Optical Line Termination » ou « Terminaison de Ligne Optique », situé au niveau du central, il envoie et reçoit les signaux lumineux porteurs des données.

Le module optique de l'OLT est composé par un laser DBF (Distributed Feedback Laser) à 1490nm, un filtre WDM qui assure la coordination de multiplexage entre les différentes unités ONU, et une Photodiode APD (Avalanche Photodiode) qui permet de

convertir le signal électrique au signal optique utilisé par l'équipement du fournisseur de service, et convertir le signal optique au signal électrique fournit par le réseau PON.

1.4.1.2 ONU/ONT (Optical Network Unit / Optical Network Terminal)

Des équipements actifs, installés chez les utilisateurs finals du réseau et qui assurent la connexion avec les terminaux de l'utilisateur, sur les interfaces spécifiques de ces derniers (RJ45 cuivre pour le PC sur Internet, connecteur coaxial pour la télévision, RJ11 cuivre pour le téléphone analogique, ...) [4]. Cet équipement est appelé communément ONU « Optical Network Unit » si elle est partagée entre plusieurs clients et suivi d'une transmission secondaire (cas des FTTCab/Curb/Building) ou ONT pour « Optical Network Termination » ou «Terminaison de Réseau Optique » si elle est mono client FTTH.

Le module optique de l'ONU est composé par un laser Fabry Pérot (FP) opérant à 1310nm, un filtre WDM et un photorécepteur PIN.

1.4.1.3 Coupleur optique

Le coupleur optique «ou splitter » est un équipement passif installé sur le cheminement de la fibre optique entre l'OLT et les ONU, dont le rôle est de partager le signal optique pour la voie dite descendante (de l'OLT vers les ONUs) et de recomposer le signal à partir des multiples signaux remontants dans l'autre sens (des ONUs vers l'OLT). En effet il est caractérisé par une perte d'insertion due à l'imperfection du composant, définie par [5]:

$$p_e = 10 \log \frac{p_{Ei}}{\sum p_{Si}} \text{ (dB)} \quad (1.1)$$

Où : p_{Ei} est la puissance entrante et p_{Si} la puissance sortante.

Les coupleurs optiques compacts et de très faibles dimensions, sont très accessibles et se déclinent en différents proportions allant de 1x2 à 1x32 jusqu'à 1x64 , pour répondre à la croissance du nombre d'utilisateurs et à l'augmentation de la consommation de services et donc de bande passante sur une zone.

Dans un réseau PON plusieurs architectures peuvent être organisées suivant l'emploi des coupleurs : en étoile, en arbre, en bus. En effet, C'est l'architecture en arbre qui est la plus souvent déployée pour assurer la connexion d'un nombre important d'abonné.

1.4.1.4 Fibre optique

La transmission des données dans les réseaux d'accès optique ce fait par des fibres optiques monomodes G.652 définie par L'UIT-T, et considérée comme le meilleur média de communication. C'est un très étroit et très long cylindre de verre aux caractéristiques très particulières : un diamètre de cœur compris entre 5 et 10 μm où la lumière peut se propager avec très peu de déformations, un débit élevé, une dispersion non décalée et une faible atténuation.

Le PON utilise la longueur d'onde 1490 nm pour le trafic descendant et 1310 nm pour le trafic montant, le 1550 nm est réservé aux services en option, généralement la vidéo. Le choix de ces longueurs d'ondes est lié aux « fenêtres Télécom » qui permettent d'avoir une atténuation linéique faible, un plus grand débit et un budget en puissance plus efficace.

G.652 définit un ensemble de paramètre pour la fibre optique monomode utilisée dans les réseaux PON :

a. Le coefficient de dispersion chromatique

Le coefficient de dispersion ($D(\lambda)$) est presque nul pour n'importe quelle longueur d'onde au voisinage de la région de 1310 nm. D'autre part, $D(\lambda)=17$ ps/ (nm.Km) pour la longueur d'onde égale à 1550 nm. La dispersion chromatique d'une fibre entraîne différents temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émise donnée par [3] :

$$\tau = D \left(\frac{ps}{nm.Km} \right) \times L(Km) \times \Delta\lambda (nm) \quad (1.2)$$

Où L est la longueur de la fibre et $\Delta\lambda$ est la largeur spectrale de la source.

b. Dispersion modale de polarisation PMD [6]

Dans une fibre monomode, la lumière est constituée d'une combinaison de deux polarisations orthogonales (polarisation horizontal et polarisation vertical). Lors de sa propagation dans la fibre, la lumière passe d'une polarisation à l'autre d'une façon aléatoire. Ces deux états de polarisation n'ont pas la même vitesse car la fibre apparait comme une lame biréfringente avec une différence d'indice suivant chacune des polarisations.

Cette biréfringence se traduit par la différence d'indice effectif entre les deux axes, lent et rapide, de la fibre, et la dispersion résultante de cette biréfringence est nommée la dispersion de polarisation de mode (polarization mode dispersion, PMD).

c. Atténuation

L'atténuation dans la fibre est due aux impuretés du verre qui peuvent absorber la lumière, la diffusion provoquée par les uniformités de la silice et la perte radiative produit à cause de l'interface cœur-gaine.

Soient p_o et p_l les puissances à l'entrée et à la sortie d'une fibre de longueur L , l'atténuation et donnée par :

$$\alpha = 10 \log \frac{p_o}{p_l} \left(\frac{dB}{km} \right) \quad (1.3)$$

D'après les spécifications de la norme G.652, le coefficient d'atténuation est égal à 0.5dB/km pour l'intervalle de longueur d'onde compris entre 1260nm et 1360nm et 0.25dB/Km à 1490nm [3].

1.4.2 Principe de fonctionnement d'un réseau PON

Pour le sens descendant (figure 1.8 (a)), on utilise une longueur d'onde porteuse de 1,49 ou 1,55 μm pour transmettre toutes les données aux différents utilisateurs. Le choix de cette longueur d'onde est dû au fait qu'elle permet un plus grand débit et un budget en puissance plus efficace.

Les données envoyées par l'OLT sont étiquetées en fonction de leur destinataire. Tous les ONU reçoivent toutes les données mais seul l'ONU concerné les retransmet dans le réseau interne de l'abonné. Le débit instantané du PON est partagé entre tous les abonnés qui reçoivent des données [7].

Pour le sens montant (figure 1.8 (b)), la transmission des données est assurée via un multiplexage temporel au niveau d'un coupleur passif, et les ONU émettent tous dans la même longueur d'onde (1,31 μm) avec des débits moins importants et des équipements moins coûteux (Laser Fabry Pérot). Si les signaux émis par deux ONU parvenaient simultanément au coupleur, ils ressortiraient sous la forme d'un mélange illisible par l'OLT [7]. Ce dernier attribue à tour de rôle à chaque ONU un intervalle de temps (quelques microsecondes) pendant lequel cet ONU est seul autorisé à émettre pour éviter les collisions de ces secteurs, comme il permet de récupérer et de synchroniser rapidement l'horloge avec les données venant d'utilisateurs situés à des distances différentes.

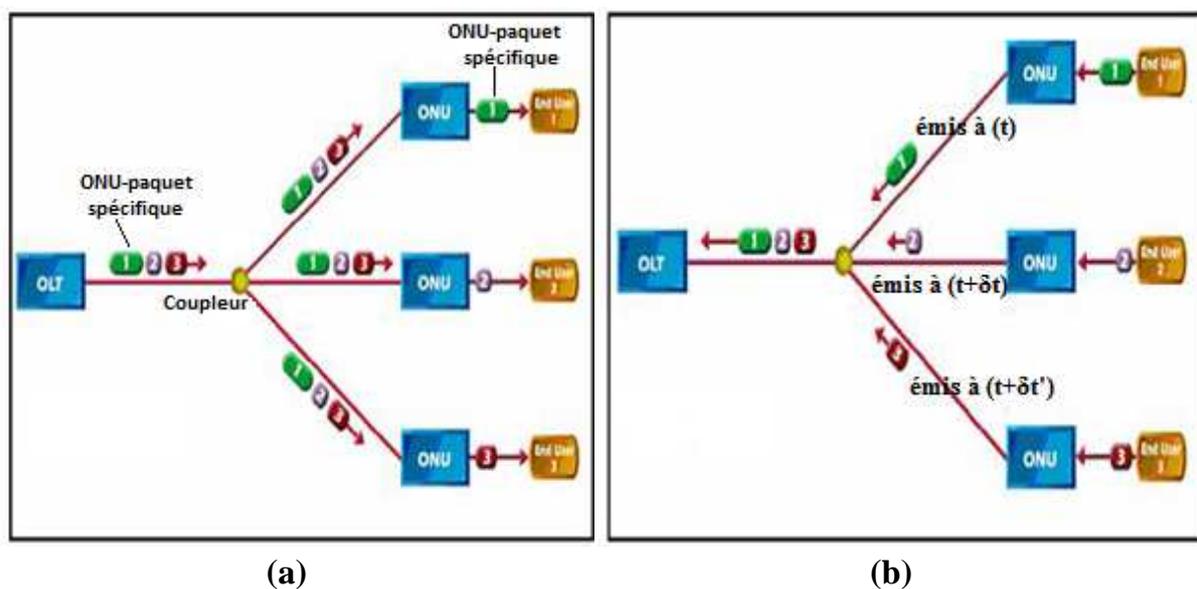


Figure 1.8 : Trafic montant et descendant dans un réseau PON,

(a) Sens descendant, (b) sens montant.

1.5 Les différents standards d'un réseau PON

Le réseau PON est basé sur plusieurs normes, ces dernières sont classifiées comme suit :

1.5.1 La norme APON

C'est la première norme apparue suite aux travaux démarrés en 1995, dans l'initiative du groupe FSAN (Full Service Access Network) [3].

APON « ATM-PON », d'où son nom l'indique repose sur le protocole ATM (Asynchronous Transfert Mode), permet des débits de 155 Mbit/s ou 622 Mbit/s pour le sens descendant pour jusqu'à 32 abonnés, et un débit de 155 Mbit/s pour le sens montant.

La figure (1.9) montre le format de la trame ATM [6] :

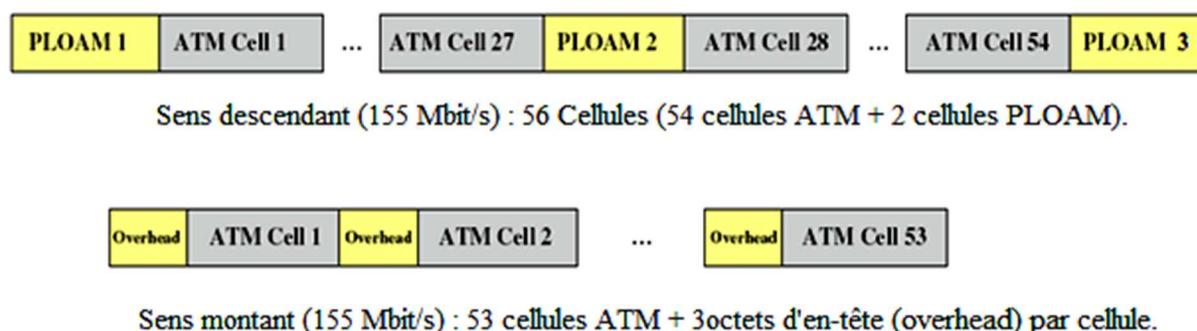


Figure 1.9 : Format de la trame ATM.

Pour la trame descendante, les utilisateurs reçoivent les cellules PLOAM et les cellules ATM. La cellule PLOAM est insérée toutes les 28 cellules ATM à l'intérieur de la trame descendante, elle contient des autorisations d'émission pour répartir les périodes temporelles entre les utilisateurs.

Pour la trame montante, les utilisateurs émettent de manière contrôlé et synchronisé des cellules ATM et 3 octets (24 bits) d'en-tête par cellule. Ces derniers contiennent 4 bits de temps de garde pour éviter la collision entre les cellules, un préambule pour le recalage en phase des bits envoyés et un délimiteur qui permet la synchronisation dans la trame elle-même [6].

Cette solution demeure complexe et coûteuse, le débit est limité, la récupération d'horloge peut poser des difficultés ainsi qu'elle ne peut pas offrir de service vidéo.

1.5.2 La norme BPON

BPON pour « Broadband PON » élaborée par le groupe FSAN, est une évolution de la norme APON en vu de fournir d'autre services tels que l'Ethernet et la diffusion de la vidéo. C'est un réseau de distribution en fibre optique en large bande, opérant un des trois modes descendant/montant suivants : 155Mbit/s / 155Mbit/s, 622Mbit/s / 155Mbit/s ou 622Mbit/s / 622Mbit/s pour jusqu'à 32 abonnés utilisant le multiplexage WDM (Wavelength Division

Multiple Accés) pour le sens descendant et le TDMA (Time Division Multiple Access) pour le sens montant [3]. Cette technologie est définie par les normes G.983.1, .2 pour les caractéristiques générales, .3 pour les réseaux vidéo, .5, .6 pour la sécurisation, .4 et .7 pour l'allocation dynamique [8].

1.5.3 La norme EPON

Ethernet PON utilise un protocole Ethernet (connu aussi sous le nom de norme IEEE 802.3) avec accès CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect), ce qui signifie qu'il s'agit d'un protocole d'accès multiple avec surveillance de porteuse et de détection de collision.

Les données sont transportées en paquets de longueur variable jusqu'à 1518 octets selon le protocole IEEE802.3 avec un débit symétrique de 1.25Gbit/s pour 64 abonnés à des portées pouvant atteindre 20 km. En outre, une technologie GE-PON (Giga Ethernet PON) qui a été standardisée l'IEEE sous la référence 802.3ah, cette norme supporte le service Triple Play qui amène à la fois les communications voix et visiophonie, l'accès Internet haut débit et la vidéo à l'utilisateur.

1.5.4 La norme GPON

Gigabit-PON est une solution qui a été éditée par l'ITU-T comme norme de recommandation G.984. Elle offre un débit de 2.5Gbit/s dans la voie descendante et 1.25Gbit/s dans la voie montante comme elle optimise la mise en œuvre des services sur FTTH [3]. Le taux de couplage peut atteindre 64 jusqu'à 128 abonnés sur une distance d'environ 20Km.

La liaison OLT-ONU emploie un mécanisme d'encapsulation multi-protocole GEM (Gigabit Encapsulation Method) pour le transport de services qui supporte à la fois l'Ethernet, l'ATM et le TDM. Ce mécanisme est issu lui-même du protocole GFP (Generic Framing Protocol) qui utilise des trames de longueur variable jusqu'à 65535 octets (figure (1.10)) [3].

CORE HEADER (4 OCTETS)	PAYLOAD HEADER (X=4 à 64 octets)	PAYLOAD INFORMATION (0 à 65536-X) octets	PAYLOAD FCS (4 octets)
---------------------------	-------------------------------------	---	---------------------------

Figure 1.10 : Structure d'une trame GFP.

Pour le sens descendant, chaque client reçoit toutes les informations mais n'est autorisé à recevoir que les données qui lui sont destinées.

Le partage des ressources dans le sens montant s'effectue par le TDMA (Time Division Multiple Access) : chaque client dispose d'un intervalle de temps bien précis pour émettre afin de ne pas interférer avec un autre client. Ainsi une composante WDM est présente dans les PON puisque le signal descendant est à 1,49 μm et le signal montant à 1,3 μm .

La solution GPON déployée se situe dans la Classe B+ (13-28 dB), avec un budget d'atténuation optique de 28 dB maximum [9].

Cette technologie présente des intérêts : Structure passive à base de coupleur optique et infrastructure partiellement partagée (économie sur la fibre). Mais aussi des inconvénients : un budget optique limité par le coupleur dont les pertes sont proportionnelles au nombre de ports, le débit partagé et limité ainsi une synchronisation compliquée pour le sens montant.

1.5.5 La norme 10 GEAPON

10Giga-Ethernet PON a débuté en 2010, connu sous le nom de norme IEEE 802.3av utilise le protocole Ethernet. Cette norme supporte des débits symétriques de 10Gbit/s, ou asymétrique de 10 Gbit/s dans le sens descendant et 1Gbit/s dans le sens montant pour 32 abonnés à des portées pouvant atteindre 20 km.

Des versions nouvelles ont été créées (NG-PON1 et NG-PON2) pour la distribution de flux à 10Gbit/s.

1.5.6 La norme NG-PON

Le groupe FSAN et l'ITU-T procède la Nouvelle Génération de réseau PON (NG-PON, Next Generation of Passive Optical Network) pour remplacer le GPON dont deux grande étapes sont distingué : NG-PON1 et NG-PON2.

- **Le standard NG-PON1**

Le NG-PON1 s'étend sur les réseaux PON de nouvelles générations prévues pour une évolution court terme des technologies actuellement déployées. Dans ce cadre, l'ITU-T propose deux variantes du NG-PON1 : le XG-PON1 et le XG-PON2 permettant la montée en débit jusqu'à 10Gbit/s. Dans une optique similaire, l'IEEE a réalisé des travaux de normalisation essentiellement basés sur le 10GEAPON.

La variante XG-PON1 du NG-PON1 est caractérisée par un débit descendant de 10 Gbit/s associés à un débit montant de 2,5 Gbit/s. Le plan d'allocation en longueur d'onde de ces transmissions a également été défini : les signaux descendants devront être émis en 1575 et 1580 nm et les signaux montants entre 1260 et 1280nm [10].

La variante XG-PON2 du NG-PON1 est caractérisée par un débit descendant et montant de 10 Gbit/s pour une portée de 20 Km.

- **Le standard NG-PON2**

Le FSAN prévoit une standardisation terminée pour fin 2015 d'une génération appelée NG-PON2 qui prend en compte des solutions à long terme et devrait succéder au NG-PON1, mais cette fois sans contrainte de coexistence obligatoire avec l'architecture préalablement déployée.

Ainsi le NG-PON2 se concentre sur des technologies bas-coûts et évolutives comme par exemple des PON TDM très haut débits (40 Gbit/s), des PON-WDM, des solutions

hybrides de PON WDM-TDM, ou encore des solutions de multiplexage fréquentiel OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [10] qui vont être décrites ci-après.

Ce standard NG-PON2 doit être capable d'offrir beaucoup plus de capacités par client que les systèmes G-PON actuels et les systèmes NG-PON1. Le NG-PON2 doit supporter au moins un débit agrégé de 40 Gbit/s par fibre de distribution dans le sens descendant et au moins 10Gbit/s dans le sens montant.

Le minimum de portée requis pour un NG-PON2 passif devrait être de 40 km, à la fois totale et différenciée. Les systèmes de NG-PON2 doivent également être capables d'atteindre 60 km.

Le tableau 1.1 récapitule les caractéristiques des différentes normes définies précédemment.

Norme	APON (1995)	BPON (2001)	EPON (2004) 10GEPON(2010)	GPON (2004)	NGPON1(XGPON) (2012)
Normes de recommandation	ITU-T G.983	ITU-T G.983	IEEE802.3ah IEEE802.3av	G.984 (FSAN)	ITU-T G.987
Protocoles	ATM.	ATM.	Ethernet avec accès CSMA/CD. Ethernet.	GEM (ATM, Ethernet, TDM)	XGEM
Longueur d'onde (descendant / montant)	1490 nm / 1310 nm	1490 nm / 1310 nm	1490 nm / 1310 nm	1490 nm / 1310 nm	1575 et 1580nm / 1260 et 1280nm
Débit descendant	155 Mbit/s ou 622Mbit/s.	155 Mbit/s ou 622 Mbit/s.	1.25 Gbit/s. 10 Gbit/s	2.5 Gbit/s.	10 Gbit/s.
Débit Montant	155Mbit/s.	155 Mbit/s ou 622 Mbit/s.	1.25 Gbit/s. 1Gbit/s ou10Gbit/s	1.25 Gbit/s.	2.5 Gbit/s pour le XGPON1. 10 Gbit/s pour le XGPON2.
Taux de partage	16, 32	16, 32	16, 32, 64	16, 32, 64 jusqu'à 128	32, 64, jusqu'à 128
Distance OLT-ONT	10 ou 20km	10 ou 20 km	20Km	20 Km	20Km.

Tableau 1.1 : comparaison des standards PON.

Notons que la différence concerne principalement le débit et le nombre de clients desservis par chaque standard ainsi que la couverture en nombre de kilomètres de fibre parcourue. Les longueurs d'onde, montante et descendante, sont les mêmes pour les quatre groupes de normalisation.

1.6 Bilan de liaison

Le budget optique comptabilise la perte ou l'atténuation optique possible entre un émetteur et un récepteur reliés par des composants optiques passifs tels que fibres, coupleurs, atténuateurs ou encore multiplexeurs. La notion de budget optique constitue la principale limite dans la réalisation d'architecture d'accès optique sur une longue portée.

La norme ITU-T a établi des classes qui définissent le budget optique de liaison, comme l'indique le tableau 1.2 [11] :

Classe	Budget optique maximale (dB)	Puissance d'émission maximale (dBm)	Sensibilité (dBm)
A	23	2	-21
B	28	7	-21
C	32	4	-28

Tableau 1.2 : Classification du budget optique.

Le budget optique se calcule ainsi :

$$\text{Budget optique (dB)} = \text{puissance d'émission (dBm)} - \text{sensibilité du récepteur (dBm)}$$

La portée permise tient compte des pertes dues aux connecteurs et se calcule ainsi :

$$\text{portée (km)} = \frac{\text{budget optique} - \text{pertes connecteurs (dB)} - \text{pertes épissures (dB)} - 3 \text{ dB}}{\text{atténuation du câble (dB/km)}}$$

1.7 Les technologies pour le NG-PON

La transmission dans un réseau passif notamment pour les nouvelles architectures de réseau d'accès est assurée via des techniques de multiplexage, à savoir le multiplexage temporel, le multiplexage en longueur d'onde et le multiplexage fréquentiel.

1.7.1 TDM-PON (Time Division Multiplexing-PON)

Le concept de déploiement de l'architecture du réseau PON, dans la majorité des opérations repose sur le partage temporel d'une seule longueur d'onde entre plusieurs utilisateurs [10].

Le principe du multiplexage temporel ou TDM PON est décrit dans la figure (1.11) suivante.

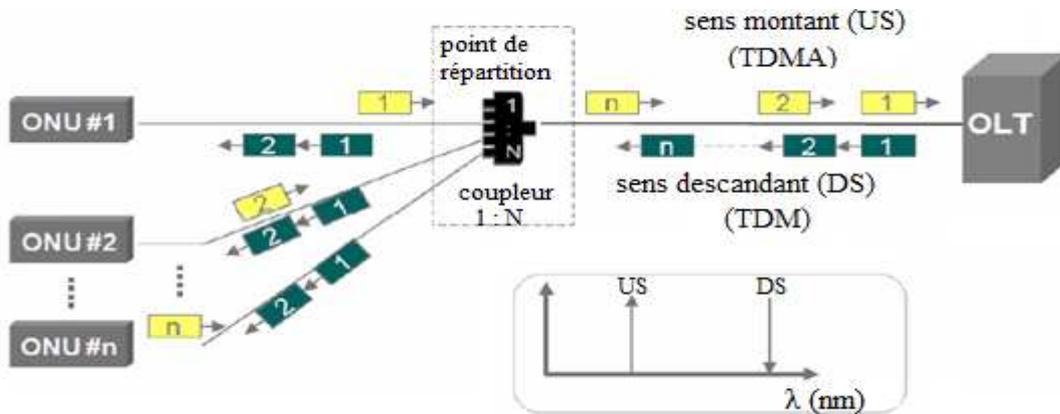


Figure 1.11 : Technique de multiplexage TDM-PON.

Pour la voie montante (de l'ONU vers l'OLT), le partage des ressources s'effectue par le TDMA (Time Division Multiple Access) où chaque client dispose d'un intervalle de temps bien précis [9], appelés « time slots » pour émettre afin de ne pas interférer avec un autre client. L'OLT permet de récupérer et de synchroniser rapidement l'horloge avec les données venant d'utilisateurs situés à des distances différentes.

Pour la voie descendante (de l'OLT vers l'ONU), les données sont réparties dans les trames temporelles en fonction du client destinataire. Chaque ONU reçoit tout le flux d'informations car les données sont diffusées, mais la synchronisation et le codage lui permettent de récupérer uniquement les données qui lui sont destinées. En outre, La répartition du débit entre les clients peut être fixe ou variable.

La trame descendante contient le « calendrier » de la trame remontante comme le montre la figure 1.12 [9]:

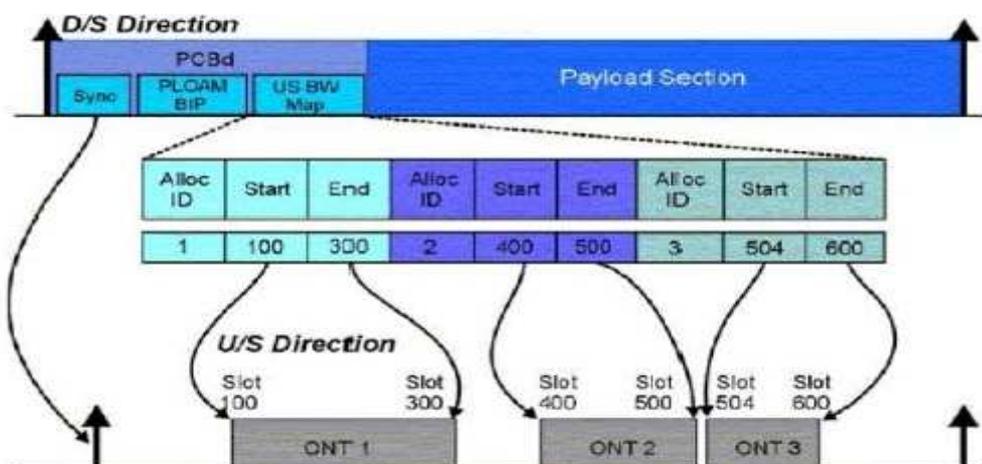


Figure 1.12 : Programme de la trame descendante.

Cette technique révèle des limites c'est pour cela elle pourrait être considéré comme une solution attractive uniquement pour un débit inférieur ou égal à 10 Gbit/s. Par conséquent, l'utilisation de la longueur d'onde est envisagée pour un débit agrégé de 40 Gbit/s dans l'accès.

1.7.2 WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-PON)

L'introduction du multiplexage en longueur d'onde WDM est d'abord la réponse à une augmentation des débits et du taux de partage dans le réseau d'accès en utilisant la longueur d'onde comme composante de multiplexage, c'est-à-dire que chaque client va attribuer une longueur d'onde spécifique. Donc dans une architecture WDM-PON, les ONU peuvent fonctionner à différentes longueurs d'onde, comme l'illustre la figure 1.13.

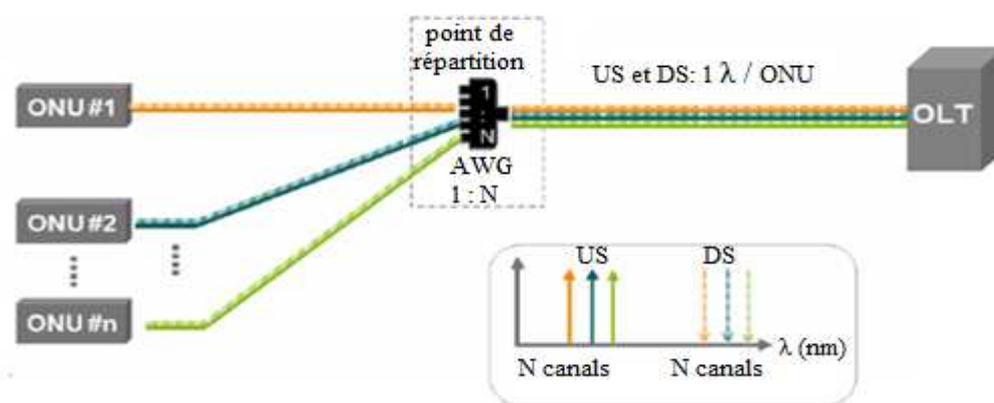


Figure 1.13 : Technique de multiplexage WDM-PON.

Dans le sens descendant, l'OLT émet toutes les longueurs d'onde sur la même fibre partagée. En utilisant un répartiteur de longueur d'onde ou un démultiplexeur de type AWG (Arrayed Waveguide Grating) dans le point de répartition, chaque ONU reçoit une longueur d'onde dédiée, ensuite, un filtre en longueur d'onde au niveau de l'ONU permet de sélectionner la longueur d'onde dédiée à chaque client.

Dans le sens montant, les ONU renvoient des longueurs d'onde différentes vers l'OLT. L'acronyme WDMA (Wavelength Division Multiple Acces) désigne l'accès multiple en longueur d'onde dans le sens montant.

Un multiplexage optique par longueur d'onde est possible à plusieurs degrés [10]:

- CWDM pour Coarse Wavelength Division Multiplexing, utilise des longueurs d'ondes espacées de 20 nm (figure I.14). L'ITU spécifie 18 longueurs d'ondes allant de 1271 nm à 1611 nm comme elle montre la figure 1.14 (a).
- DWDM pour Dense Wavelength Division Multiplexing, utilise plusieurs longueurs d'ondes faiblement espacées (0.8 nm) comparées à la solution CWDM, et elles sont

habituellement localisées dans la Bande C, dont la gamme de longueur d'onde située entre 1530 nm et 1565 nm (figure 1.14 (b)).

Dans l'accès optique, des travaux de recherche sont menés sur de l'Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing (UDWDM) où les longueurs d'ondes sont espacé de 0.2nm.

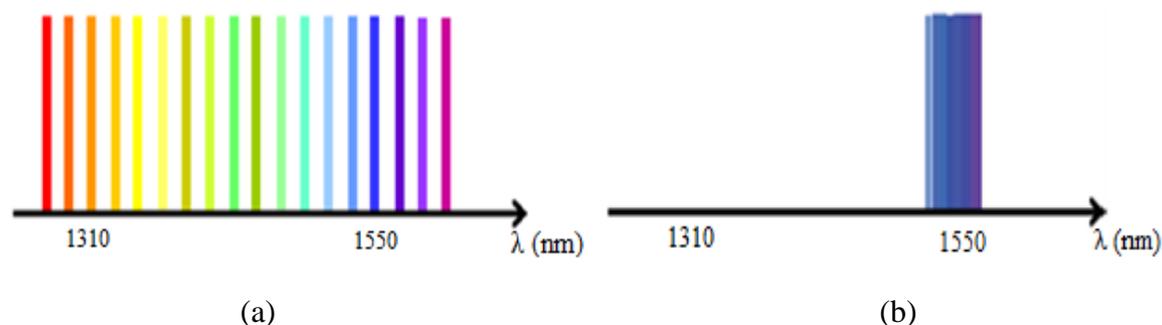


Figure 1.14: Les principales variantes du WDM : (a) CWDM, (b) DWDM.

En termes d'architecture, il existe des variantes, en particulier au niveau du composant de répartition qui peut être un coupleur ou un multiplexeur. De ces deux techniques vont découler trois architectures: l'architecture "broadcast and select" avec un coupleur, l'architecture à démultiplexage spatial avec un multiplexeur en longueur d'onde, et l'architecture hybride qui consiste à superposer plusieurs TDM PON grâce au WDM, ce qu'on appellera PON WDM-TDM. Ces deux techniques sont détaillées ci après.

a) Architecture PON WDM "broadcast and select"

Dans ce type d'architecture, on distingue la présence du même élément principal que dans un PON TDM, c'est-à-dire le coupleur 1 : N passif achromatique qui va diffuser les longueurs d'onde vers tous les ONU ("broadcast"). Chaque abonné reçoit toutes les longueurs d'onde mais un filtre optique différent pour chaque client (ou un filtre optique accordable) permet de sélectionner la longueur d'onde qui lui est attribuée ("select") comme elle illustre la figure 1.15. Il existe aussi une configuration unidirectionnelle avec deux fibres, une pour chacune des voies montante et descendante.

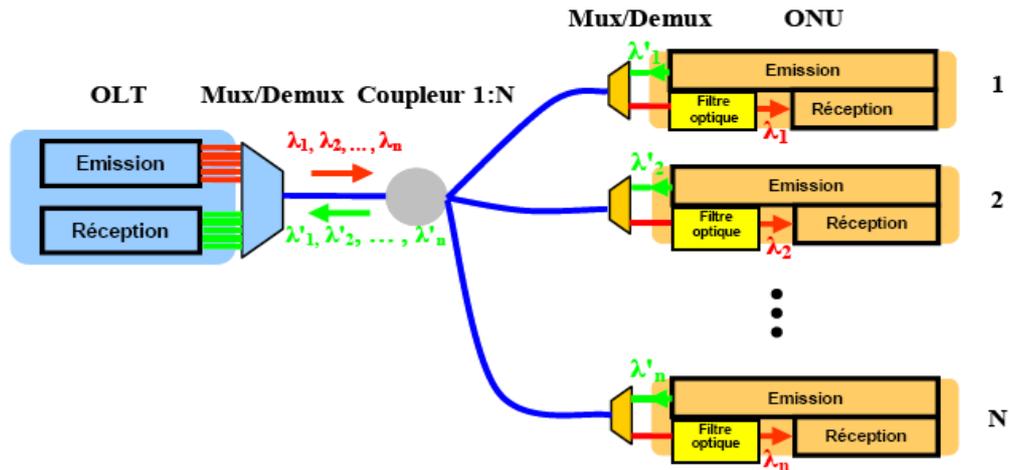


Figure 1.15: Architecture PON WDM bidirectionnelle "broadcast and select".

b) Architecture PON WDM à base d'un répartiteur en longueurs d'onde (démultiplexage spatial)

Le principe de cette technique consiste d'abord à multiplexer les longueurs d'onde descendant à l'OLT et à les faire se propager sur la fibre de distribution jusqu'au sous-répartiteur. Dans ce dernier, un démultiplexeur sépare les longueurs d'onde et envoie chacune d'elles vers le client qui lui correspond.

Pour le sens montant, chaque client a un laser de longueur d'onde différente qui correspond au port du multiplexeur sur lequel il est connecté. Tous les signaux montants sont multiplexés puis envoyés sur la fibre principale et ensuite démultiplexés à l'OLT (figure 1.16).

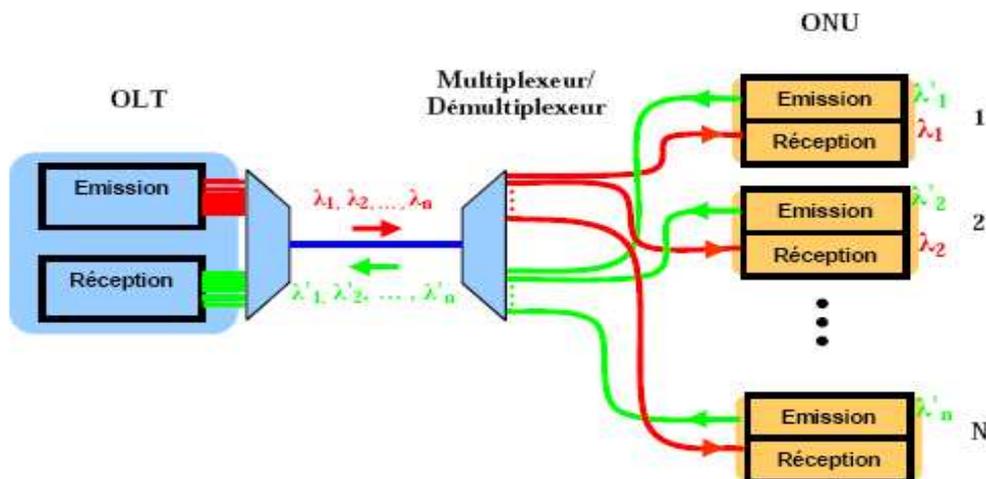


Figure 1.16 : Architecture PON WDM bidirectionnelle "démultiplexage spatial"

Cette structure 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.

c) Architecture PON hybride ou WDM-TDM PON

Dans le but d'augmenter la bande passante attribuée à chaque utilisateur et partager de manière flexible et efficace le débit porté par une longueur d'onde entre plusieurs abonnés, la combinaison entre le partage temporel et le partage en longueur d'onde dans la même architecture représente une des solutions futures pour la nouvelle génération du réseau d'accès (NGPON). On parle alors d'un WDM-TDM PON ou PON hybride.

L'ODN (optical distribution network), illustré à la figure 1.17, se compose d'une étape de démultiplexage de longueur d'onde dans le sens descendant avec chacune des "p" longueurs d'onde dirigées vers un coupleur 1: m.

La présence de multiples longueurs d'onde impose l'utilisation de lasers monomodes dont la longueur d'onde est définie très précisément, donc un laser DFB devient la source de base du PON WDM.

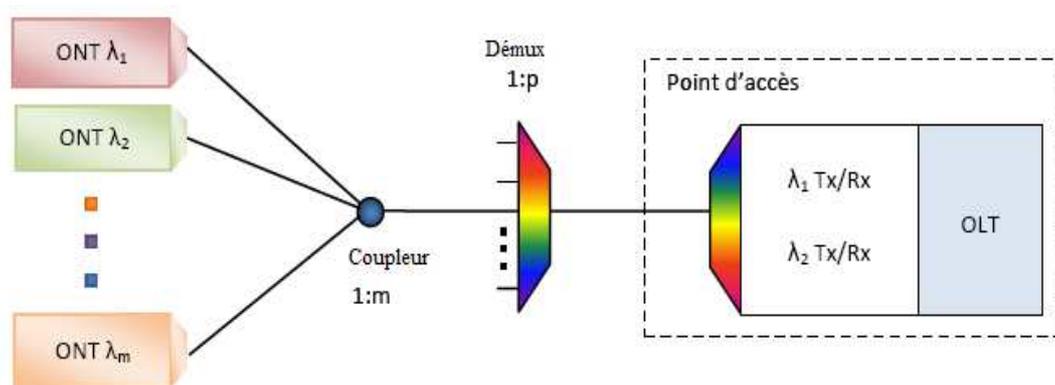


Figure 1.17 : Exemple de WDM hybride avec un diviseur de puissance dans l'ODN pour la NG-PON.

1.7.3 OFDM-PON

L'OFDM-PON (pour Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON) est actuellement considéré comme une solution prometteuse pour les futurs systèmes PON à ultra haut-débit (40/100 Gbit/s) [10]. C'est une version optimale du système de transmission multiporteuse (sous porteuses), utilisée dans différents systèmes de communications : systèmes de communications radio du type Wi-Fi, WiMAX et plus récemment dans le système radio mobile de 4^{ème} génération, le LTE.

Le principe de l'OFDM consiste à répartir le signal numérique que l'on veut transmettre sur un grand nombre de sous-porteuses indépendantes à faible débit. Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux (figure 1.18) [9].

Chaque sous-porteuse est modulée indépendamment avant d'être multiplexé en fréquence en utilisant des modulations numériques : PSK (Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

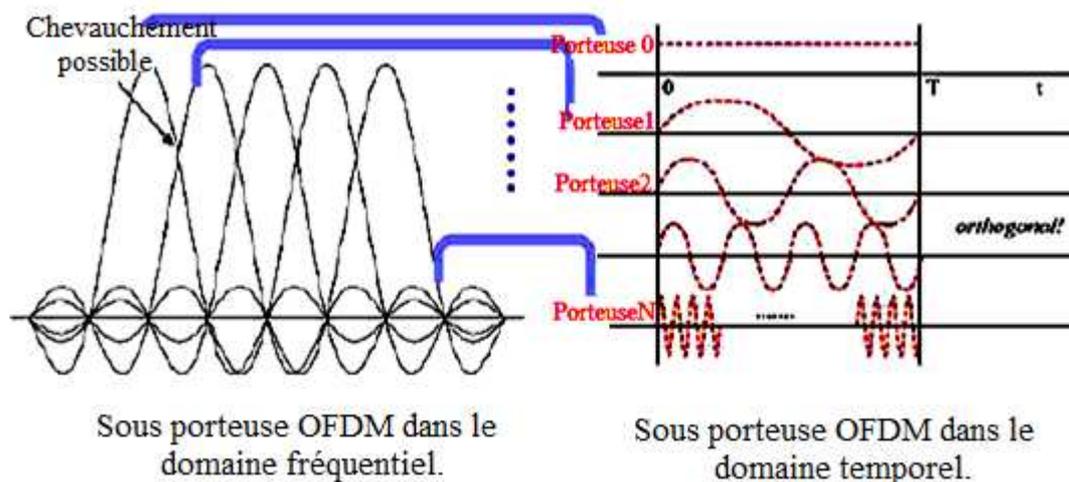


Figure 1.18 : Principe de multiplexage OFDM en sous porteuses.

La figure 1.19 ci-dessous donne un exemple d'utilisation de l'OFDM dans le PON, où chaque abonné est attribué un certain nombre de sous-porteuses spécifiques [10].

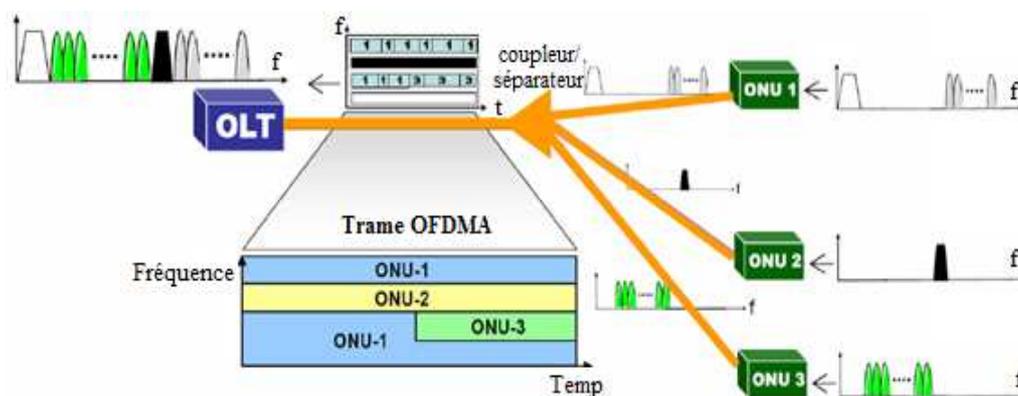


Figure 1.19 : Schéma de principe de l'OFDMA-PON.

Pour la voie descendante, l'OLT procède avec l'ensemble des porteuses et les ONU extraient les sous porteuses qui leur sont destinées en fréquence et dans le temps.

Pour la voie montante, chaque abonné émet son trafic sur une gamme de fréquence et de temps.

1.8 Pénalités de la transmission par fibre optique dans le réseau d'accès

Afin de répondre aux besoins croissants en bande passante, les futures générations du réseau d'accès (NG-PON) proposent une augmentation du débit de transmission. Cependant, des problèmes pourraient apparaître lorsque le débit sera augmenté. Les limites de transmission en considérant les effets linéaires et non-linéaires seront détaillées dans les paragraphes suivants.

1.8.1 Effets linéaires dus à l'augmentation du débit

Une étude de la montée en débit pour une transmission monocanal est présentée. Cette étude est menée afin de déterminer les limites d'une transmission basée sur le multiplexage temporel.

➤ Effet de la dispersion chromatique

Dans les fibres optiques monomodes dont le profil est à symétrie de révolution, la dispersion chromatique est la cause principale de l'élargissement des impulsions.

Considérons par exemple le cas d'une impulsion Gaussienne. Dans le domaine temporel, l'équation de l'impulsion d'entrée sera la suivante [6]:

$$\text{En } z = 0 : A(0, t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right) \quad (1.4)$$

Où T_0 représente la moitié de la largeur de l'impulsion.

Après la propagation sur une distance z , l'équation de l'impulsion devient la suivante :

$$\text{En } z \neq 0 : A(z, t) = \frac{T_0}{\sqrt{T_0^2 + i\beta_2 z}} \exp\left(-\frac{t^2}{2[T_0^2 + i\beta_2 z]}\right) \quad (1.5)$$

Où β_2 (ps²/km) est la constante de propagation nommée la dispersion de la vitesse de groupe (GVD).

On remarque que l'impulsion reste Gaussienne. En revanche, son amplitude diminue, sa largeur augmente avec z et sa phase varie en fonction de t^2 .

La moitié de la largeur de l'impulsion a 1/e en cours de sa propagation dans la fibre s'écrit comme suit :

$$T_1 = T_0 \sqrt{1 + \frac{\beta_2^2 z^2}{T_0^4}} \quad (1.6)$$

On définit la longueur de dispersion L_D :

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (1.7)$$

En utilisant l'expression de la distance de dispersion, la largeur de l'impulsion devient :

$$T_1 = T_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{L_D}\right)^2} \quad (1.8)$$

Pour $z = L_D$:

$$T_1(z = L_D) = T_0 \sqrt{2} \quad (1.9)$$

La figure 1.20 montre le profil temporel d'une impulsion Gaussienne avant et après sa propagation dans un milieu dispersif. L'évolution du spectre fréquentiel montre la baisse de l'amplitude de l'impulsion. Cette baisse d'amplitude affecte le rapport signal sur bruit optique qui diminue à son tour.

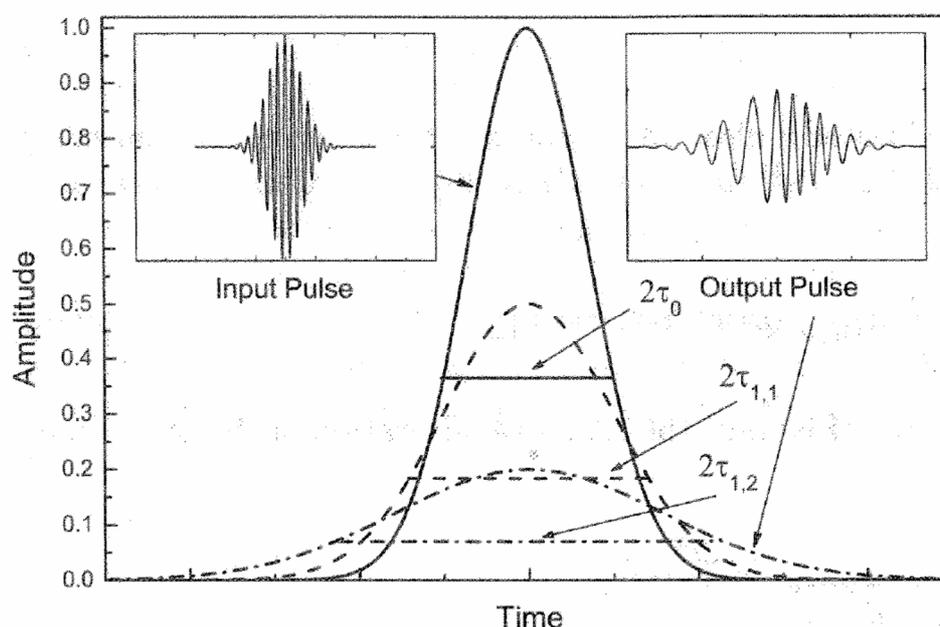


Figure 1.20 : Elargissement temporel d'une impulsion d'enveloppe Gaussienne après propagation dans une fibre.

Un phénomène d'interférence entre canaux adjacents peut se rajouter si l'élargissement de l'impulsion dépasse le quart du temps bit :

$$B \sqrt{|\beta_2| L} \leq \frac{1}{4} \quad (1.10)$$

Où B représente le débit de transmission du système et L la longueur de fibre utilisée.

Dans cette formule, la dérivée seconde du vecteur d'onde peut être écrite en fonction du paramètre de la dispersion chromatique D.

En effet :

$$D \text{ (ps/ (nm.km))} = \frac{d\tau_g}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (1.11)$$

On déduit alors la longueur de fibre maximale pour éviter les problèmes de recouvrement entre symboles :

$$L_{max,DC} \leq \frac{2\pi C}{4^2 B^2 |D| \lambda^2} \quad (1.12)$$

➤ Effet du chirp laser

Lorsqu'un laser est modulé directement, la fréquence subit un changement dû aux variations de gain dans la cavité laser. Ces variations sont induites par les fluctuations de la densité de porteurs qui provoquent aussi des variations de la phase du signal optique et de l'indice de réfraction qui dépend de la densité de porteur.

Les fluctuations de la densité de porteurs sont converties en fluctuations de fréquence. Le paramètre de « chirp » ou coefficient de couplage amplitude-phase détermine le rapport entre le changement d'indice de réfraction et le gain [6]:

$$\alpha_{chirp} = \frac{dn/dN}{dG/dN} \quad (1.13)$$

Où n : est l'indice de réfraction de la cavité laser.

N : est le nombre de porteurs.

G : est le gain du laser.

L'élargissement spectral lors d'une modulation directe de laser est proportionnel au paramètre de « chirp ». La variation instantanée de la fréquence est donnée par l'équation suivante :

$$\delta\nu(t) = \frac{\alpha_{chirp}}{4\pi} \left[\left(\frac{d}{dt} \ln P(t) \right) + \chi P(t) \right] \quad (1.14)$$

Où $P(t)$: est la variation de la puissance.

χ : est une constante liée au matériau. Elle peut prendre les valeurs comprises entre 0 à quelques dizaines. Le premier terme dans l'équation est le « chirp instantané qui se remarque dans les fréquences plus élevées du spectre de $P(t)$ » et le second terme est le « chirp adiabatique qui dépend des caractéristiques des matériaux qui composent le laser ».

➤ Limitation par la dispersion de modes de polarisation (PMD)

Comme nous l'avons déjà défini précédemment, la dispersion modale de polarisation, ou PMD (Polarisation Mode Dispersion) est consécutive à la différence dans les indices de réfraction et les constantes de propagation entre les deux modes de polarisation qui donnera lieu à un décalage de la phase pendant la propagation. Ce décalage de phase est vu à travers le retard différentiel de groupe dit DGD (pour Differential Group Delay) entre les axes rapide et lent, ce retard augmente linéairement avec la longueur de la fibre.

La PMD de premier ordre est caractérisée par le coefficient D_{P1} exprimé en $ps/(km)^{1/2}$ qui est un paramètre statistique variant avec le temps et les conditions d'opération. Le retard total accumulé entre les états principaux de polarisation s'accumule de manière aléatoire et est proportionnel à \sqrt{L} . Ce retard est donné par :

$$\Delta\tau_{P1} = 3 \langle D_{P1} \rangle \sqrt{L} \quad (1.15)$$

$\langle D_{P1} \rangle$ est la valeur moyenne du coefficient de la PMD avec des valeurs typiques de 0.01 à quelques $ps/(km)^{1/2}$.

Pour une fibre donnée, on caractérise alors sa PMD par une valeur qui se mesure en ps/\sqrt{km} . Les meilleures PMD qui ont été obtenues pour les fibres standard sont inférieures à $0.1 ps/\sqrt{km}$.

1.8.2 Effets non-linéaires dus à l'augmentation de la puissance optique

Les effets non-linéaires dans la fibre sont dus à une forte intensité du signal de propagation. En effet, si la puissance optique est augmentée pour conserver un rapport signal sur bruit suffisant, des effets non-linéaires peuvent apparaître :

➤ Effets Kerr

En optique géométrique est une extension des lois de réfraction de la lumière lors de la propagation de cette lumière dans des milieux d'indices variables. L'indice de réfraction n_{NL} peut alors exprimer sous la forme d'une fonction non-linéaire, du champ électrique E (anisotropie du matériau).

$$n_{NL} = n_0 + n_2 |E|^2 \quad (1.16)$$

Où n_0 est l'indice de réfraction linéaire du matériau (en absence de signal optique), et n_2 le coefficient non-linéaire de réfraction ou coefficient Kerr en m^2/W .

Une première conséquence de l'effet Kerr se traduit par de l'automodulation de phase, de la modulation de phase croisée et du mélange à quatre ondes.

- **Automodulation de phase (SPM, Self Phase Modulation)**

Une impulsion lumineuse induit une modification d'indice dans le milieu de propagation, et donc une modulation de phase parasite.

La SPM provoque du chirp sur toute la durée de l'impulsion. Cet élargissement agit en conjonction avec la dispersion chromatique. Il peut ainsi renforcer l'élargissement temporel en régime normal de la dispersion lorsque les fréquences les plus basses se propagent plus vite que les fréquences les plus élevées; (le "rouge" va plus vite que le "bleu"). Pour le régime anormal l'automodulation de phase peut s'opposer à l'élargissement de l'impulsion car les

basses fréquences créées en tête seront plus lentes que les hautes fréquences qui sont en queue [6].

- **Modulation de phase croisée (XPM, Cross Phase Modulation)**

La modulation de phase croisée ou XPM (Cross Phase Modulation) est présentée lorsque plusieurs canaux optiques transportent des informations différentes dans la même fibre. Ce type de modulation résulte en premier lieu de l'interaction non-linéaire entre les différents canaux d'un signal WDM, qui ne se manifestent donc qu'en transmission WDM. Et en deuxième lieu d'un déphasage induit par l'effet Kerr.

Cependant, contrairement à la SPM, la XPM est la conséquence sur un canal optique WDM d'un déphasage induit par la présence d'un signal optique issu d'un canal voisin. L'effet global est de décaler dans le temps les impulsions véhiculées par les canaux.

- **Mélange à quatre ondes (FWM, Four Wave Mixing)**

Le FWM se produit entre différentes composantes d'un signal WDM. Elle consiste non plus en un déphasage du signal, mais en une interaction non-linéaire entre trois ondes de pulsations ω_i , ω_j et ω_k qui consiste à créer une nouvelle onde à la pulsation [12]:

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \quad (1.17)$$

Cette onde est appelée produit d'intermodulation.

➤ **Effets Raman et Brillouin**

L'effet Raman est le plus connu des effets non linéaires. Il s'agit d'une interaction photon-phonon, c'est-à-dire d'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau. Par contre l'effet Brillouin est de même nature que la diffusion de Raman, mais l'interaction se fait avec des phonons acoustiques, c'est-à-dire avec les vibrations de l'ensemble du matériau, qui se propagent à la vitesse des ondes acoustiques.

1.9 Les solutions proposées pour réduire l'impact des effets linéaires et non linéaires

Des solutions peuvent être séparées en deux catégories. La première est basée sur des méthodes de compensation optiques comme par exemple l'ajout de fibre à compensation de dispersion (DCF, Dispersion Compensation Fiber), ou encore l'utilisation de réseaux de Bragg chirpés. La seconde méthode peut être une technique électronique pouvant se baser sur l'égalisation du signal après sa détection, le Codage Correcteur d'Erreurs FEC (Forward Error Correction) ou les formats de modulation à haute efficacité spectrale.

Ces deux méthodes se différencient par leur coût. En effet bien que la méthode optique soit plus efficace, elle reste nettement plus chère que la méthode électronique.

1.10 Les performances d'un réseau optique passif

Les réseaux Ethernet point à point ne permettent pas actuellement d'affecter une bande passante supérieure à 100Mbit/s. En revanche les architectures PON offrent une grande flexibilité pour l'allocation de la bande passante. Cette dernière est en effet allouée de manière totalement dynamique à l'ensemble des utilisateurs ayant besoin de débit à un instant donné, comme elle est gérée par des algorithmes DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) qui permettent d'offrir un débit de 1 à 2,5 Gbit/s est partagé entre des utilisateurs pouvant aller jusqu'à 64. Les ONU ont des interfaces standardisées RJ45 avec des ports 10/100 Base-T ou 10/100/1000 Base-T autorisant des débits instantanés jusqu'à 1 Gbit/s.

Le réseau PON est fiable ainsi qu'il offre un mode de fonctionnement sécurisé en ce qui concerne la confidentialité des données. Il mis en place des mécanismes afin qu'un abonné ne puisse lire que les données qui lui sont adressées [4]:

- Le trafic descendant est crypté. Il utilise l'algorithme standardisé AES à 128-bits où chaque équipement client a sa propre clé de cryptage/décryptage privée. Ces clés sont automatiquement échangées par l'OLT et l'ONU à des intervalles 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.

En outre, des mécanismes d'authentification des ONT permettent de refuser la connexion pirate d'un nouvel ONT sur le réseau. Cette tentative restera infructueuse et sera automatiquement détectée par une alarme au niveau central.

1.11 Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un panorama du réseau d'accès optique et de son évolution. Plusieurs techniques ont été décrites consiste à amener la fibre optique au plus près de l'utilisateur à fin d'avoir un très haut débit, en particulier le réseau fibré jusqu'au foyer FTTH.

On a cité les différentes topologies utilisées pour ce déploiement : point à point et point à multipoint passif ou PON (Passif Optical Network) qui permet une minimisation des infrastructures fibres utilisées entre plusieurs utilisateurs donc un faible coût de gestion et de maintenance du réseau.

Ensuite nous avons défini les différents standards de réseau PON : APON, BPON, EPON, GPON, NGPON et NGPON2 auquel nous nous sommes intéressés. Celui-ci projette d'offrir un débit de 40Gbit/s pour une portée de 20km, une performance que nous allons essayer de réaliser à travers les techniques les plus avancées actuellement.

Nous avons présenté les effets linéaires et les effets non-linéaires qui limitent à la fois les distances de propagation et les débits de transmission. Pour pallier ce problème il existe des solutions optiques et des solutions électroniques.

Dans le chapitre suivant on s'intéresse aux techniques de modulations optiques en particulier la modulation DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) pour compenser l'interférence entre symbole (ISI) qui limite les performances de transmission et parce qu'elle est une solution attrayante par son faible coût et sa facilité de mise en œuvre.

Chapitre 2

Modulations optiques

2.1 Introduction

Avec le développement rapide des techniques de traitement numérique, et le faible coût des composants électroniques comparés aux composants optiques, l'utilisation de l'électronique pour améliorer les performances (débit, portée) des systèmes de transmission optique devient de plus en plus pertinente [10].

Dans ce deuxième chapitre, nous allons définir les critères de qualité d'une transmission numérique, le principe des techniques de modulation directe et externe, ensuite pour traduire les signaux binaires en optique nous allons détailler les différents formats de modulation en particulier le format de modulation différentielle en phase sur quatre niveaux DQPSK.

2.2 Transmission numérique

La transmission numérique consiste à faire transiter les informations sur le support physique de communication sous forme de signaux numériques, or les données analogiques devront préalablement être numérisées avant d'être transmises dans le but d'avoir une meilleure immunité au bruit et aux imperfections de la chaîne de transmission ainsi que l'optimisation de l'emploi de la bande passante.

2.2.1 Numérisation

Dans tous les systèmes de communication, l'information à transmettre est un signal électrique qui peut être sous forme analogique ou numérique. Dans le cas analogique le signal est un courant électrique variant continuellement avec le temps, nous pouvons par exemple citer la conversion des signaux audio (voix), vidéo (image) en un champ électrique respectivement par le microphone et la caméra vidéo. Par contre le signal numérique est un signal discret (discontinu), qui se résume en une succession de « 0 » et de « 1 ».

La transformation d'un signal analogique en signal numérique est appelée numérisation. Cette dernière comporte trois activités parallèles :

- **Echantillonnage** : consiste à transformer un signal analogique en un signal discret, en capturant des valeurs à intervalle de temps régulier. Il est répété à intervalles temporels équidistants contrôlés par une horloge d'échantillonnage de période T_e . La fonction obtenue n'est plus à temps continu mais discret comme la montre la figure 2.1 (a). Chaque échantillon est repéré par son numéro d'ordre n (entier positif) à l'instant nT_e .

Pour reconstruire un signal de sortie de manière fidèle au signal d'entrée, il faut choisir une fréquence d'échantillonnage f_e au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale f_{max} contenue dans le signal d'entrée.

Cette opération est appelé le théorème de Shannon :

$$f_e \geq 2f_{max} \quad (2.1)$$

- **Quantification :** Une fois la fréquence d'échantillonnage fixée, il faut encore transformer chaque échantillon en un chiffre qui le représente (figure 2.1 (b)), cette opération est imposée par le CAN (Convertisseur Analogique-Numérique). On appelle « pas de la quantification » l'intervalle de tension qui existe entre deux valeurs numériques binaires successives. En remplaçant les valeurs continues des échantillons par des valeurs discrètes, on commet inévitablement une erreur appelé « erreur de quantification »
- **Codage :** il fait correspondre à chaque niveau de quantification une expression numérique binaire appelé le mot PCM (Pulse Code Modulation) (figure 2.1 (c)). La longueur de ce mot est déterminée par la loi:

$$n = \log_2 q \quad (2.2)$$

Où : q est le nombre de niveau de quantification.

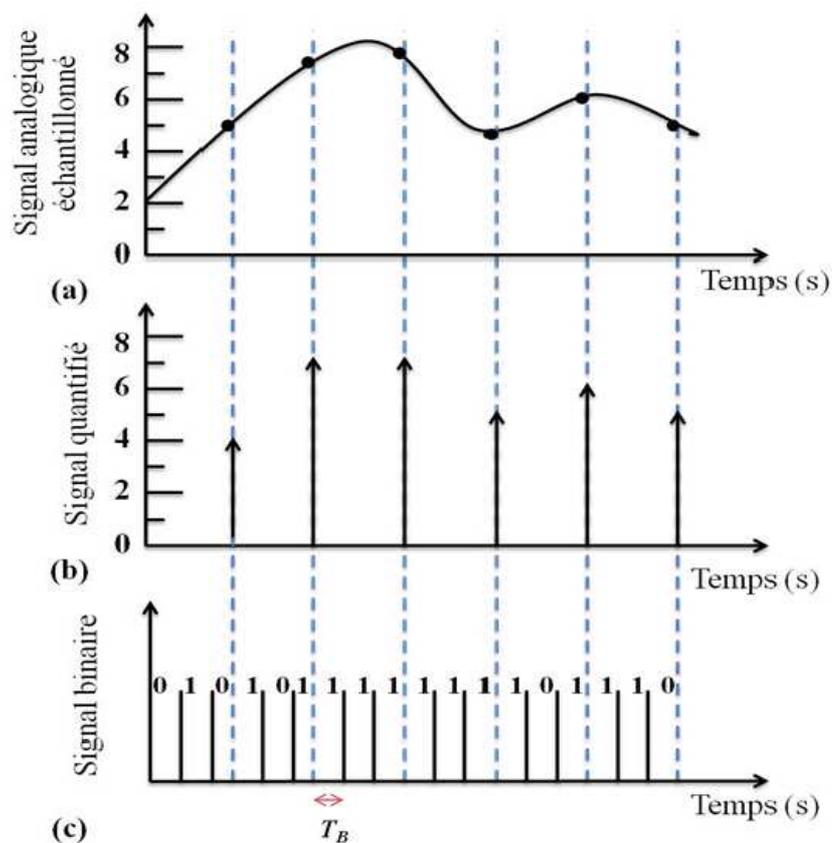


Figure 2.1 : Numérisation d'un signal analogique (a) échantillonnage, (b) quantification, (c) codage.

2.3 Critères de qualité d'une transmission optique

Au vu de toutes les dégradations que peut subir le signal lors de son transport via la fibre optique, il s'est avéré nécessaire d'établir des critères pour juger de la qualité d'une transmission. En pratique, ces critères sont évalués après détection du signal : le diagramme de l'œil, le taux d'erreur binaire (BER), le facteur de qualité (Q) et le rapport signal sur bruit optique (OSNR).

2.3.1 Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est une méthode de visualisation de la qualité du signal, il dépend du type de codage utilisé (NRZ, RZ).

Il est défini par la superposition d'un grand nombre de symboles binaires dans le domaine temporel, comme le montre la figure (2.2). En laboratoire, il est obtenu après détection de la photodiode, au moyen d'un oscilloscope synchronisé sur la fréquence d'horloge [13].

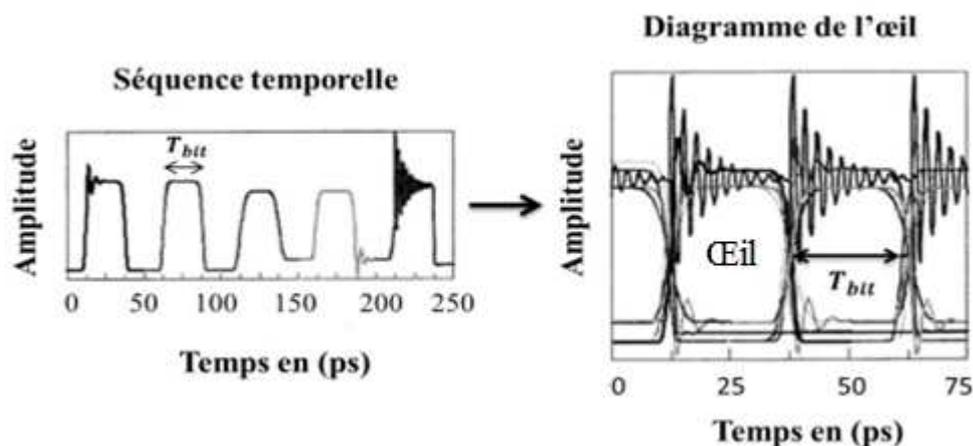


Figure 2.2 : La construction du diagramme de l'œil à partir de la séquence temporelle.

A partir du diagramme de l'œil, nous pouvons facilement constater la qualité du signal. Si les niveaux des symboles « 1 » sont bien distincts des niveaux des symboles « 0 », nous dirons que l'œil est ouvert. Par contre, si la dégradation est de telle sorte que nous ne pouvons plus distinguer entre les deux niveaux, nous parlerons d'un œil fermé soit horizontalement ou verticalement.

2.3.2 Taux d'erreur binaire (BER)

Etant donné que dans les systèmes de transmission, les données sont transmises d'une manière numérique, c'est-à-dire une séquence de données binaires, le critère le plus intuitif permettant d'évaluer la qualité du signal transmis est la comparaison entre la séquence binaire à l'émission et celle à la réception. Nous parlons dans ce cas de taux d'erreur binaire TEB ou BER (pour Bit Error Rate).

Il est défini par le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits transmis [14] :

$$BER = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (2.3)$$

En générale en télécommunications optiques on considère qu'on a une bonne qualité de transmission pour un TEB variant entre 10^{-9} et 10^{-12} .

2.3.3 Facteur de qualité (Q)

Il existe un autre critère d'évaluation de la qualité de transmission appelé le facteur de qualité (Q) obtenu à partir des statistiques de bruit (moyennes et écarts-types) des niveaux « 1 » et « 0 » du signal à détecter.

C'est un paramètre permettant d'estimer le taux d'erreur binaire sans avoir à compter les erreurs, mais en considérant tout simplement l'amplitude moyenne des bits « 1 » et « 0 » et la valeur de leur écart type σ_1 et σ_0 , ce facteur est défini par [1]:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.4)$$

Où : I_1 et I_0 sont respectivement les valeurs moyennes des niveaux « 1 » et « 0 », σ_1 et σ_0 les écart-type du bruit sur le signal des symboles « 1 » et « 0 ». Ces grandeurs sont représentées sur la figure 2.3 [15].

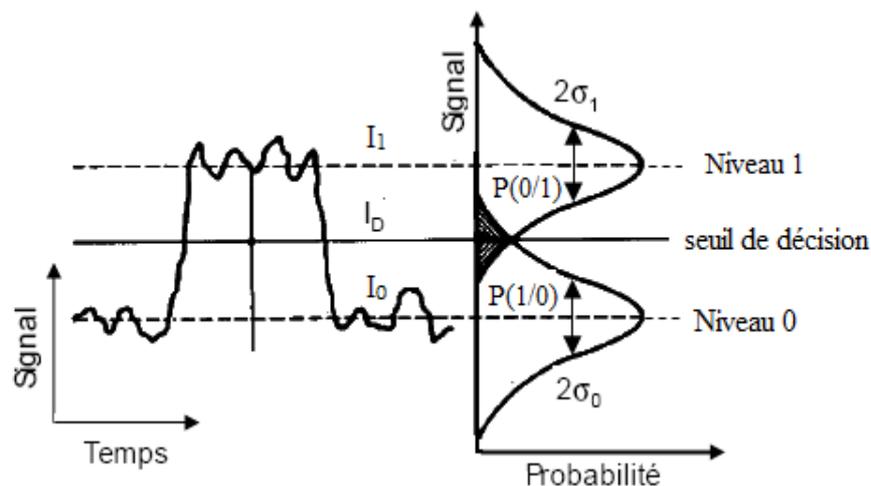


Figure 2.3 : Principe d'évaluation du taux d'erreur par le facteur Q : à gauche, trace temporelle du signal avec les niveaux moyens « 1 » et « 0 » (respectivement I_1 et I_0). À droite : distributions des deux niveaux et écarts-types associés.

Le BER est simplement relié au facteur de qualité Q par la formule suivante :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q} \quad (2.5)$$

Où erfc désigne la fonction d'erreur complémentaire définie par :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-y^2} dy \quad (2.6)$$

2.3.4 Rapport signal sur bruit optique (OSNR)

Le rapport signal sur bruit optique OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) est un paramètre permettant d'évaluer la qualité du signal à la réception. La valeur de ce paramètre est le rapport entre la puissance du signal optique P_S et la puissance d'émission spontanée amplifiée P_{ASE} . Ce paramètre doit être supérieur à une certaine valeur pour que le signal puisse être détecté correctement. Ce dernier est mesuré dans une bande de référence B_{ref} dans laquelle est considéré le bruit. Ce rapport est donné par la formule suivante :

$$OSNR_{B_{ref}} = \frac{P_S}{P_{ASE}} = \frac{P_S}{2N_0 B_{ref}} \quad (2.7)$$

Où N_0 est la densité spectrale de puissance du bruit d'émission spontanée amplifiée sur une des deux polarisations orthogonale et le facteur 2 provient du fait que le bruit d'ASE n'est pas polarisé. Par convention, la bande de référence B_{ref} est généralement fixée à 0,1 nm, soit de manière équivalente à 12,5 GHz à 1550 nm.

2.4 Modulation directe vs modulation externe

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 deux techniques : la modulation directe et la modulation externe. Le détail de ces 2 configurations est donné dans ce paragraphe [16].

2.4.1 Modulation directe

La modulation directe consiste à moduler directement l'intensité de la lumière émise par la diode laser en fonction de la variation du courant d'alimentation du laser contenant de l'information. Dans ce cas, le laser se comporte comme un interrupteur, s'allumant pour transmettre un bit « 1 » et s'éteignant pour transmettre un bit « 0 ».

La figure 2.4 illustre le principe d'un modulateur direct. Il est composé d'un générateur binaire causant une séquence binaire qui définit l'information et d'un driver qui a

pour rôle de commander la source optique en niveaux de puissance émise (en fixant les valeurs du courant d'alimentation).

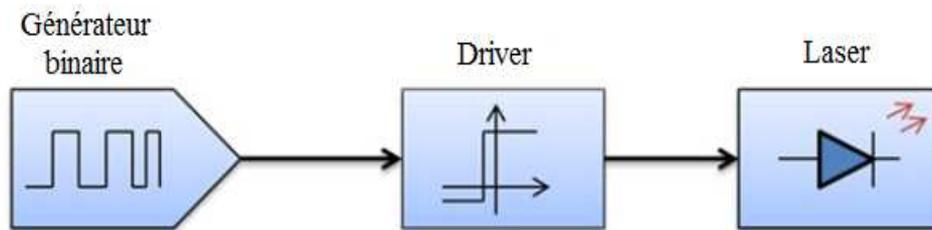


Figure 2.4 : Schéma de principe de la modulation directe.

Cette technique offre quelques avantages tels que la simplicité et le faible coût de mise en œuvre. Cependant, elle présente aussi quelques limitations qui détériorent le signal optique émis. Les lasers en sont souvent la cause. Leur temps de réaction, les oscillations, le bruit créé fait que la modulation directe engendre pour les hauts et très hauts débits certaines dégradations sur le signal optique modulé. A cela, la modulation externe constitue un remède.

2.4.2 Modulation externe

La modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu déjà émis par une source laser. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux à sa sortie du laser.

Cette modulation consiste à utiliser un modulateur externe, ce lui-ci est commandé par une tension externe $v(t)$ qu'elle va moduler l'information à transmettre. Cette tension appliquée au modulateur a pour propriété de modifier le facteur de transmission en intensité de sortie. La figure (2.5) illustre le principe de la modulation externe.

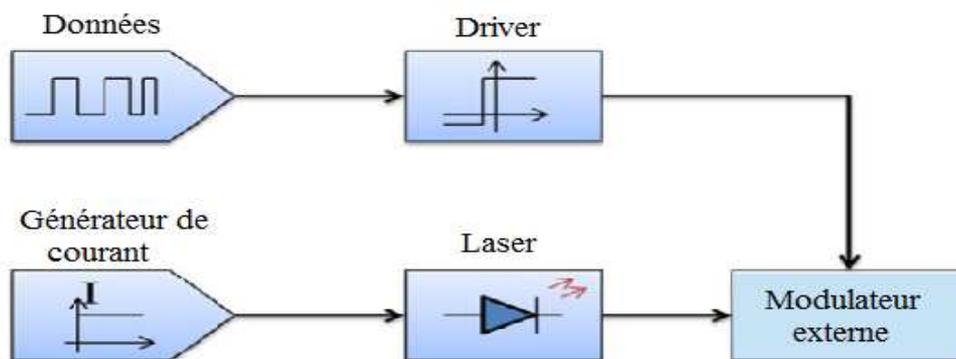


Figure 2.5 : Schéma de principe de la modulation externe.

Parmi les modulateurs les plus utilisés dans les systèmes de transmission, nous pouvons citer le modulateur de type Mach-Zehnder (MZM, Mach-Zehnder Modulator), dont le principe de fonctionnement se base sur l'interférométrie. Le signal à la sortie de ce type de

modulateur est beaucoup moins dégradé que celui issu de la modulation directe, d'où son utilisation dans les systèmes à longues distances.

2.4.2.1 Modulateur Mach-Zehnder

Le modulateur de Mach-Zehnder est un interféromètre constitué d'un bras de référence et d'un bras dans lequel une variation de phase est induite par effet électro-optique (figure 2.6). Ces deux bras sont deux guides optiques parallèles et de longueurs égales.

La recombinaison des deux bras donne lieu à des interférences, qui peuvent être constructives (maximum d'intensité transmise) ou destructive (minimum d'intensité transmise).

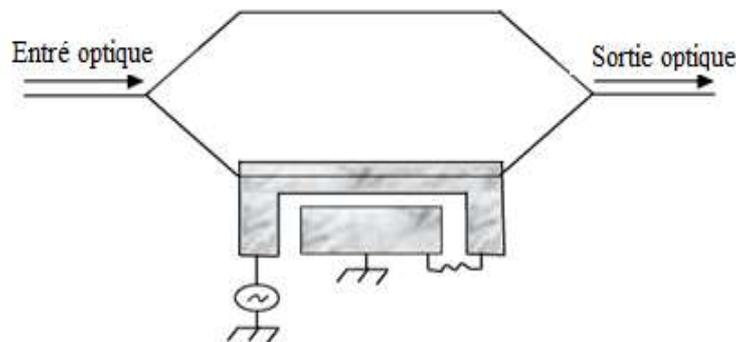


Figure 2.6 : Interféromètre de Mach-Zehnder.

Ce modulateur est en majorité réalisé sur des substrats LiNbO₃ qui permettent de réaliser des guides à très faibles pertes (< 0,2 dB/cm) [17].

2.5 Techniques de modulation optique

Les systèmes de transmission par fibres optiques sont conçus pour faire propager par voie optique des données binaires « 0 » et « 1 ». Il convient donc de déterminer un code permettant de traduire ces signaux dans le domaine optique par une modulation adéquate d'un signal optique continu. Le code utilisé pour la traduction en optique des signaux binaires est appelé format de modulation [14]. Chacune de ces dernière est caractérisé à la fois par son comportement temporel en amplitude, visualisable par exemple sur un diagramme de l'œil, son comportement en phase, pouvant être visualisé sur une constellation, et son spectre.

2.5.1 Codage en intensité OOK (On-Off Keying)

2.5.1.1 Format NRZ (Non Return to Zero)

C'est le codage le plus simple à réaliser : le bit 1 est codé par un niveau haut $+A$ pendant une période T_b , et un bit 0 correspond un niveau bas $-A$ pendant la même durée.

La figure 2.7 montre un exemple de trace temporelle, le diagramme de l'œil et le spectre d'un format NRZ.

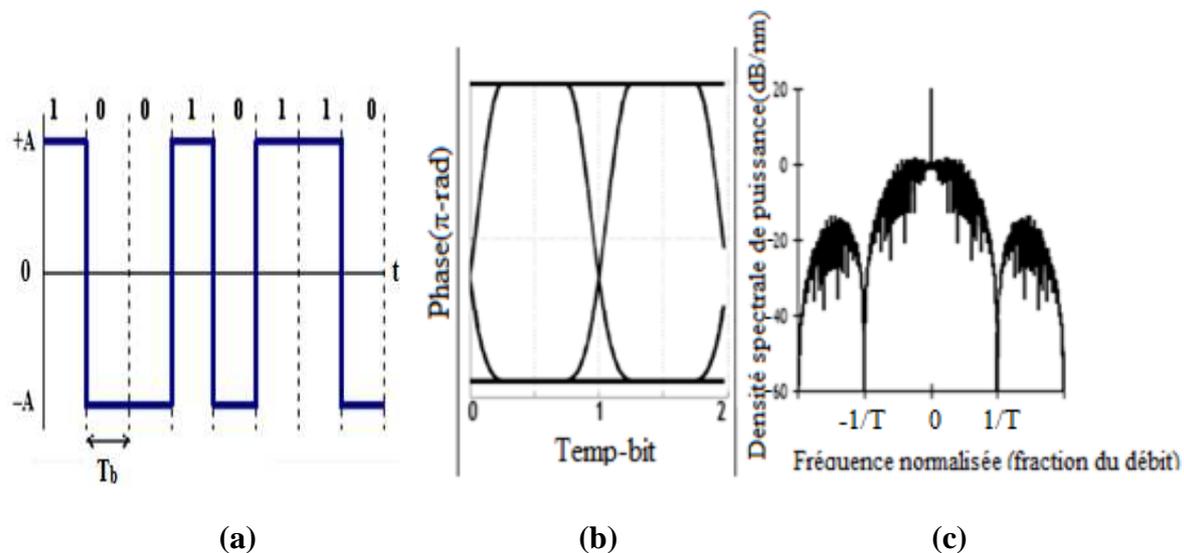


Figure 2.7 : Format de modulation de type NRZ, (a) Trace temporelle, (b) Diagramme de l'œil, (c) Le spectre.

Le spectre de ce format est un sinus cardinal au carré de largeur $1/T$, il comporte un lobe principal et des lobes secondaires deux fois plus étroits, ainsi, il est facilement reconnaissable à son onde porteuse unique située au centre de son spectre.

Le format NRZ est incontestablement le format le plus simple à générer ainsi il se caractérise par un bon rapport signal sur bruit.

Pour effectuer la montée en débit dans les futurs réseaux d'accès optiques, l'option de conserver un format de modulation simple comme l'OOK-NRZ reste privilégiée.

2.5.1.2 Format RZ (Return to Zero)

Il est associé à chaque bit 1 un niveau $+A$ pendant une durée $T_b/2$ puis un niveau $-A$ pendant la durée qui reste et à chaque bit 0 un niveau $-A$ pendant la période T_b .

La Figure 2.8 montre un exemple de trace temporelle, le diagramme de l'œil et le spectre d'un format RZ.

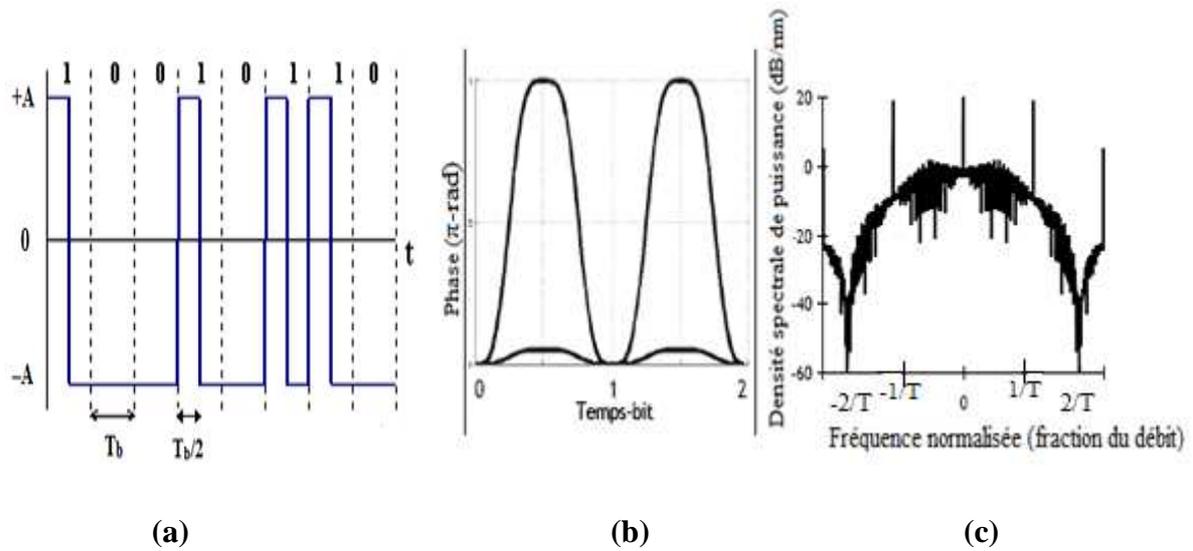


Figure 2.8 : Format de modulation de type RZ, (a) Trace temporelle, (b) diagramme de l’œil, (c) Le spectre.

Le spectre de ce format est aussi un sinus cardinal au carré mais son lobe principal à une largeur double que celui du spectre NRZ. Nous pouvons aussi y observer l’apparition des harmoniques de l’onde porteuse, qui étaient situées entre les lobes du spectre et donc invisibles dans le cas du format NRZ.

Les différentes impulsions d’un signal RZ ont moins tendance à se chevaucher et à interférer entre elles par le biais de la dispersion, que les différents symboles d’un signal NRZ affectés par la même dispersion.

En outre, les performances du format RZ en termes de sensibilité et de tolérance aux effets non-linéaires s’en trouvent ainsi améliorées par rapport à celles du format NRZ [14]. Par contre la bande passante est doublée et le rapport signal sur bruit est réduit par rapport au format NRZ.

2.5.2 Modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

C’est une modulation à 4 états de phase (MDP-4) qui sont donnés par la formule ci-dessous :

$$\phi_k = (2k + 1)\frac{\pi}{4} \text{ avec } 0 \leq k < 4 \tag{2.8}$$

On peut donc coder des symboles de 2 bits et la phase du signal modulé peut ainsi changer de $0, \frac{\pi}{4}$ ou π , en passant d’un symbole à un autre. Les phases des quatre états de chaque symbole sont: $\phi_k = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$ et $\frac{7\pi}{4}$ représentées dans la figure 2.9.

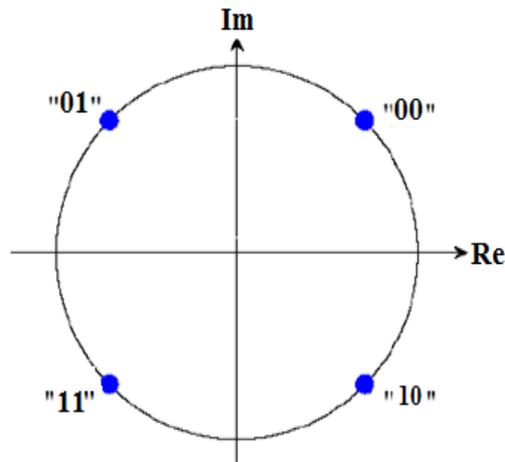


Figure 2.9 : Diagramme de constellation pour la modulation QPSK.

La figure 2.10 schématisé ci-dessous montre le principe de la modulation et la démodulation d'un signal QPSK.

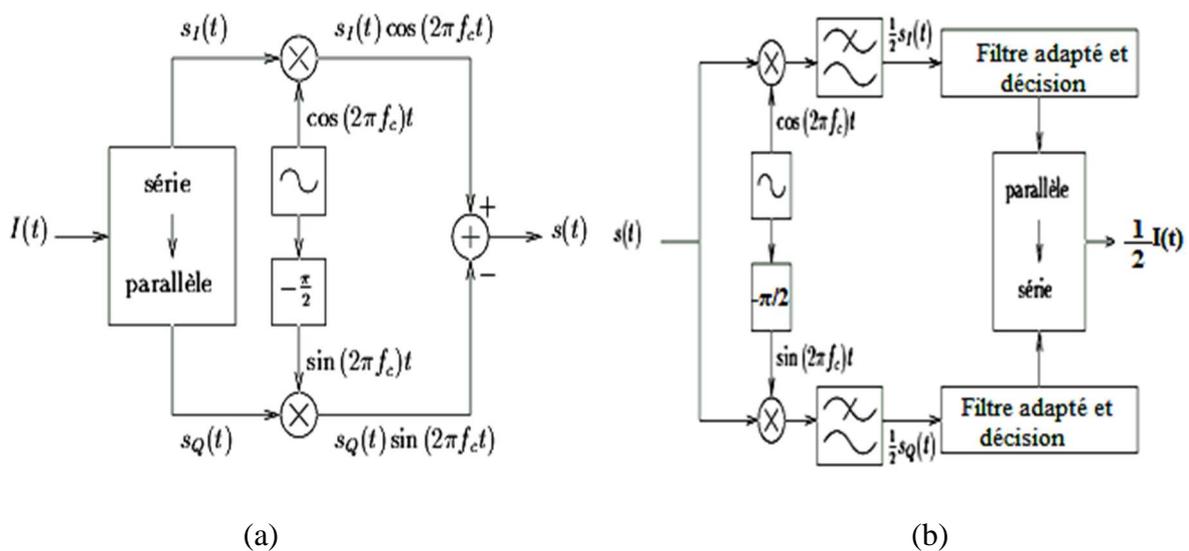


Figure 2.10 : (a) Modulateur QPSK, (b) démodulateur QPSK.

Le signal modulé QPSK correspond à la modulation en quadrature de deux signaux numériques en bande de base. La première phase de la démodulation consiste donc à retrouver les composantes en phase et en quadrature du signal modulé. Les deux signaux numériques en bande de base obtenus sont ensuite démodulés grâce au filtre adapté (un pour chaque signal) et recombinaison pour former la séquence binaire de départ.

2.5.3 Modulation DPSK (Differential Phase Shift Keying)

Dans ce type de modulation, les données sont préalablement codées de façon différentielle. Pour transmettre le bit « 1 » qui correspond à la phase 180°, nous maintenons la donnée précédente, et pour transmettre le bit « 0 » qui correspond à la phase 0°, nous changeons de signe par rapport à la donnée précédente.

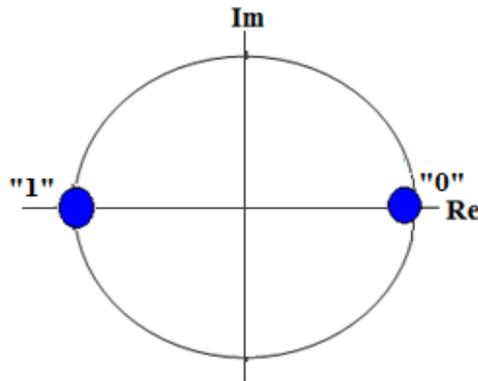


Figure 2.11 : Diagramme de constellation pour la modulation DPSK.

Pour produire le signal modulé, on peut utiliser le dispositif ci-dessous :

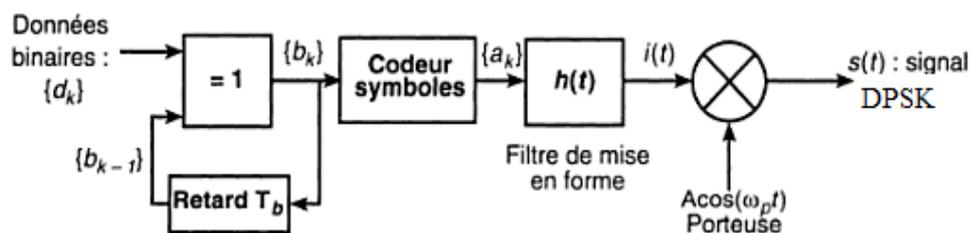


Figure 2.12 : Modulateur DPSK.

Les grandeurs d_k et b_k sont des grandeurs binaires peuvent prendre les valeurs 0 ou 1.

Le signal reçu est donnée par la relation :

$$s(t) = A \cos(\omega_p t + \varphi_k) \tag{2.9}$$

Avec : $(n - 1)T < t \leq nT$

Où la phase φ_k correspond au symbole b_k .

Le signal $s(t)$ est appliqué directement à l'une des entrées du démodulateur de produit, à l'autre entrée on applique le signal $s(t)$ retardé de la durée T d'un signal élémentaire (figure 2.13).

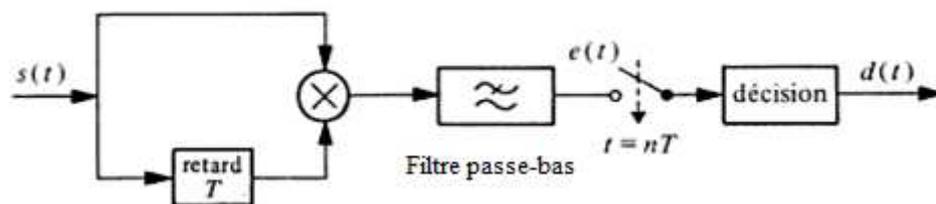


Figure 2.13 : Démodulateur DPSK.

Les opérations effectuées par le récepteur sont : la multiplication du signal reçu par sa réplique retardée d'une durée T , l'intégration à court terme effectuée par le filtre passe bas qui élimine la seconde harmonique.

2.5.4 Modulation DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)

La modulation différentielle en phase sur quatre niveaux DQPSK, est inspirée de la DPSK, modulation en phase sur deux niveaux. La différence principale entre ces deux formats est le nombre de valeurs de phase que peut prendre le signal optique modulé. La DQPSK en comporte 4 différentiels de phase, chacune correspond à 2 bits par symbole, alors que la DPSK n'en comporte que 2 phases.

2.5.4.1 Méthodes de génération

Pour générer la DQPSK, il est nécessaire de séparer la séquence binaire initiale en deux sous-séquences. Généralement, ces sous séquences correspondent à la séquence des bits impairs appelée la séquence I, pour In-phase et à celle des bits pairs appelée la séquence Q, pour Quadrature.

Il existe principalement deux méthodes de génération de la DQPSK, consistant chacune en une combinaison de deux modulations de phase [18]. Chaque modulation de phase est commandée par la séquence binaire I ou Q.

- **Génération en série**

Comme elle montre la figure 2.14 schématisé ci-dessous, le signal continu issu de la source laser subit une première modulation de phase DPSK de la séquence issue de la séquence I entre 0 et π , au moyen d'un modulateur Mach-Zehnder (MZM). Puis ce signal est modulé à nouveau en phase par la séquence issue de Q entre 0 et $\pi/2$ à l'aide d'un simple modulateur de phase (PM). Après ces deux modulation, la phase de signal peut prendre les 4 valeurs : 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$.

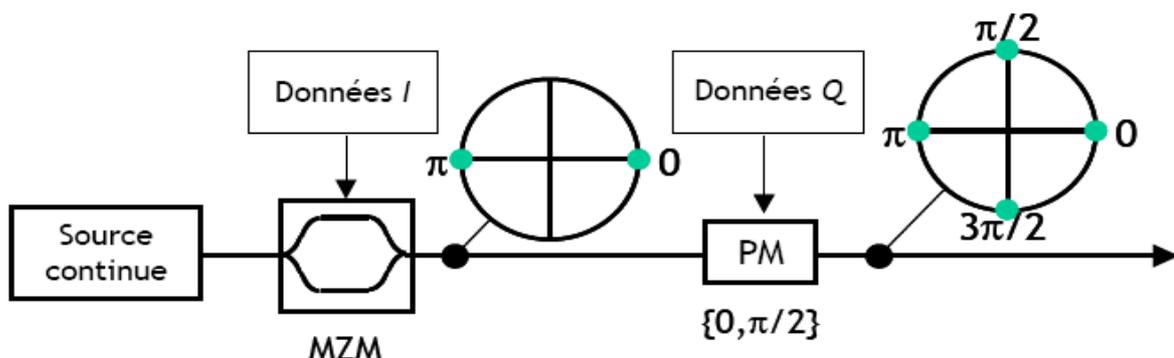


Figure 2.14 : Génération de la DQPSK par deux modulateurs de phase en série.

- **Génération en parallèle**

Dans le schéma de génération de la DQPSK dit en parallèle (figure 2.15), le signal continu issu de la source laser est d'abord séparé en deux voies au moyen d'un coupleur. Sur chaque voie est effectuée une modulation DPSK par MZM, codant pour l'une la séquence issue de la séquence I et pour l'autre la séquence issue de la séquence Q. Puis un déphasage de $\pi/2$ est appliqué au signal modulé sur la voie de la séquence Q, ce qui justifie à nouveau le terme de Quadrature pour désigner cette séquence. Les signaux issus des deux voies interfèrent ensuite ensemble et donnent ainsi, sur le port constructif le signal DQPSK. Le signal DQPSK obtenu selon cette méthode présente des niveaux de phase de $\pi/4$, $3\pi/4$, $-\pi/4$ et $-3\pi/4$, mais les différentiels entre ces différents niveaux sont toujours des multiples de $\pi/2$.

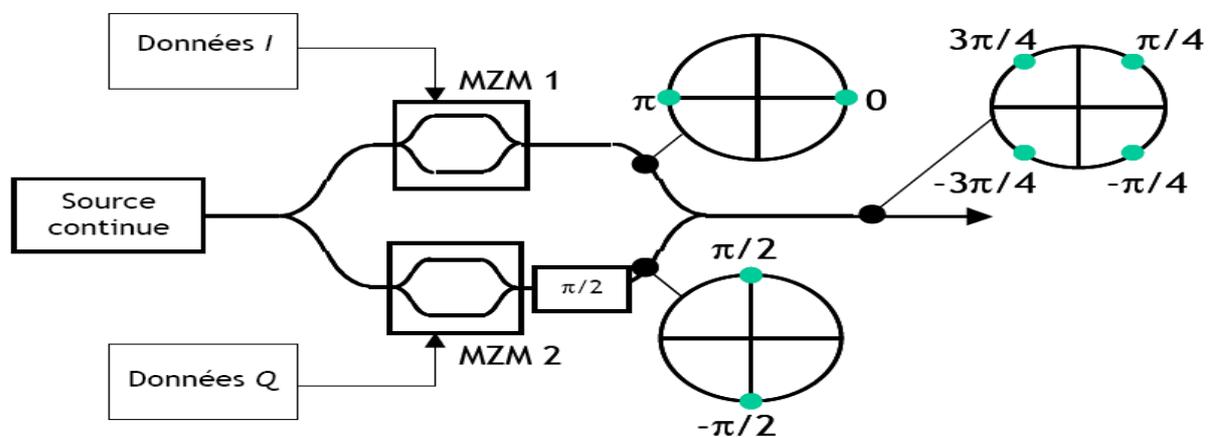


Figure 2.15: Génération de la DQPSK par deux modulateurs MZM en parallèle.

La méthode de génération en série est plus simple à mettre en œuvre par rapport à celle générée en parallèle, mais le signal DQPSK issu d'une génération en parallèle a une meilleure qualité à celui issu d'une génération en série.

2.5.4.2 Détection différentielle de la DQPSK

La DQPSK nécessite un procédé de détection différentielle pour retrouver l'information binaire initiale sous forme de signal électrique. Rappelons que la DQPSK code deux bits, donc pour récupérer l'information correspondante à ces deux bits, chaque symbole DQPSK doit subir simultanément deux détections différentielles légèrement différentes. L'une correspond à la détection de l'information de la séquence I, et l'autre correspond à la détection de l'information de la séquence Q (figure 2.16).

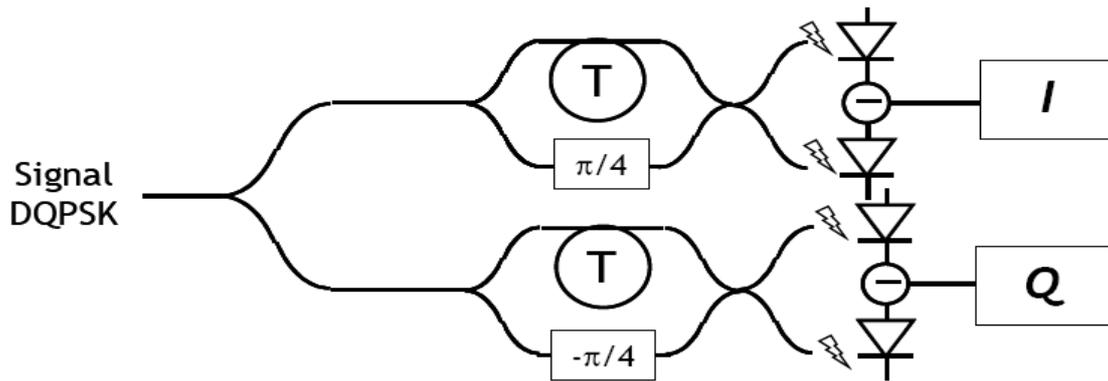


Figure 2.16 : schéma de détection différentielle d'un signal DQPSK.

Le signal optique se sépare en deux voies, chacune comportant un démodulateur différentiel et un détecteur équilibré, chaque démodulateur différentiel DQPSK comporte un retard équivalent au temps-symbole (T), soit 2 temps-bits d'une part, et d'autre part chacun crée en plus un déphasage supplémentaire de $\pi/4$ dans l'un des deux démodulateurs, et de $-\pi/4$ dans l'autre.

Ce format de modulation présente une tolérance aux effets de propagation linéaires particulièrement la dispersion chromatique qui est élevée pour le débit binaire de 40 Gbit/s, mais le grand avantage de la DQPSK par rapport aux autres formats étudiés, est sans conteste sa tolérance accrue à la PMD, dont les effets pénalisants commencent à être significatifs [14].

2.6 Conclusion

La montée en débit apportée par les nouvelles générations de réseaux d'accès optiques est limitée par la dispersion chromatique de la fibre et par conséquent l'ISI (Interférence Inter-Symbole). Au cours de ce chapitre nous avons traité les différentes modulations optiques : OOK-NRZ, OOK-RZ, la modulation en quadrature de phase QPSK, la modulation différentielle en phase DPSK, et la modulation différentielle en phase sur quatre niveaux DQPSK.

Dans le chapitre suivant nous allons modéliser et simuler une chaîne de transmission d'un système WDM-PON reposant sur la re-modulation NRZ-DQPSK, en vue d'évaluer ses performances en termes de capacité et de portée.

Chapitre 3

Simulations & Résultats

3.1 Introduction

La nouvelle génération de réseau d'accès optique passif (NG-PON) devra faire face à plusieurs enjeux majeurs notamment l'augmentation des débits, du nombre de clients raccordés et l'étalement des infrastructures pour couvrir des zones toujours plus importantes. Les institutions de normalisation comme l'ITU-T et le FSAN semblent aujourd'hui se tourner vers des solutions de multiplexage en longueur d'onde (WDM) pour satisfaire les exigences des réseaux de demain.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble des travaux de simulation que nous avons effectués dans le but d'évaluer les performances d'un système WDM-PON reposant sur la re-modulation NRZ-DQPSK à l'aide du logiciel Optisystem.

Dans un premier temps, nous donnons une brève description des différentes applications du logiciel Optisystem.

Par la suite, nous décrivons le modèle de liaison optique proposé et les différentes architectures WDM-PON simulées et nous présentons les résultats obtenus.

3.2 Présentation du logiciel OptiSystem

Le logiciel OptiSystem est un outil qui permet de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal, allant du dispositif le plus élémentaire, au système complet de communication.

La démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- Construire le schéma boc.
- Analyser le schéma.

L'interface utilisateur graphique complète et contrôle la disposition de composants optiques, elle contient une fenêtre principale réparti en plusieurs parties (figure 3.1):

- **Bibliothèque** : une base de données de divers composants.
- **Editeur de layout** : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.
- **Projet en cours** : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.

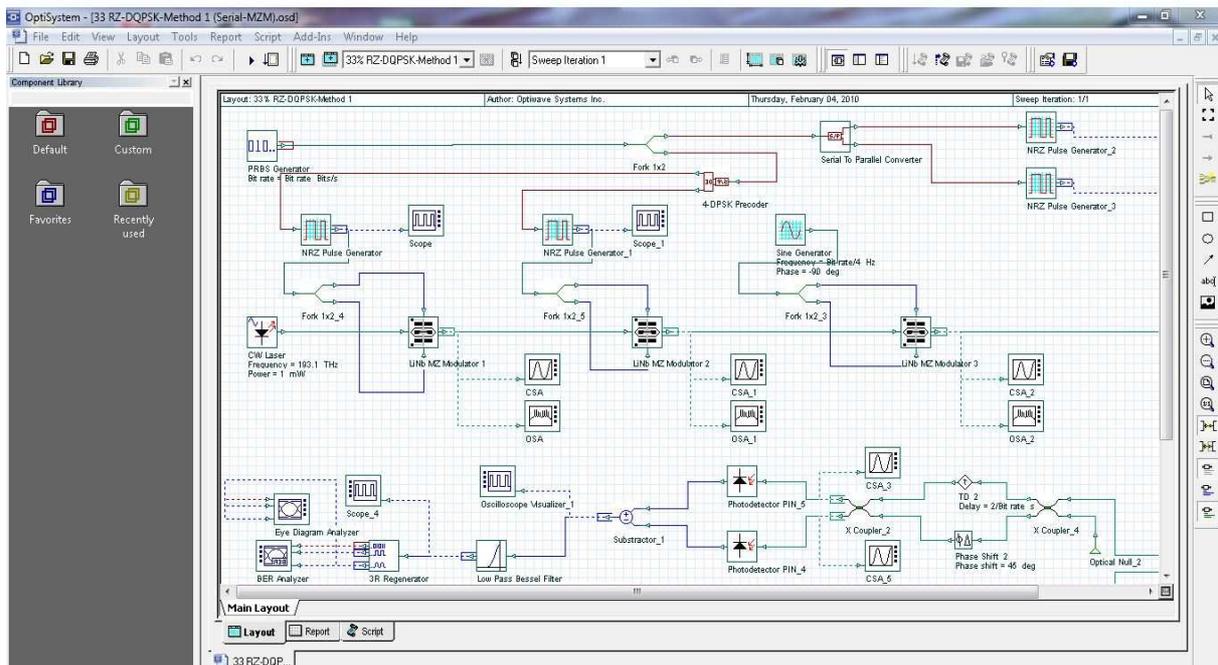


Figure 3.1 : Schéma de l'interface OptiSystem.

3.2.1 Applications du logiciel OptiSystem

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

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

3.3 Schémas du réseau à simuler

Afin d'analyser les performances du réseau en mesurant le taux d'erreur binaire et le diagramme de l'œil, on fera varier la distance de la liaison, le nombre d'abonné et le débit binaire descendant et montant pour cela nous allons présenter trois architectures de réseau WDM-PON.

3.3.1 Simulation d'un réseau WDM-PON à quatre ONU (4 abonnés)

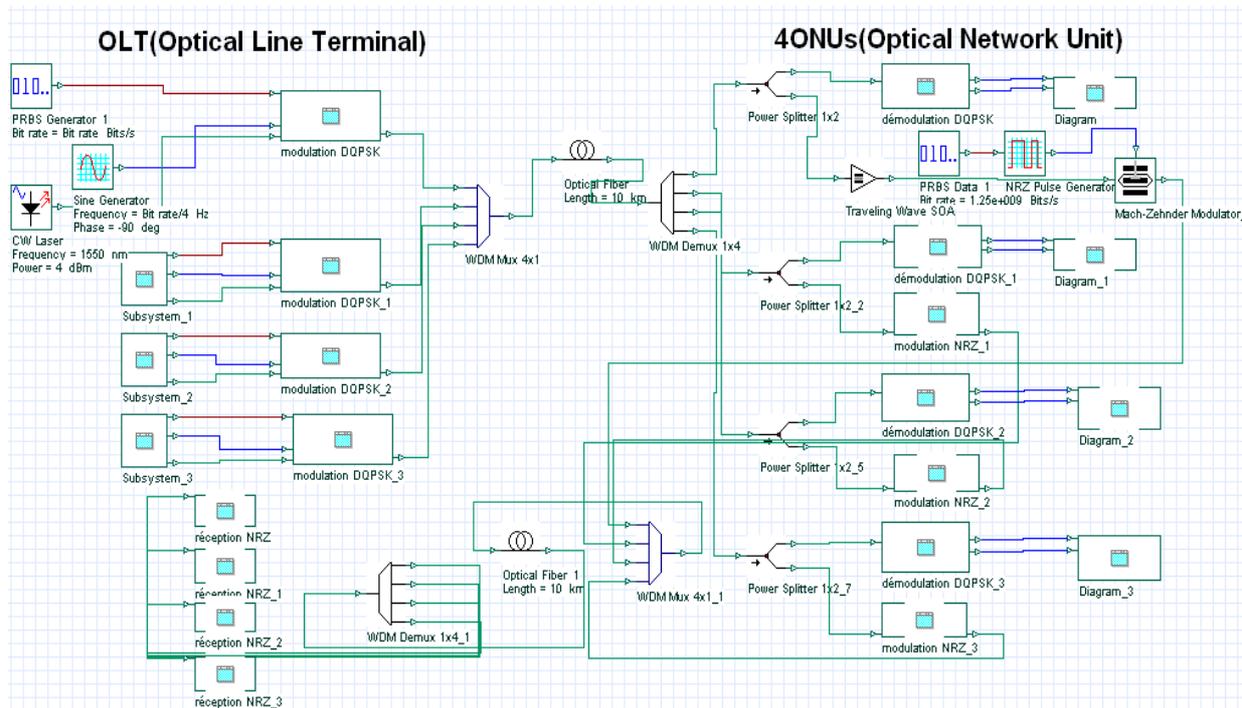


Figure 3.2 : Schéma du réseau à simuler.

Nous allons présenter dans ce qui suit les différents éléments de la liaison :

a) Partie OLT (Optical Line Terminal)

L'émetteur est constitué de quatre sources optiques (Laser DFB) qui émet à une puissance égale à 4dBm (classe C) avec une gamme de 1550-1552.4nm espacée de 0.8nm et une largeur spectrale de 0.2MHz, suivie d'un modulateur externe.

Pour la modulation DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), on utilise deux modulateurs de phase Mach-Zehnder (MZ) en série qui vont moduler la séquence binaire injectée de débit égale à 2.5Gbit/s. Le signal DQPSK arrive au troisième MZ qui va recombinaison les deux signaux modulés tout en opérant le déphasage de $\pi/2$ comme elle montre la figure 3.3.

Par la suite, un multiplexeur WDM (Wavelength Division Multiplexing) va combiner les quatre signaux modulés.

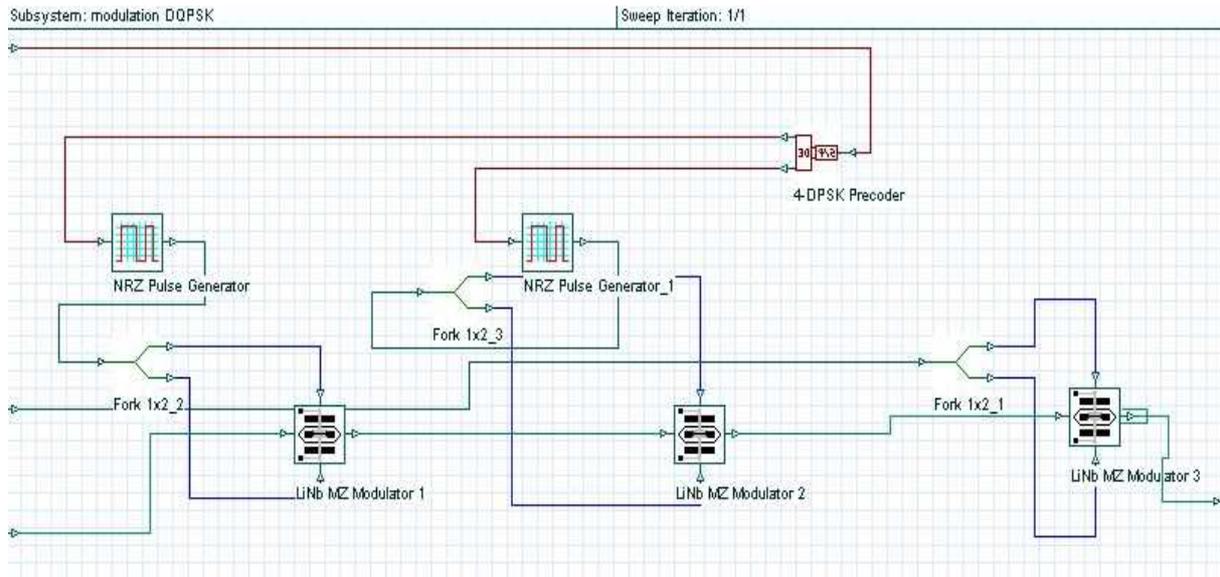


Figure 3.3 : Modulation DQPSK.

b) Partie transmission

Dans cette partie, nous avons une fibre monomode (SMF), caractérisée par : une longueur de la fibre L en km, une longueur d'onde égale 1550 nm, une atténuation de l'ordre de 0.2 dB/km et d'une dispersion chromatique de l'ordre de 17 ps/nm/km.

c) Partie ONU (Optical Line Unit)

Le signal descendant sortant de la fibre est démultiplexé en quatre canaux, chaque canal est divisé par un splitter en deux signaux. L'un des signaux va être démodulé en deux séquences I (In-phase) et Q (Quadrature) (figure 3.4).

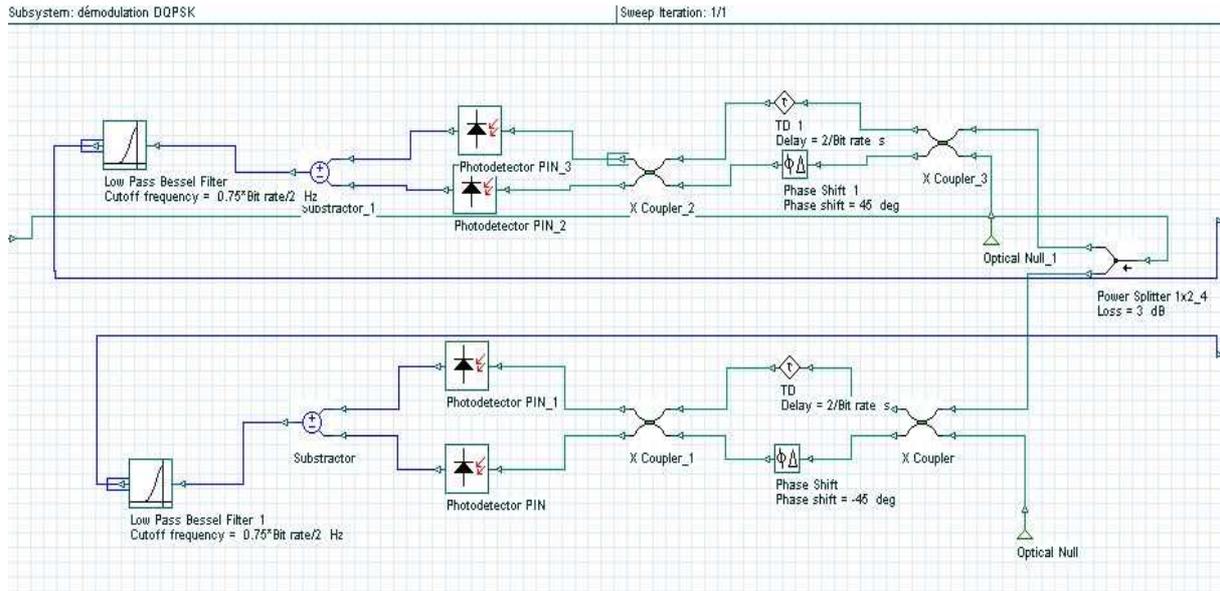


Figure 3.4 : Démodulation DQPSK.

L'autre signal va être amplifié par un amplificateur SOA (Semiconductor Optical Amplifier) puis re-modulé en utilisant une modulation NRZ pour généré le signal montant. Ce dernier suit les mêmes étapes de propagation que le signal descendant en passant par un multiplexeur, fibre SMF et un démultiplexeur jusqu'à arriver à la réception NRZ qui est représentée sur la figure 3.5. Elle est constituée d'un photodétecteur de type APD qui convertit le signal optique en photocourant et un filtre passe-bas qui permet de limiter le bruit électrique.

Pour visualisé et évaluer la qualité du signal descendant et montant on utilise un diagramme de l'œil et un BER après détection de signal.

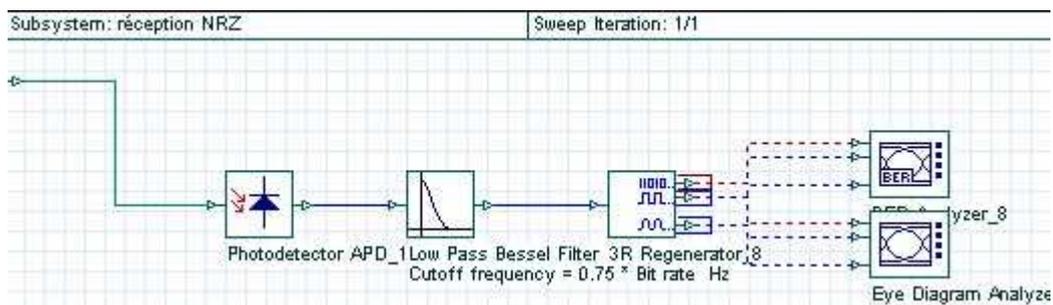


Figure 3.5 : Partie réception NRZ de la liaison.

3.3.1.1 Résultats et interprétation

Nous avons varié la longueur de la fibre ($L= 5$ jusqu'à 100Km), le débit montant ($D=1.25\text{Gbit/s}$, 1.5Gbit/s , 2Gbit/s , 2.5Gbit/s) et fixé le débit descendant à 2.5Gbit/s .

Les résultats présentés concernent un seul ONU (un abonné) pour les deux sens descendant et montant, les mêmes résultats sont enregistrés pour les autres ONU. On va prendre comme référence un TEB de 10^{-10} où on aura une bonne qualité du signal reçu.

La figure 3.6 montre le spectre descendant constituer de 4 longueurs d'ondes injecté dans la fibre optique.

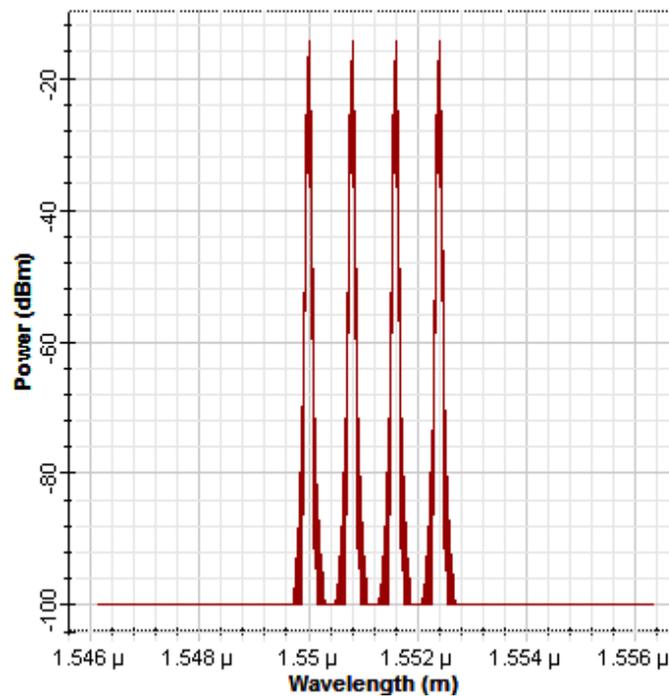


Figure 3.6 : Spectre descendant dans la fibre optique.

Les graphes du diagramme de l'œil pour le sens descendant relevés à la réception sont donnés par la figure 3.7.

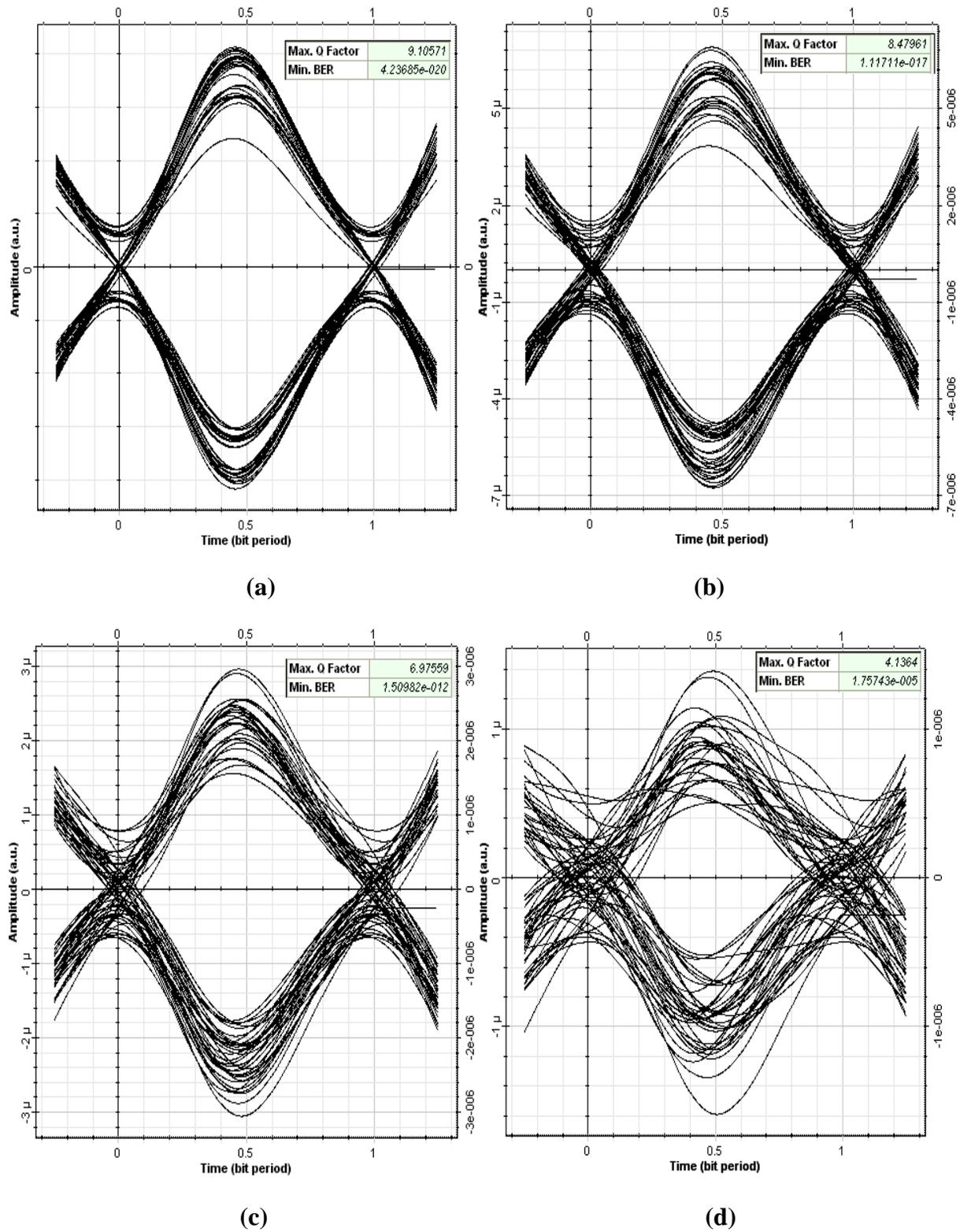


Figure 3.7 : Diagramme de l'œil pour le sens descendant à D= 2.5Gbit/s.

(a) L= 5km, (b) L=60km, (c) L= 80km, (d) L= 100km.

Les graphes du diagramme de l'œil pour le sens montant relevés à la réception au niveau de l'OLT sont donnés par la figure 3.8.

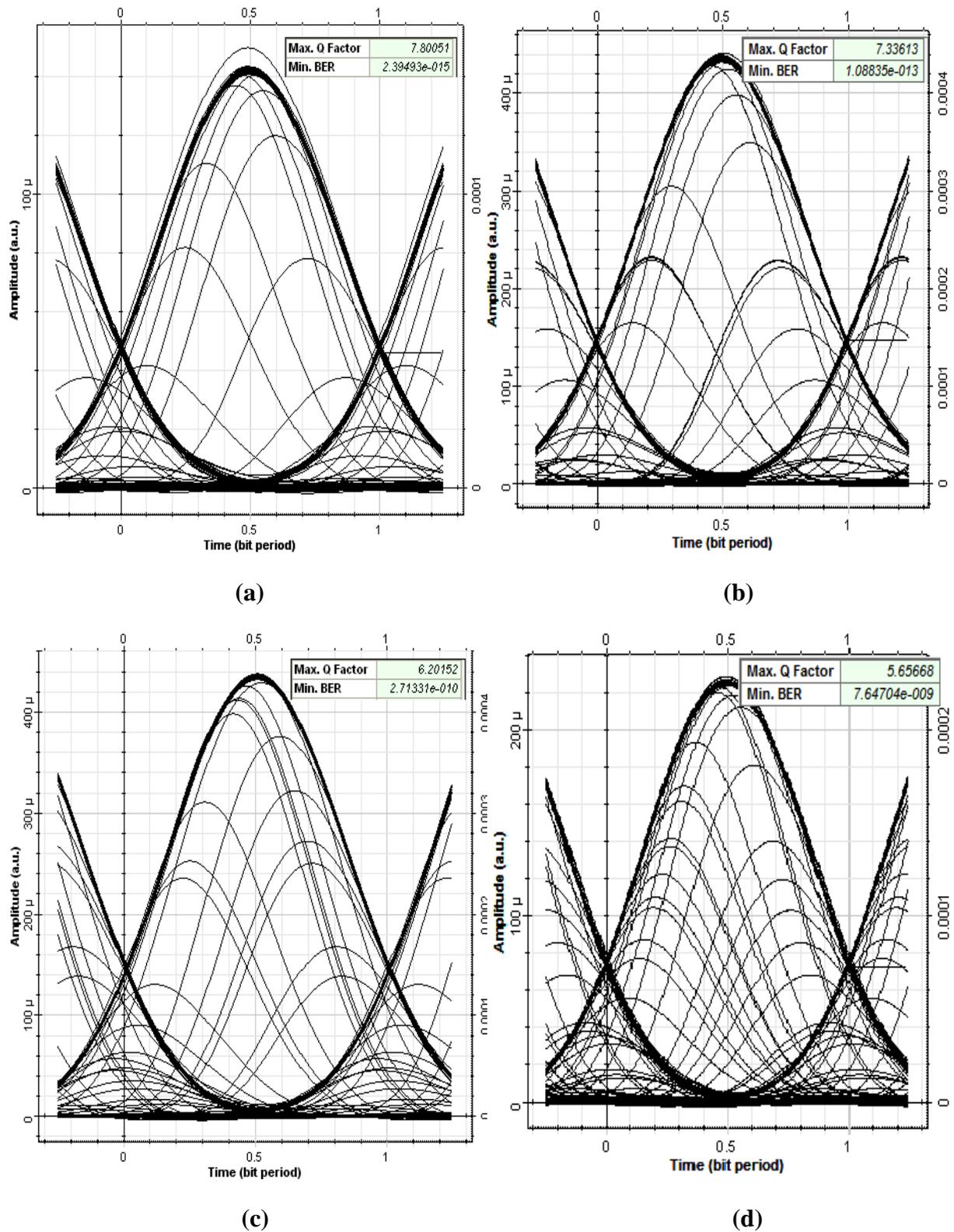


Figure 3.8 : Diagramme de l'œil pour le sens montant à L= 80km.

(a) D= 1.25Gbit/s, (b) D= 1.5Gbit/s, (c) D= 2Gbit/s, (d) D= 2.5Gbit/s.

Le tableau 3.1 et 3.2 résume les résultats obtenus :

Sens descendant :

Distance L (km)	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Facteur de qualité (Q)	9.10	9.09	9.06	9.01	8.92	8.77	8.47	7.92	6.97	5.62	4.13
Taux d'erreur binaire (BER)	10^{-20}	10^{-20}	10^{-20}	10^{-20}	10^{-19}	10^{-19}	10^{-17}	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-5}

Tableau 3.1 : Résumé de résultat de facteur de qualité (Q) en fonction de la distance (L).

Les résultats indiquent un bon facteur de qualité de 6.97 pour une longueur de 80km, ce qui est d'ailleurs montré par le digramme de l'œil où l'ouverture est bonne, plus on augmente la longueur de la fibre plus la qualité du signal diminue jusqu'à ce qu'elle se détériore à partir d'une longueur de 90km (figure 3.9). Pour ce qui est du taux d'erreur binaire, qui est inversement proportionnel au facteur de qualité, il est de l'ordre 10^{-20} pour 5km, 10^{-12} pour 80km et il atteint une valeur de 10^{-5} pour 100km où l'ouverture de l'œil se ferme.

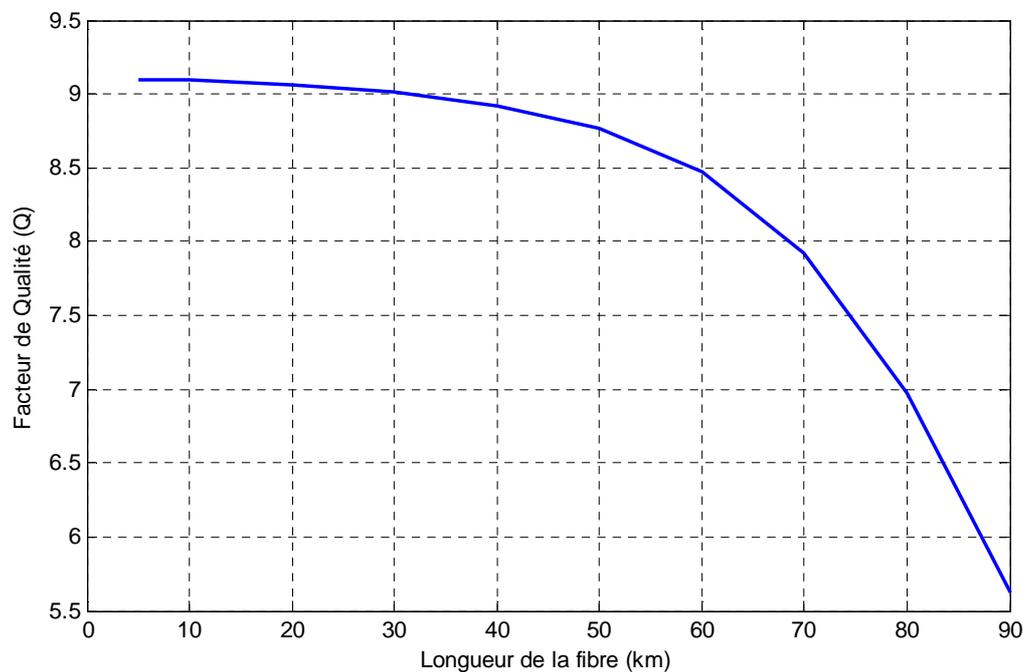


Figure 3.9 : Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre.

Sens montant :

Débit (Gbit/s)	1.25	1.5	2	2.5
Facteur de qualité (Q)	7.80	7.33	6.20	5.65
Taux d'erreur binaire (BER)	$2.39 \cdot 10^{-15}$	$1.08 \cdot 10^{-13}$	$2.71 \cdot 10^{-10}$	$7.64 \cdot 10^{-9}$

Tableau 3.2 : Résumé de résultat de taux d'erreur binaire en fonction de débit.

Pour une distance de 80km, on remarque un bon facteur de qualité de 7.80 pour un débit de 1.25Gbit/s, plus on augmente le débit plus le facteur de qualité diminue jusqu'à atteindre une valeur de 5.65 pour un débit de 2.5Gbit/s. contrairement pour le BER, il est de meilleur résultat $2.71 \cdot 10^{-10}$ (Q=6.20) pour 2Gbit/s. la qualité du signal se dégrade à partir de 2.5Gbits/s, et elle descend sous un TEB de 10^{-9} (figure 3.10).

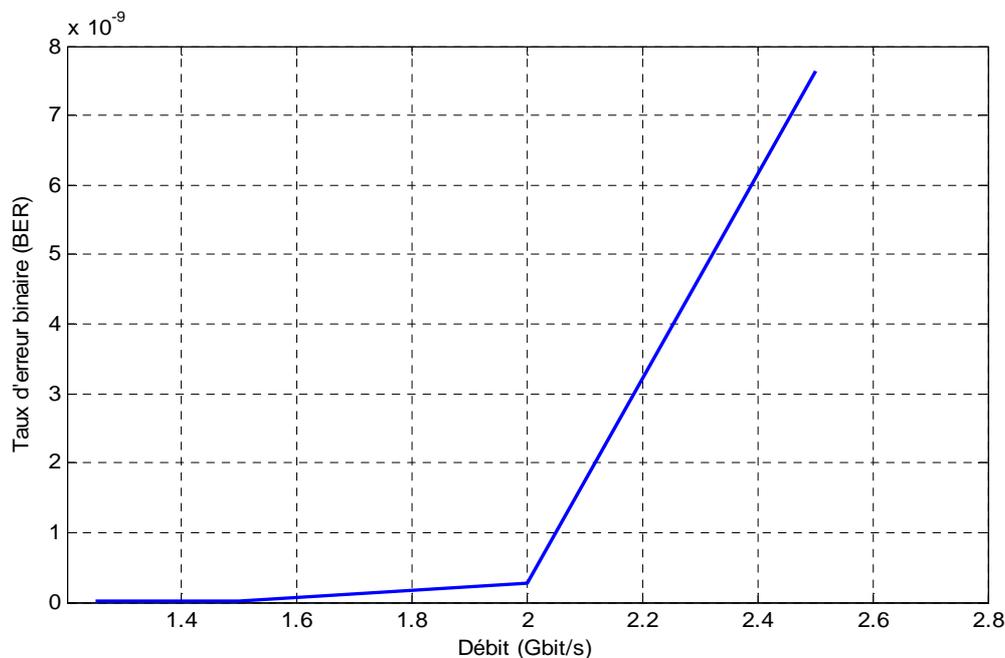


Figure 3.10 : Variation du taux d'erreur binaire en fonction du débit.

Nous allons voir maintenant, le résultat obtenu pour le sens descendant à un débit de 10Gbit/s et le sens montant à des débits variables allant de 1.25Gbit à 10Gbit/s et des distances allant de 10 à 40km.

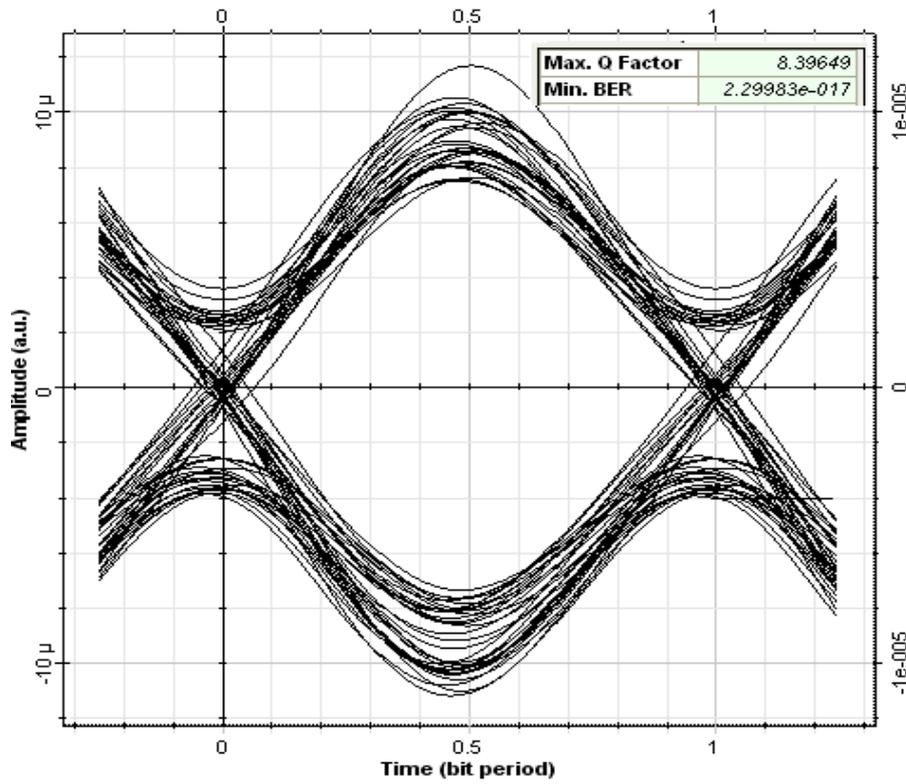
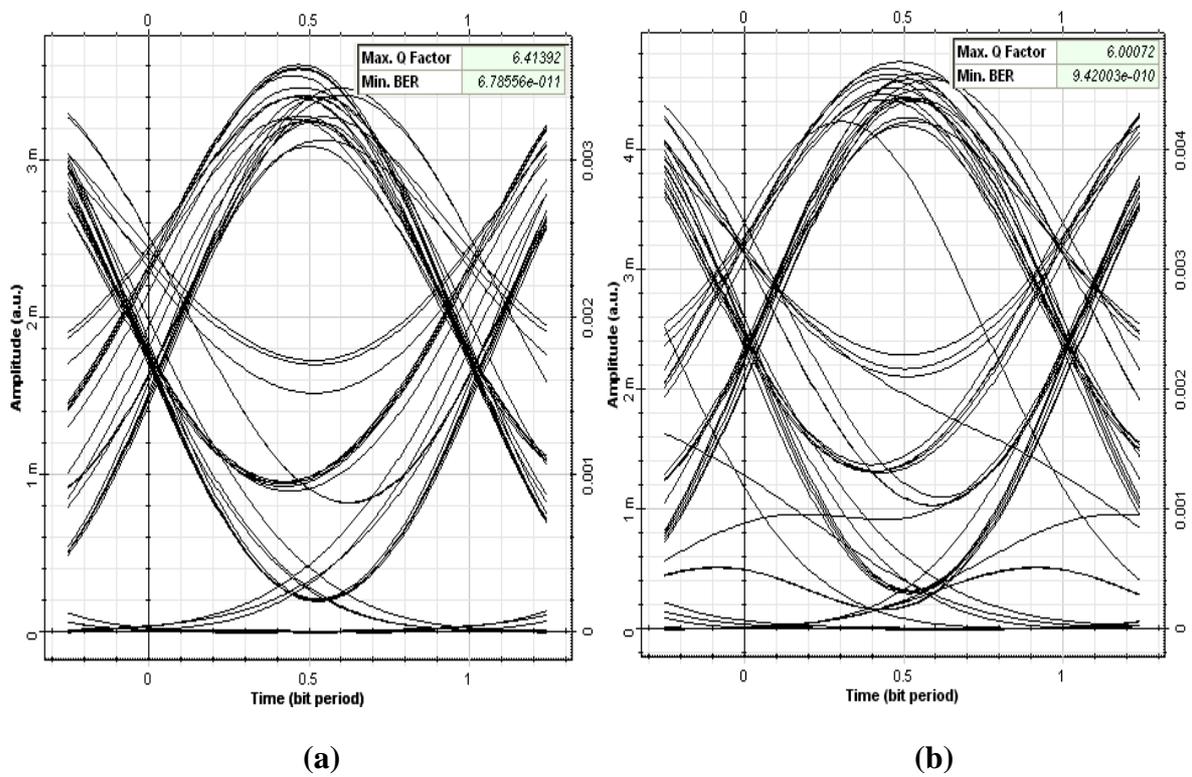


Figure 3.11 : Diagramme de l'œil pour le sens descendant à D= 10Gbit/s et L= 40km.



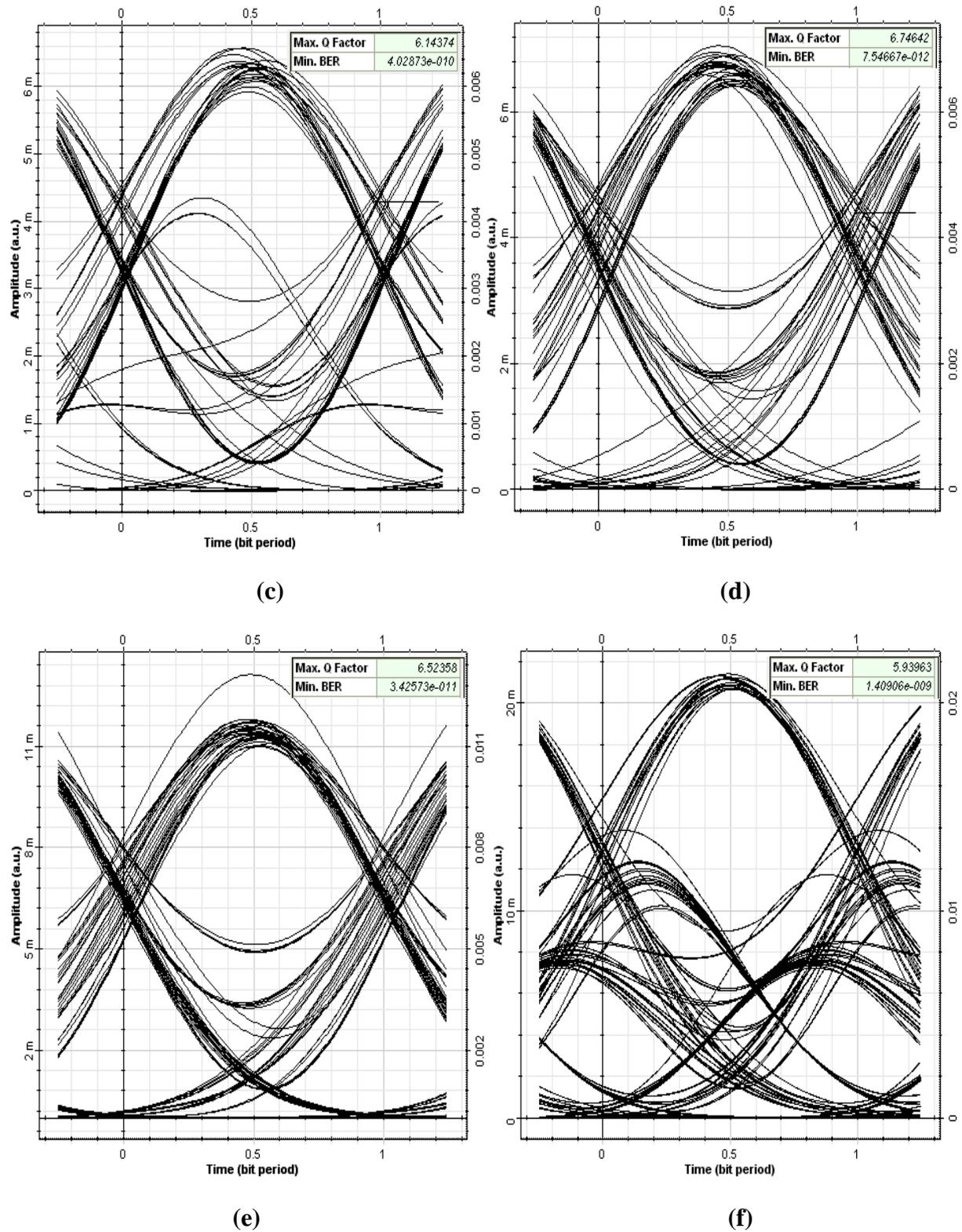


Figure 3.12 : Diagramme de l’œil pour le sens montant. (a) $D= 1.25\text{Gbit/s}$ et $L= 40\text{km}$, (b) $D= 1.5\text{Gbit/s}$ et $L= 35\text{km}$, (c) $D= 2\text{Gbit/s}$ et $L= 30\text{km}$, (d) $D= 2.5\text{Gbit/s}$ et $L= 29\text{km}$, (e) $D= 5\text{Gbit/s}$ et $L= 20\text{km}$, (f) $D= 10\text{Gbit/s}$ et $L= 10\text{km}$.

Le tableau 3.3 résume les résultats obtenus :

	Descendant	Montant					
Distance (km)	40	40	35	30	29	20	10
Débit (Gbit/s)	10	1.25	1.5	2	2.5	5	10
Facteur de qualité (Q)	8.39	6.41	6.00	6.14	6.74	6.52	5.93
BER	$2.29 \cdot 10^{-17}$	$6.78 \cdot 10^{-11}$	$9.42 \cdot 10^{-10}$	$4.02 \cdot 10^{-10}$	$7.54 \cdot 10^{-12}$	$3.42 \cdot 10^{-11}$	$1.40 \cdot 10^{-9}$

Tableau 3.3 : Résumé des résultats en fonction de la distance et de débit.

Pour le sens descendant, quand on a augmenté le débit à 10Gbit/s, on constate qu’il est préférable d’avoir une longueur de fibre de 40km pour obtenir un bon facteur de qualité 8.39 et un BER de 10^{-17} comme elle montre la figure 3.11 où l’ouverture de l’œil est bonne.

Pour le sens montant, quand le débit augmente la portée diminue (figure 3.13), tel que pour un débit de 1.25Gbit/s, le signal est transmis sur une distance de 40km, tant que pour un débit de 5Gbit/s, la distance atteint une valeur de 20km. À partir du débit 10Gbit/s, il y a une dégradation du signal où le BER est de l’ordre de 10^{-9} pour une portée de 10km.

Les diagrammes de l’œil présentés dans la page précédentes montrent, de plus que l’œil est bien ouverte pour les débits de 1.25Gbit/s jusqu’à 5Gbit/s, ce qui indique la bonne qualité de transmission.

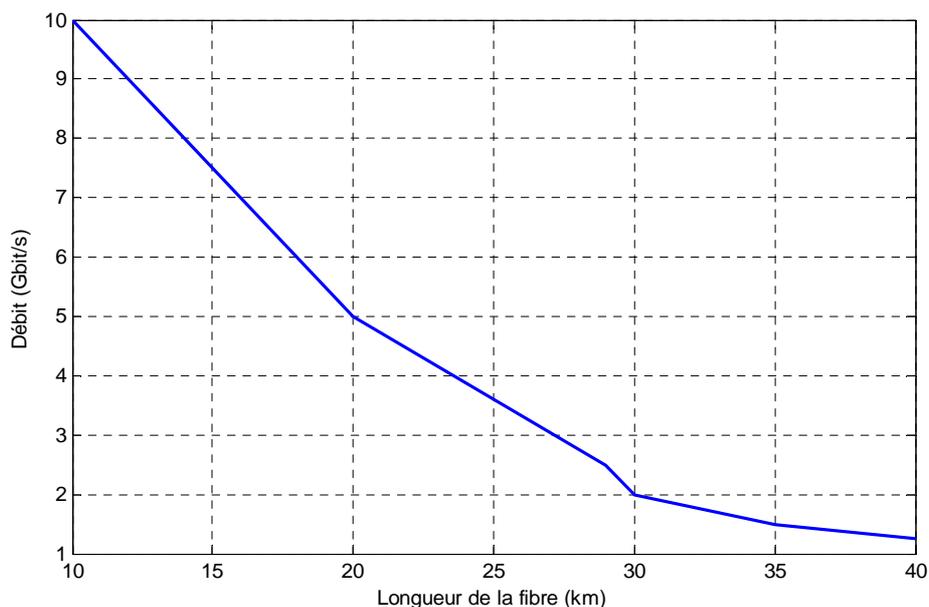


Figure 3.13 : Variation du débit en fonction de la longueur de la fibre.

Dans ce qui suit on va présenter les résultats obtenus lors de la montée en débit pour le sens descendant à 20Gbit/s avec une portée de 20km :

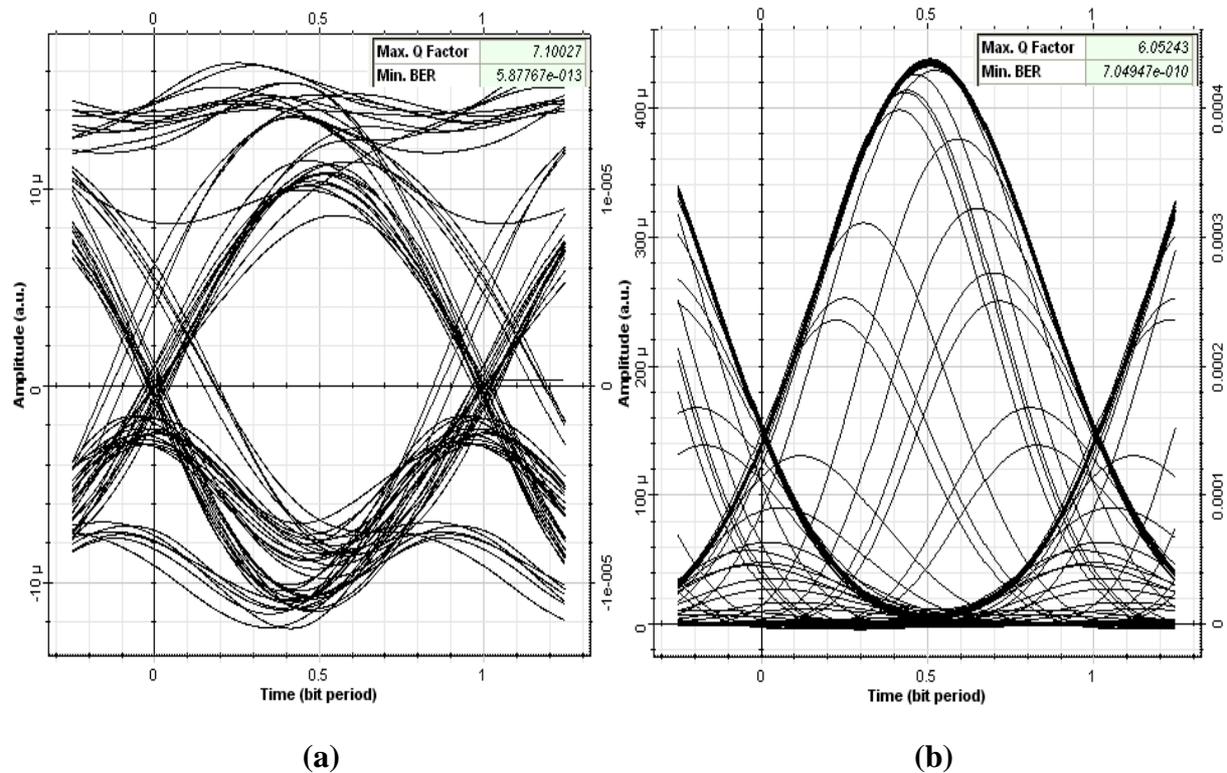


Figure 3.14 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant à $D=20$ Gbit/s, (b) sens montant à $D=1.25$ Gbit/s.

On remarque, que pour une distance de 20km, on a un bon facteur de qualité de 7.10 et un BER 10^{-13} pour un débit de 20Gbit/s dans le sens descendant. Et un facteur de 6.05 et un BER 10^{-10} pour un débit de 1.25 Gbit/s dans le sens montant, témoignant d'une très bonne qualité de transmission comme elle montre la figure 3.14 où l'ouverture de l'œil est bonne.

On constate aussi, que pour quatre ONUs, quand le débit augmente de 2.5Gbit/s à 20Gbit/s dans le sens descendant, la distance diminue de 80km à 20km respectivement pour avoir une bonne qualité de signal reçu.

3.3.2 Simulation d'un réseau WDM-PON à seize ONUs (16 abonnés)

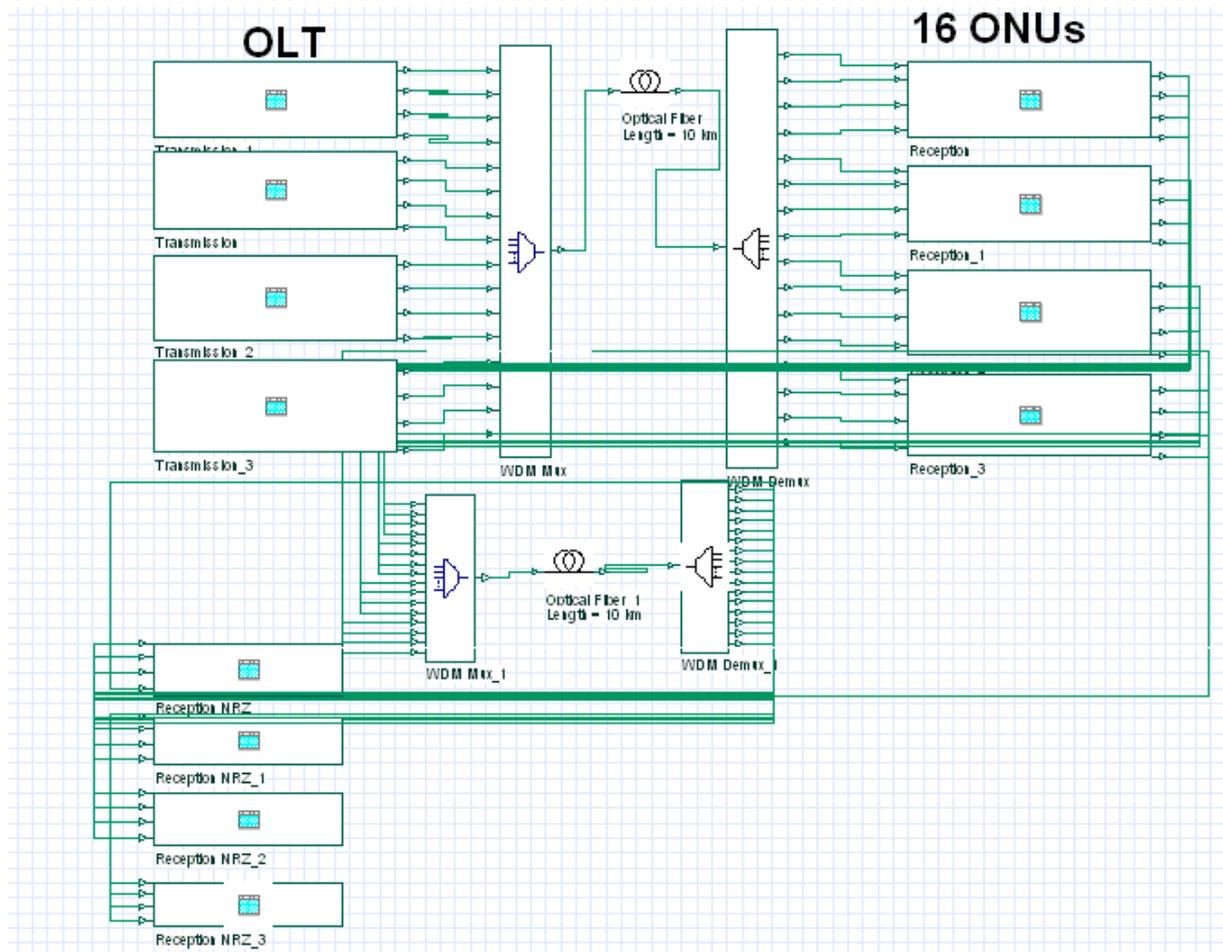


Figure 3.15 : Schéma du réseau à simuler.

Dans cette partie, nous avons maintenu les mêmes éléments constitués dans le schéma précédent. La source Laser utilisé émet à 4dbm avec une gamme de longueur d'onde de 1550-1553nm espacé de 0.2nm. On a augmenté le nombre d'abonnés (16 ONUs), varié le débit descendant et montant ainsi la portée pour une avoir une bonne transmission du signal.

3.3.2.1 Résultats et interprétation

La figure 3.16 présente le spectre descendant constituer de 16 longueurs d'ondes injecté dans la fibre optique.

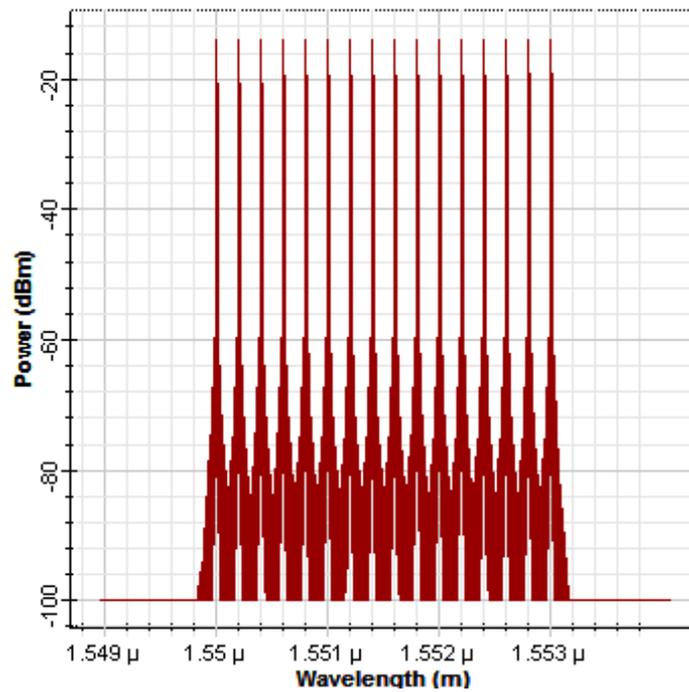


Figure 3.16 : Spectre descendant dans la fibre optique.

Les graphes du diagramme de l’œil relevé au niveau de l’ONU pour le sens descendant et L’OLT pour le sens montant sont donnés ci-dessous :

- L=90km, débit descendant 1.25Gbit/s, débit montant 256Mbit/s

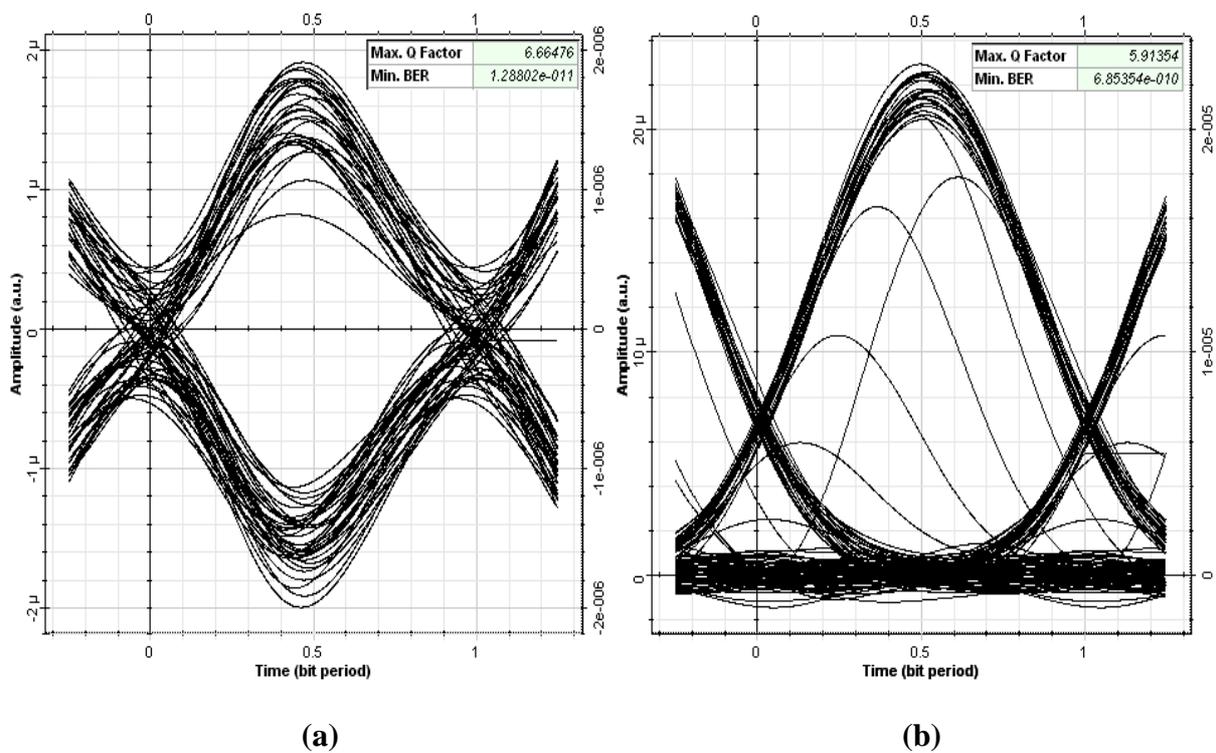


Figure 3.17 : Diagramme de l’œil. (a) sens descendant, (b) sens montant.

- $L=80\text{km}$, débit descendant 1.25Gbit/s, débit montant 512Mbit/s

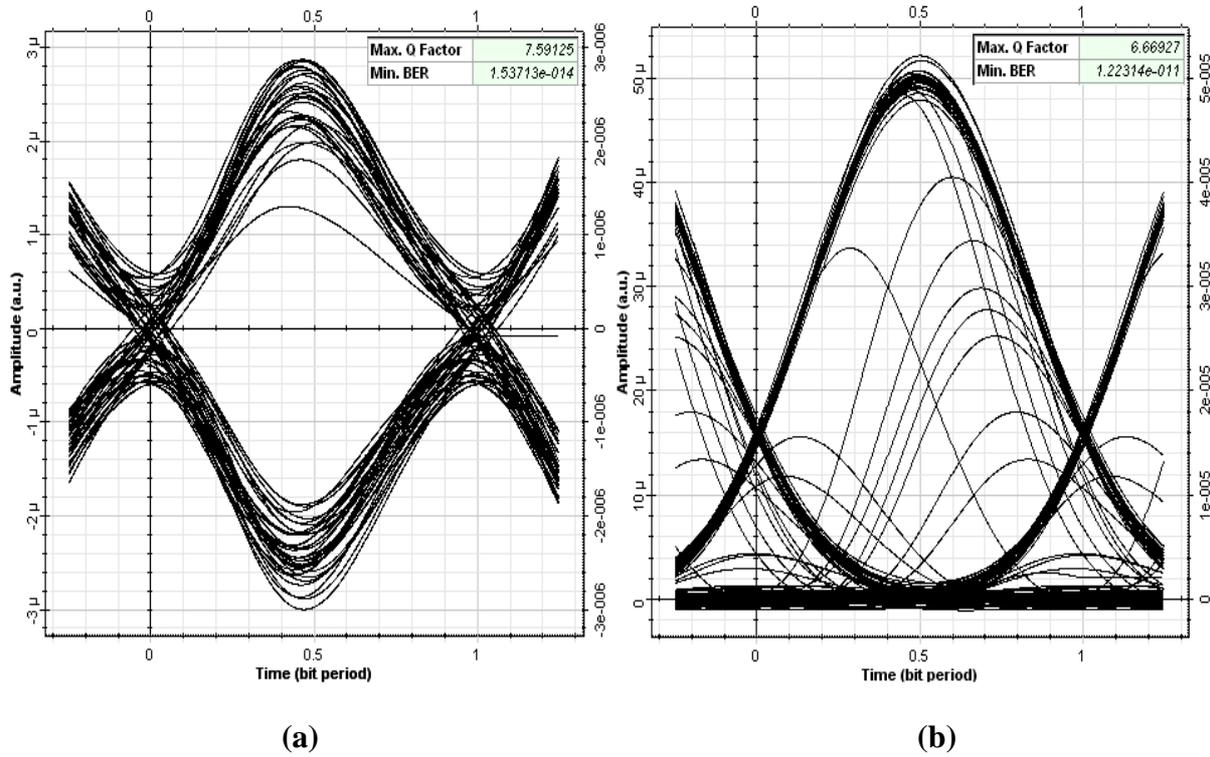


Figure 3.18 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant.

- $L=13\text{km}$, débit descendant 1.25Gbit/s, débit montant 1.25Gbit/s

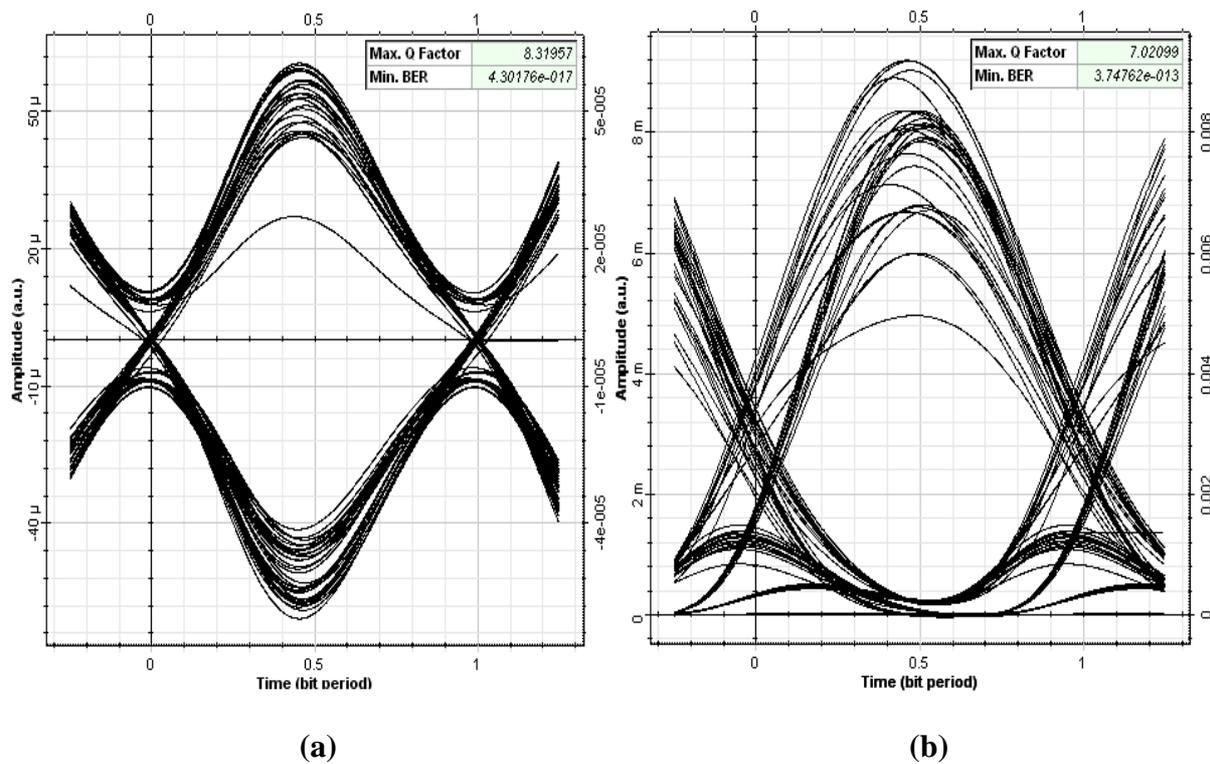


Figure 3.19 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant.

- $L=60\text{km}$, Débit descendant 2.5Gbit/s, débit montant 512Mbit/s

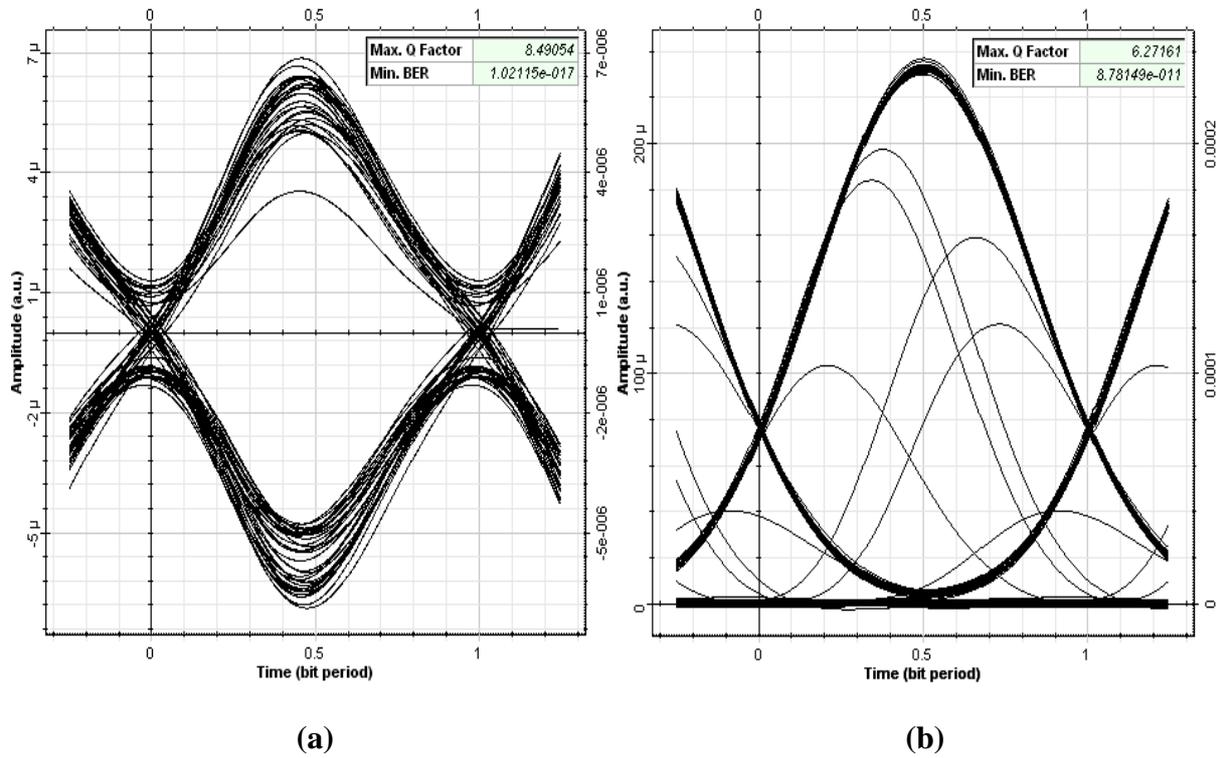


Figure 3.20 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant.

- $L= 10\text{km}$, Débit descendant 2.5Gbit/s, débit montant 1.25Gbit/s

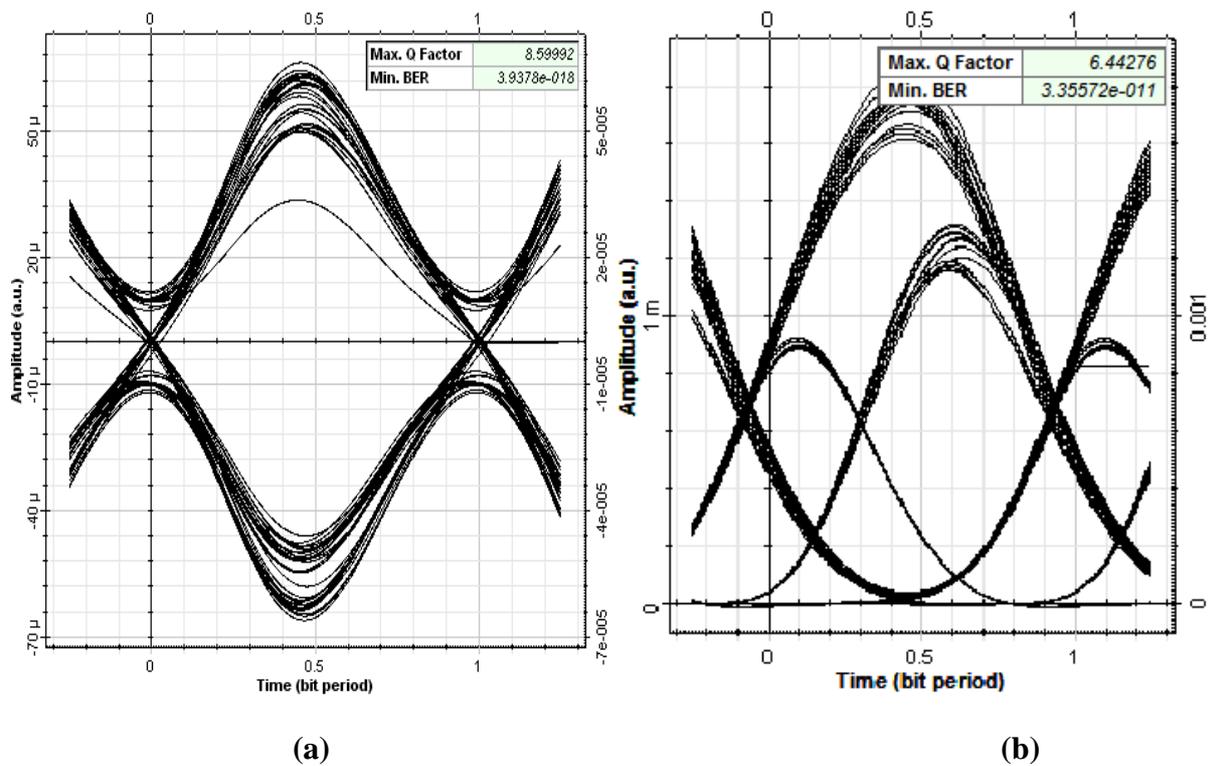


Figure 3.21 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant.

- $L= 10\text{km}$, Débit descendant 2.5Gbit/s, débit montant 2.5Gbit/s

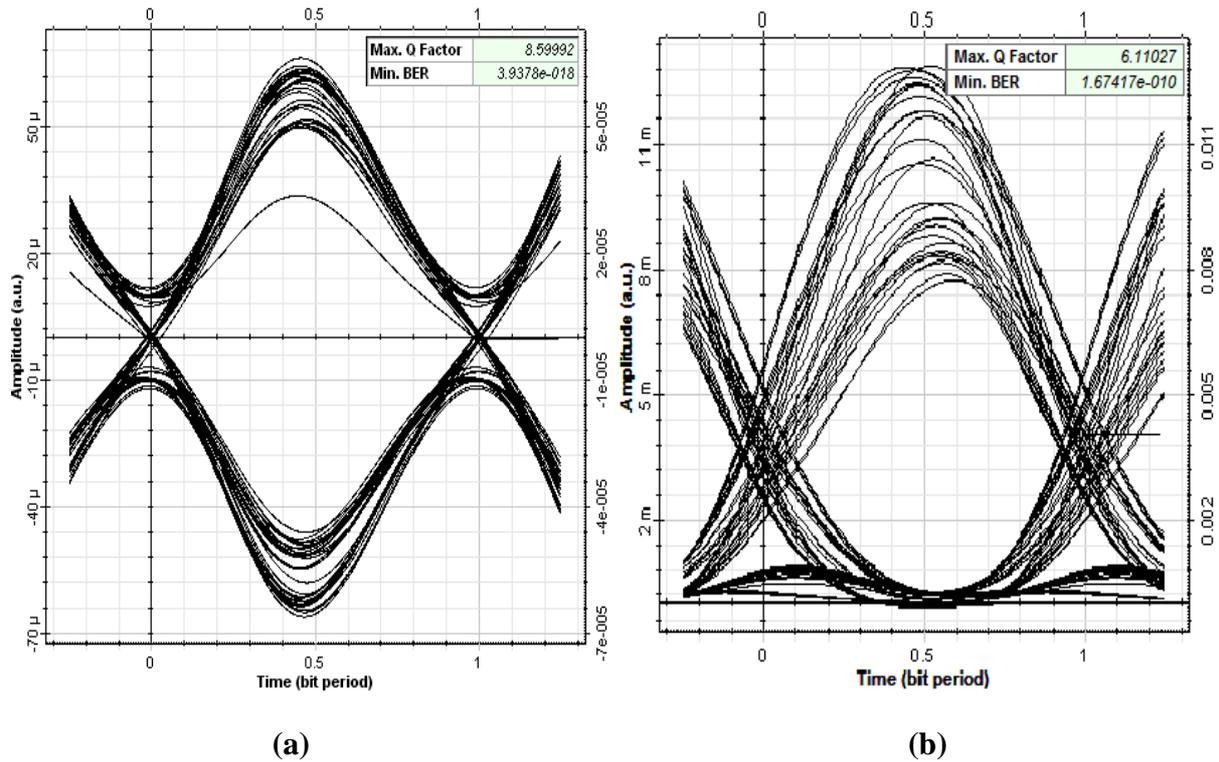


Figure 3.22 : Diagramme de l’œil. (a) sens descendant, (b) sens montant.

Les résultats indiquent un bon facteur de qualité environ de 6 et un BER inférieur à 10^{-10} . Pour un débit descendant de 1.25Gbit/s et un débit montant variable de 256Mbit/s (figure 3.17 (b)), 512Mbit/s (figure 3.18 (b)) et 1.25Gbit/s (figure 3.19 (b)), la distance diminue de 90km à 13km pour un débit symétrique de 1.25Gbit/s où le facteur de qualité est de 7.02 et un BER de 10^{-13} , à partir de cette distance, le signal se détériore.

Les mêmes remarques pour un débit descendant de 2.5Gbit/s et un débit montant variable de 512Mbit/s (figure 3.20 (b)), 1.25Gbit/s (figure 3.21 (b)) et 2.5Gbit/s (figure 3.22 (b)), la distance diminue jusqu’à 10km pour un débit symétrique de 2.5Gbit/s en tenant compte que le BER atteint 10^{-10} .

3.3.3 Simulation d'un réseau WDM-PON à trente-deux ONU's (32 abonnés)

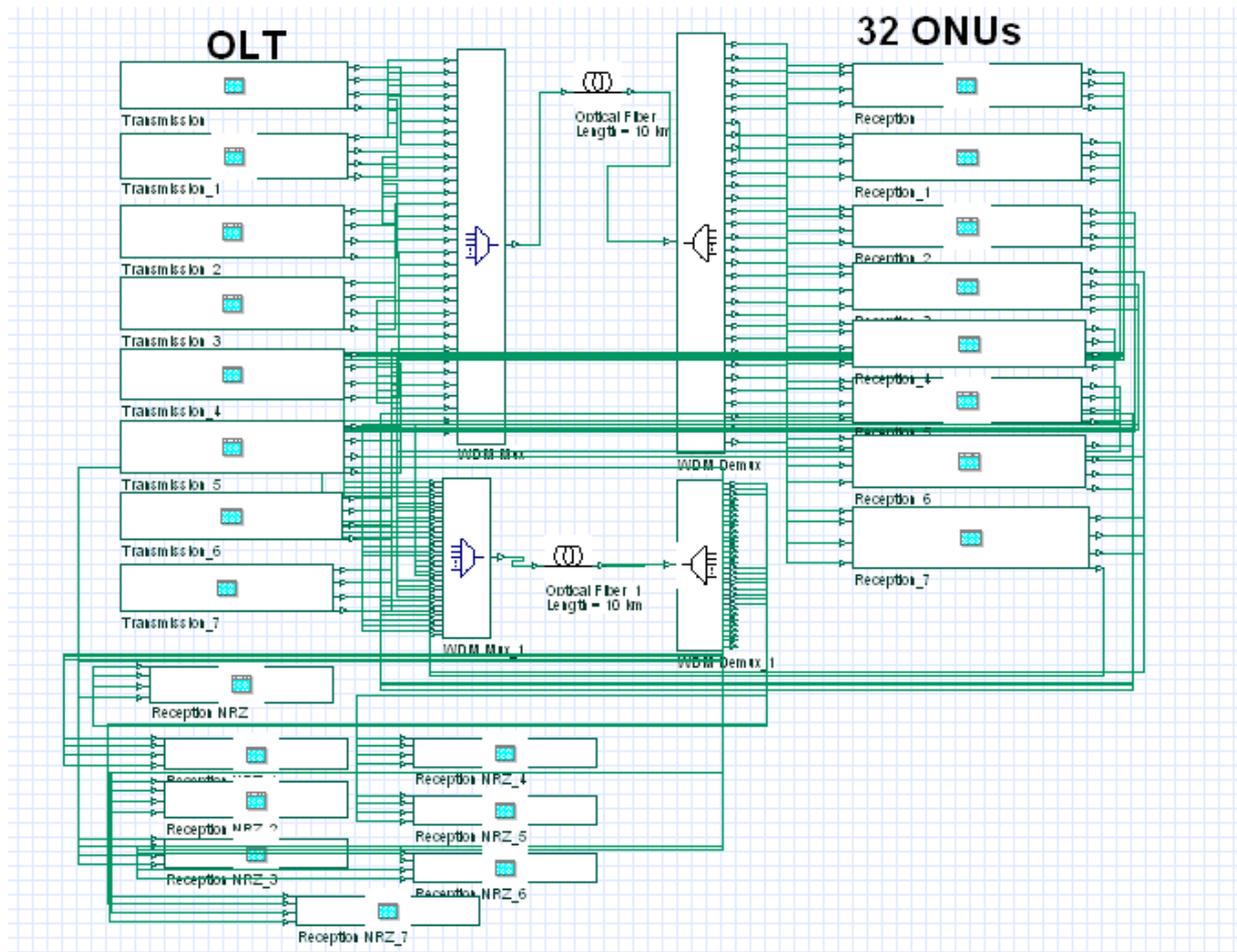


Figure 3.23 : Schéma du réseau à simuler.

Dans cette dernière partie, nous avons maintenu aussi les mêmes éléments constitués dans le schéma précédent on utilisant une gamme de longueur d'onde de 1550-1556.2nm espacé de 0.2 nm. On a augmenté le nombre d'abonnés à 32, varié le débit descendant et montant ainsi la portée pour avoir une bonne transmission du signal.

3.3.2.1 Résultats et interprétations

La figure 3.24 présente le spectre descendant constituer de 32 longueurs d'ondes injecté dans la fibre optique.

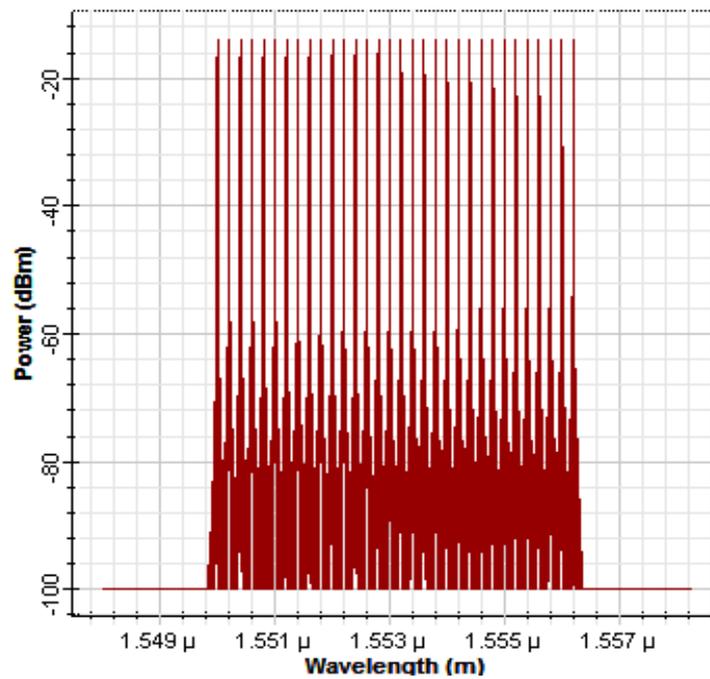


Figure 3.24 : Spectre descendant dans la fibre optique.

Les graphes du diagramme de l'œil relevé au niveau de l'ONU pour le sens descendant et L'OLT pour le sens montant sont donnés ci-dessous :

- **L=10km, débit descendant 1.25Gbit/s, débit montant 1.25Gbit/s**

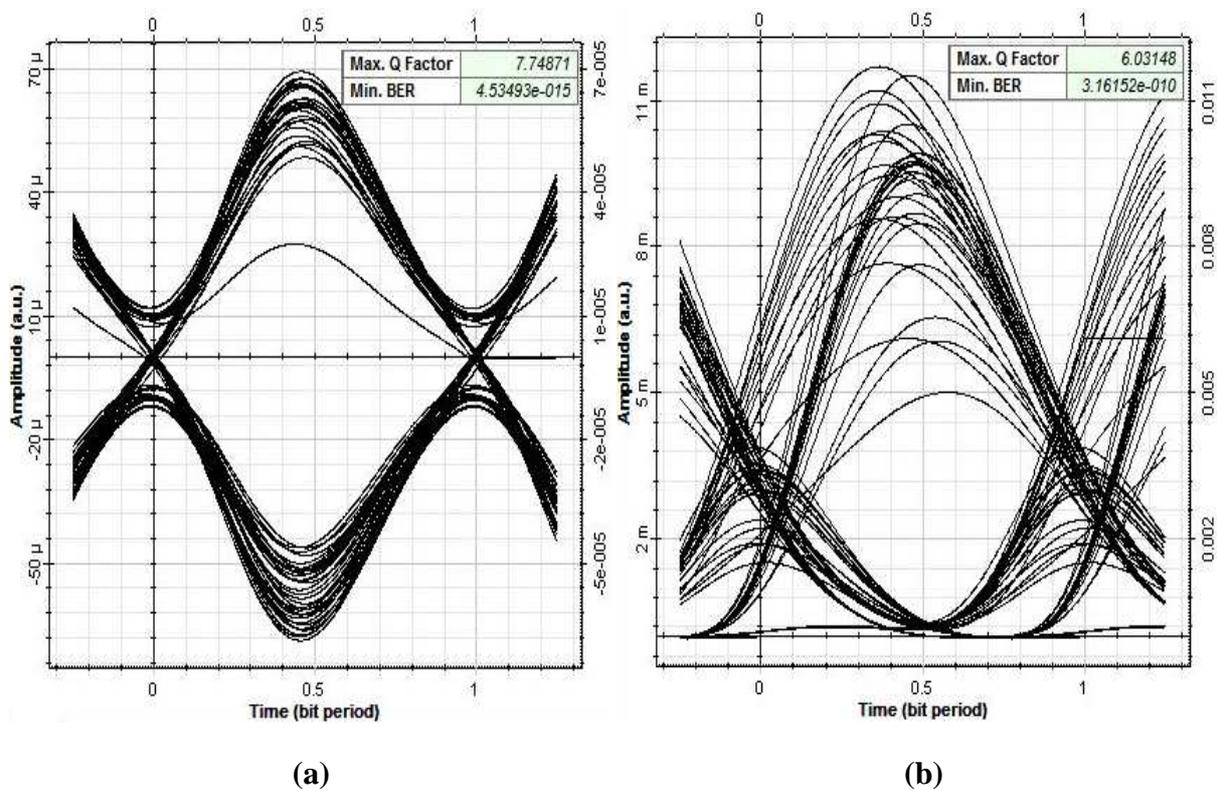
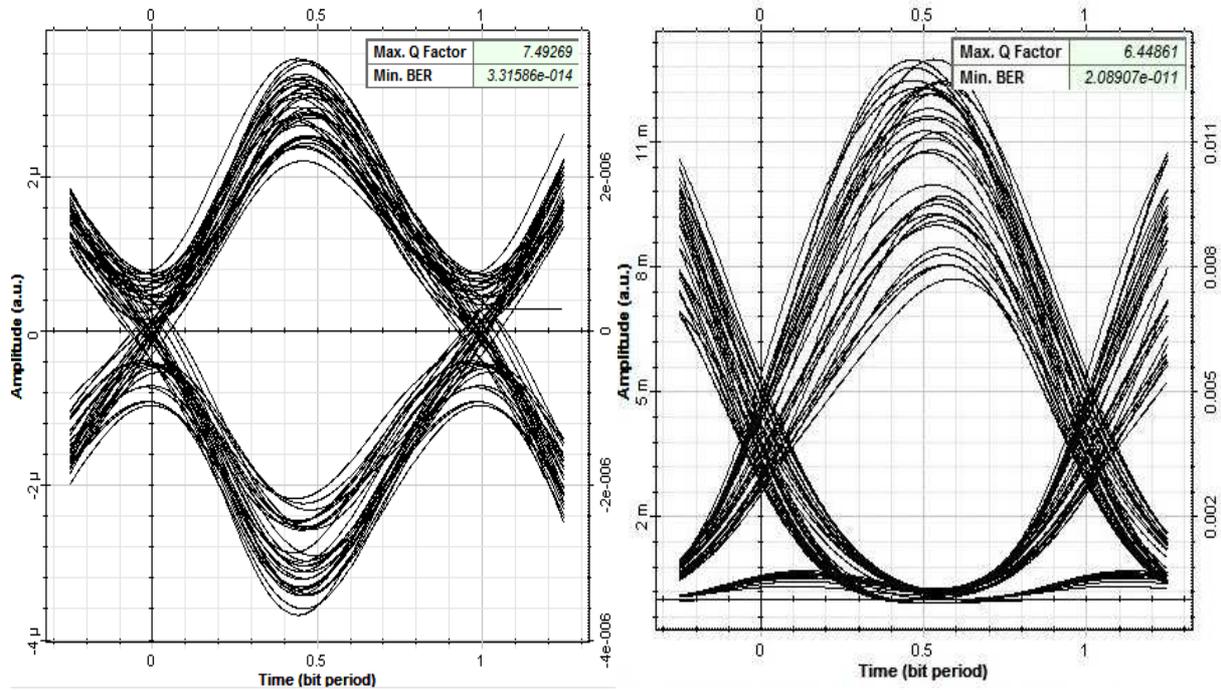


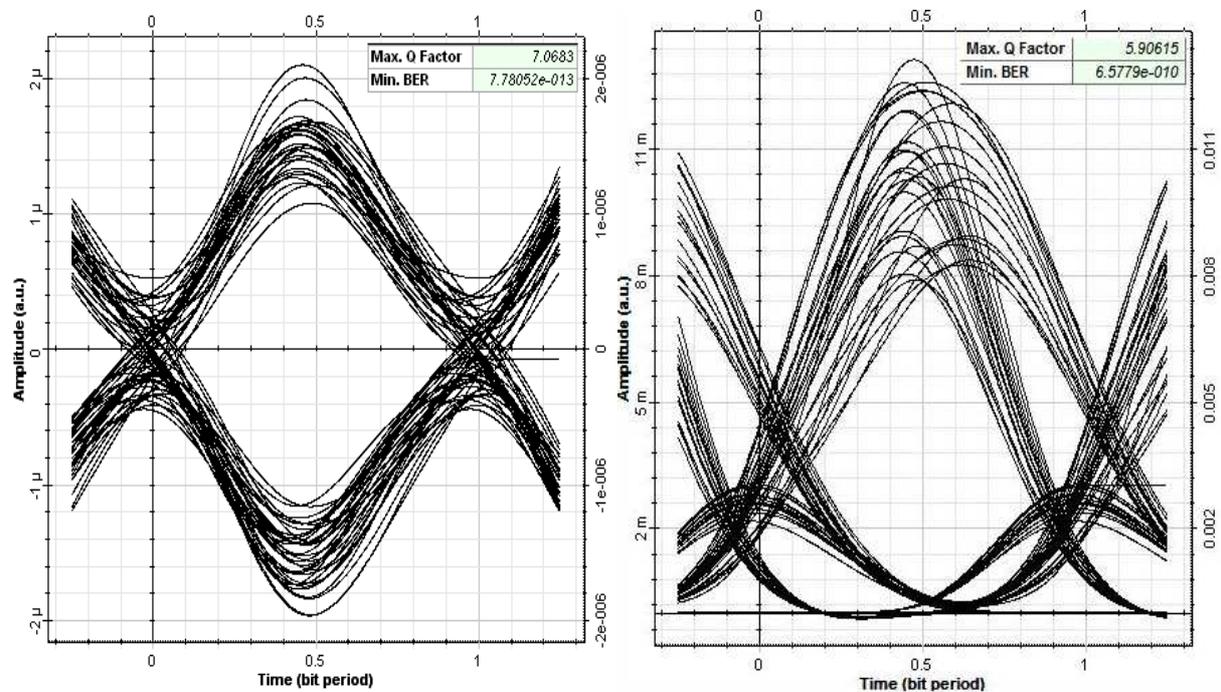
Figure 3.25 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant.

- $L=10\text{km}$, débit descendant 2.5Gbit/s, débit montant 1.25Gbit/s



(a) (b)
Figure 3.26 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant.

- $L=10\text{km}$, débit descendant 2.5Gbit/s, débit montant 2.5Gbit/s



(a) (b)
Figure 3.27 : Diagramme de l'œil. (a) sens descendant, (b) sens montant.

Les résultats de cette dernière simulation indiquent un bon facteur de qualité et un bon taux d'erreur binaire pour un débit symétrique de 1.25Gbit/s (figure 3.25) et 2.5Gbit/s (figure 3.27). Pour un débit descendant de 2.5Gbit/s et montant de 1.25Gbit/s, le BER est de l'ordre de 10^{-11} ce qui signifie la bonne transmission du signal.

Au final, on peut dire que pour augmenter le nombre d'abonné de 16 jusqu'à 32, il faut diminuer la distance et l'espacement entre canal.

3.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons effectué nos recherches sur les performances de transmission du système PON qui repose sur le multiplexage en longueur d'onde WDM en agissant sur différents paramètres tel que la longueur de la fibre, le débit de la liaison et le nombre d'abonnés.

Le taux d'erreur binaire et le facteur de qualité nous ont permis d'évaluer la qualité de la transmission pour le sens descendant et montant du réseau d'accès passif tout en respectant les valeurs utilisés en télécom optique.

Compte tenu des résultats des simulations faites dans ce chapitre pour les différentes architectures WDM-PON envisagées, nous pouvons établir les constats suivants :

- ✓ Pour 4 abonnés, le réseau WDM-PON doit avoir un débit descendant maximum de 20Gbit/s et montant de 1.25Gbit/s pour une distance de 20km.
- ✓ Pour 16 et 32 abonnés, le réseau WDM-PON doit avoir un débit maximum symétrique de 2.5Gbit/s pour une distance de 10km.

Conclusion générale

L'évolution des télécommunications optiques a mis en relief l'apparition de nouvelles technologies de transport de l'information telles que les réseaux optiques. Actuellement, l'augmentation de la demande de débit jusqu'à l'utilisateur implique une recherche particulière sur la conception des réseaux d'accès de type FTTH, qui permettent d'atteindre des débits supérieurs à ceux de l'ADSL utilisés aujourd'hui.

Dans ce cadre, l'objectif de notre projet était l'étude de l'augmentation de la capacité du réseau d'accès optique passif basé sur le multiplexage en longueur d'onde en agissant sur les différents paramètres (ONUs, couverture et débit binaire). C'est pourquoi il nous a paru important de commencer ce mémoire par une description approfondi des réseaux optiques passifs PON existants ainsi que leurs limitations, dues notamment aux effets linéaires et non linéaires de la transmission par fibre optique. Nous avons exposé également quelques solutions à ces problèmes, pouvant être séparées en deux catégories : optique et électronique, qui se différencient par leur coût.

Nous avons ensuite défini les critères de qualité d'une transmission numérique, les principes des techniques de modulation directe et externe, ainsi que les différents formats de modulation en particulier le format de modulation différentielle en phase sur quatre niveaux DQPSK. Cette dernière est une solution prometteuse caractérisée par une haute efficacité spectrale.

Cette technique de modulation fait parti donc du système WDM-PON que nous nous sommes proposés d'évaluer. De ce fait, la suite du mémoire a été consacrée exclusivement à la modélisation du système étudié et la présentation des résultats de simulation. Le système WDM-PON étudié est basé sur la modulation DQPSK en downlink et des ONUs intégrant des SOAs en modulation NRZ, nous avons agit sur la longueur de la fibre, le nombre de clients (ONUs) et le débit binaire.

Nous avons constaté une amélioration du débit descendant allant jusqu'à 20Gbit/s pour 4 abonnés sur une distance de 20 km associé à un débit montant de 1.25Gbit/s. En outre, une augmentation du nombre d'abonné allant jusqu'à 32 clients, pour un débit symétrique de 2.5Gbit/s sur une distance de 10 km, ont été notés également. Les résultats obtenus sont fort prometteurs, ouvrant ainsi la voie à d'autres investigations basées sur l'utilisation de nouveaux formats de modulation visant à améliorer la qualité du signal transmis malgré la dispersion chromatique, la PMD, la rétrodiffusion de Rayleigh et autres phénomènes, et sur la re-modulation NRZ qui permet de remplacer les sources laser en uplink donc un budget bas-coût pour la réalisation des réseaux PON.

Références Bibliographiques

Référence Bibliographique

- [1] GAO. S; 2013 – « Impact of backreflections on single fiber bidirectional wavelength division multiplexing passive optical networks (WDM-PONs) ». Thesis for the degree of master. University of Ottawa, Canada.
- [2] ESSMARIM ; 2011 – « Mise à niveau des réseaux de transmission ». Rapport de projet de fin d'études, Université virtuelle de Tunis.
- [3] MRABET. H ; 2011 – « Cours Réseau d'accès optique ». Institut Supérieur des Etudes Technologiques en Communications de Tunis.
- [4] Ensemble d'industriels et équipementiers du domaine; 2006 – « Les réseaux PON », Passive Optical Network, Eléments d'appréciation techniques, économiques et réglementaires, p.5-30.
- [5] LECOY. P ; 1997 – « Télécom sur fibres optiques ». Ed. Hermes. Paris
- [6] BELFQIH. Z ; 2008 – « Etude de l'augmentation de la capacité du réseau d'accès optique passif basé sur le multiplexage temporel » Thèse de doctorat. France Telecom Research & Development Division, France.
- [7] TEMMAR. A, OULD SAADI. H, BOUTALEB. A et CHENIKA. A ; 2014 – « Etude et Analyse d'un Réseau d'Accès Optique Passif (PON) ». Communication Science & technology N° 14. Laboratoire de Recherche Appliquée en TIC. Institut National des Télécommunications et TIC, Oran, Algérie.
- [8] SARNI. M, HILT. B, CLEMENTZ. N et LORENZ. P ; 2007 – « Expérimentation de service Triple Play sur un réseau optique passif ». Projet ERAS (Expérimentation de Réseaux à Accès Symétriques). Laboratoire MIPS-GRTC, Société Vialis, Colmar, France.
- [9] SALIOU. F ; 2010 – « Etude des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée ». Thèse de doctorat présenté à TELECOM PARIS TECH, Université de LIMOGES, Paris, France.
- [10] RAHARIMANITRA. F.N ; 2012 – « Contribution à l'étude des architectures basées sur le multiplexage en temps et en longueur d'onde dans le réseau d'accès, permettant la migration vers la nouvelle génération de PON (NG-PON) à 10 Gbits/s ». Thèse de doctorat présenté à Télécom Bretagne, Université de Bretagne-sud, France.
- [11] MAEDA. Y and MONTALTI. F ; 2009 – « Optical fibres, cables and systems ». ITU-T Manual, Geneva, Switzerland.

- [12] MEDJOUB. F ; 2010 – « Optimisation par la simulation système d'une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit ». Mémoire de magister, Université de Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- [13] CHIALI. I ; 2013 – « Etude d'une transmission d'un signal modulé directement par une source optique laser à un débit de 10 Gbit/s ». Mémoire de master, Université de Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- [14] LEFRANÇOIS. M ; 2007 – « Etude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s », Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, Paris-Sud.
- [15] FRIGNAC. Y ; 2003 – « Contribution à l'ingénierie des systèmes de transmission terrestres sur fibre optique utilisant le multiplexage en longueur d'onde de canaux modules au débit de 40 Gbit/s ». Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications, spatialité électronique et communication.
- [16] KARIME. F ; 2008 – « Caractérisation d'un réseau de Bragg à pas variable Application à la compensation de la dispersion chromatique ». Mémoire de magister, Université de Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- [17] HAMED. Y.D ; 2014 – « Etude d'une liaison Radio sur Fibre ». Mémoire de master, Université de Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- [18] OHM. M, FRECKMANN.T ; 2004 – « Comparison of Different DQPSK Transmitters with NRZ and RZ Impulse Shaping », in proc. *LEOS'04*, ThB2.

Résumé

Le haut débit, la grande distance de propagation et la bonne qualité de transmission combinés à un coût réduit sont des critères de plus en plus demandés pour la réalisation d'un système de télécommunications optique. Dans ce sens, les institutions de normalisation comme l'ITU-T et le FSAN se tournent aujourd'hui vers des solutions de multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing) pour satisfaire les exigences de la nouvelle génération de réseau d'accès optique passif (NG-PON2) et faire face ainsi à plusieurs enjeux majeurs notamment l'augmentation des débits, du nombre de clients raccordés et l'étalement des infrastructures pour couvrir des zones toujours plus importantes.

Ce mémoire a pour objectif l'investigation de l'augmentation des capacités (débit, portée, nombre d'ONU) de la future génération NG-PON2 de type WDM. Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés à une architecture PON-WDM basée d'une part, sur une modulation DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) en downlink pour accroître le débit en combattant le phénomène d'interférence inter-symboles (ISI) dû à la dispersion chromatique, et d'autre part sur une re-modulation NRZ en uplink pour réduire les coûts de déploiement en éliminant les sources laser au niveau des ONUs. Le modèle de liaison optique proposé ainsi que ses paramètres sont explicités et différentes architectures WDM-PON sont simulées. Les résultats obtenus sont fort prometteurs, ouvrant ainsi la voie à d'autres investigations visant à atteindre les objectifs des réseaux NG-PON2.

Mots-clés: haut débit, l'ITU-T, FSAN, nouvelle génération de réseau d'accès optique passif (NG-PON2), WDM, ONU, ISI, DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), re-modulation NRZ (Non Return to Zero), downlink, uplink.

Abstract

High bandwidths, great distance of propagation and the good transmission quality combined with a low cost are criteria increasingly required for the realization of an optical telecommunications system. In this sense, standardization institutions such as the ITU-T and FSAN is now turning to solutions multiplexing wavelength (WDM, Wavelength Division Multiplexing) to meet the requirements of the new generation of passive optical access network (NG-PON2) and face and several major challenges including increased rates, the number of connected clients and spreading the infrastructure to cover ever larger areas.

This thesis aims at investigating the increase in capacity (throughput, range, number of ONU) of future generation NG-PON2 in WDM mode. In this context, we are interested in a WDM-PON architecture based firstly on a DQPSK modulation (Differential Quadrature Phase Shift Keying) in downlink to increase throughput by combating inter-symbol interference (ISI) phenomenon due to the chromatic dispersion, and secondly on a re-modulation NRZ in the uplink to reduce deployment costs by eliminating the laser sources at the ONUs. The optical link proposed model and its parameters are explained and different architected WDM-PON are simulated. The results are very promising, paving the way for further investigations to achieve the objectives of NG-PON2 networks.

Keywords : broadband, l'ITU-T, FSAN, new generation of passive optical access network (NG-PON2), WDM (Wavelength Division Multiplexing), ONU (Optical Network Unit), ISI, DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) re-modulation NRZ (Non Return to Zero), downlink, uplink.