

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان-
Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de Doctorat 3^{ème} Cycle**

En : Télécommunications

Spécialité : Signaux et Systèmes de Télécommunications

Par : HACENE Imene

Sujet

**Conception de nouveaux dispositifs optiques de division,
multiplexage, routage et de protection pour les réseaux FTTH**

Soutenue publiquement, le 26/01/2025, devant le jury composé de :

Mr KHELLADI Mounir	MCA	Univ. De Tlemcen	Président
Mr KARIM Fethallah	Professeur	Univ. De Tlemcen	Directeur de thèse
Mr BORSALI Ahmed Riad	Professeur	Univ. De Tlemcen	Examineur 1
Mr BOUREGAA Mouweffeq	MCA	Univ. De Mascara	Examineur 2

Remerciements

Je tiens en premier lieu Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la patience et la capacité pour accomplir ce travail et d'aller jusqu'au bout

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à :

Mon encadreur Pr Karim fethallah. En reconnaissance de ses multiples conseils et aides tout au long de ce travail si pénible et ardu à la fois. Surtout pour sa disponibilité à tout moment.

Aux membres du jury : Dr KHELLADI Mounir président du jury, ainsi que Pr BORSALI Ahmed Riad et Dr BOUREGAA Mouweffeq pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

Enfin, je dédie cette thèse à ma famille, en particulier à mes très chers parents à mon frère et à mes sœurs pour leur soutien indéfectible tout au long de mes études.

Ainsi qu'à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Cette thèse est l'aboutissement de recherches menées au sein du laboratoire LTT.

Hacene Imene

Résumé

L'immense demande en matière d'informations et d'applications de la part des opérateurs et des particuliers nous a poussés à proposer ce thème dans le but de faire correspondre de telles attentes à des infrastructures et à des dispositifs de division, de multiplexages et de routage qui desservent ces services précisément. Dans cette thèse nous nous sommes focalisés sur l'étude et la conception d'un nouveau dispositif de protection d'une ligne optique OLP (OLP : Optical Line Protection) pour les réseaux fibre jusqu'au domicile FTTH (FTTH : Fiber To The Home) avec un mécanisme purement passif. De ce fait une étude théorique des mécanismes de protection actifs actuellement implémentés est présentée suivi des étapes de la proposition du nouveau dispositif OLP basé sur un coupleur ayant un rapport de couplage de 99.9/0.1. Ces deux mécanismes ont fait l'objet d'une simulation afin de constater l'amélioration des performances du réseau lorsqu'on adopte le nouveau dispositif conçu en terme de taux d'erreur binaire BER (BER : Bit Error Rate) et du facteur de qualité Q (Quality factor).

Mots-clés : réseaux FTTH, OLP, mécanisme actif, mécanisme passif, coupleur 99.9/0.1, BER, facteur de qualité Q.

Abstract

The immense demand for information and applications from operators and individuals has pushed us to propose this theme with the aim of matching such expectations with infrastructures and devices for division, multiplexing and routing systems that serve these services precisely. In this thesis, we focused on the study and design of a new optical line protection device OLP (OLP: Optical Line Protection) for fiber to the home networks FTTH with a purely passive mechanism. Therefore a theoretical study of the active protection mechanisms currently implemented is presented followed by the design stages of the new OLP device based on a coupler having a coupling ratio of 99.9/0.1. These two mechanisms were the subject of a simulation in order to observe the improvement in network performance when adopting the new device designed in terms of bit error rate BER (BER: Bit Error Rate) and the factor of quality Q (Quality factor).

Keywords: FTTH networks, OLP, active mechanism, passive mechanism, 99.9/0.1 coupler, BER, Q factor

ملخص

لقد دفعنا الطلب الهائل على المعلومات والتطبيقات من قبل المشغلين والأفراد إلى اقتراح هذا الموضوع بهدف مطابقة هذه التوقعات مع البنى التحتية وأجهزة التقسيم والتجميع والتوجيه التي تخدم هذه الخدمات بدقة. في هذه الأطروحة ركزنا على دراسة وتصميم جهاز جديد لحماية الخط البصري OLP لشبكات الألياف إلى المنزل FTTH بألية سلبية بحتة. و نتيجة لذلك تم تقديم دراسة نظرية لآليات الحماية النشطة المنفذة حاليًا تليها مراحل تصميم جهاز OLP الجديد المبني على مقرر بنسبة اقتران 99.9/0.1. تمت محاكاة هاتين الآليتين من أجل ملاحظة تحسن أداء الشبكة عند اعتماد الجهاز الجديد المصمم من حيث معدل الخطأ الثنائي BER معدل خطأ وعامل الجودة Q.

الكلمات المفتاحية: شبكات FTTH، OLP، الألية النشطة، الألية السلبية، مقارنة 99.9/0.1، BER، عامل الجودة Q

Listes des figures

Figure I.1	Structure basique d'une fibre optique.....	5
Figure I.2	Reconstitution des lois de Snell-Descartes.....	6
Figure I.3	Phénomène de propagation dans la fibre optique par réflexion interne totale	7
Figure I.4	Propagation de la lumière dans une fibre optique monomode.....	8
Figure I.5	Fibres multimodes a) fibre MMF à saut d'indice b) fibre MMF à gradient d'indice.....	9
Figure I.6	Atténuation linéaire d'une fibre monomode en fonction de la longueur d'onde	11
Figure I.7	L'effet de la dispersion chromatique sur un signal transmit le long d'une fibre optique.....	12
Figure I.8	L'effet de la dispersion modale de polarisation sur un signal transmit le long d'une fibre optique.....	12
Figure I.9	Chaine de transmission optique classique.....	13
Figure I.10	Éléments constituant l'émetteur optique.....	13
Figure I.11	Structure de base d'une diode DEL.....	15
Figure I.12	Structure de base d'une diode LASER.....	15
Figure I.13	Principe de modulation optique.....	16
Figure I.14	Bloc-descriptif d'un émetteur optique avec une modulation directe.....	17
Figure I.15	Bloc-descriptif d'un émetteur optique avec une modulation externe.....	18
Figure I.16	Schéma d'un modulateur électro-optique de type Mach-Zehnder.....	18
Figure I.17	Schéma d'un modulateur à électro-absorption (EAM).....	20
Figure I.18	Schéma du bloc récepteur optique.....	20
Figure I.19	Photodiode PIN.....	22
Figure I.20	Principe d'une photodiode à avalanche.....	23
Figure I.21	Principe de constitution d'un diagramme de l'œil.....	24
Figure II.1	Principe de l'amplificateur EDFA.....	28
Figure II.2	Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur.....	29
Figure II.3	Description d'une commutation directe du signal.....	31
Figure II.4	Les fonctions d'un coupleur optique : a) diviser b) combiner c) coupler.....	32
Figure II.5	Les technologies de conception des coupleurs optiques : a) FBT b) PLC.....	32

Figure II.6	Mode de fonctionnement d'un filtre traditionnel.....	34
Figure II.7	Architecture générale d'une liaison WDM.....	35
Figure II.8	Schéma descriptif d'un AWG.....	37
Figure II.9	Fonctionnement d'un circulateur optique.....	39
Figure II.10	Types de connecteurs optiques.....	40
Figure II.11	Schéma de base d'un réseau de télécommunications.....	41
Figure II.12	Architecture de base d'un réseau PON.....	42
Figure II.13	Schéma Protection de type A	45
Figure II.14	Schéma Protection 1+1.....	45
Figure II.15	a) Code réseau statique contre une panne de lien unique, b) Model XOR.....	46
Figure II.16	Architecture d'un système de protection en anneau.....	47
Figure II.17	Architecture d'un système de protection par FSO.....	48
Figure II.18	Architecture de protection multi-chemin a) sans compression b) avec compression.....	50
Figure II.19	Performances des différentes technologies d'accès à Internet en fonction de la distance.....	51
Figure II.20	Différentes architectures de réseau d'accès optique FTTx.....	53
Figure II.21	Flexibilité du PON pour différentes configurations (FTTH et FTTC).....	54
Figure III.1	Déploiement des dispositifs OLP dans un réseau optique.....	56
Figure III.2	a)mécanisme de protection OLP1+1 coté émission b) mécanisme de protection OLP1+1 coté réception.....	57
Figure III.3	a)mécanisme de protection OLP1:1 coté émission b) mécanisme de protection OLP1:1 coté réception.....	58
Figure III.4	Schéma théorique du système OLP passif proposé.....	60
Figure III.5	a) Principe de fonctionnement du coupleur (99.9/0.1) lorsque la fibre principale et la fibre de secours fonctionnent en même temps b) Principe de fonctionnement du coupleur fusionné (99,9/0,1) lorsque la fibre principale est en panne et que la fibre de secours fonctionne.....	62
Figure III.6	Vue générale sur la liaison descendante du réseau simulé.....	63
Figure III.7	Bloc OLT coté émetteur.....	64
Figure III.8	Le spectre optique émis du signal multiplexé à 16 canaux.....	64
Figure III.9	Le spectre optique reçu du signal multiplexé à 16 canaux.....	65
Figure III.10	Bloc OLT coté récepteur.....	66
Figure III.11	Implémentation du dispositif OLP actif dans le réseau simulé.....	67

Figure III.12	Implémentation de l'atténuateur dans le réseau simulé	68
Figure III.13	Diagramme de l'œil du premier utilisateur.....	69
Figure III.14	Implémentation du dispositif OLP passif dans le réseau simulé	70
Figure III.15	Diagramme de l'œil du premier utilisateur.....	71
Figure III.16	Diagramme de l'œil du premier utilisateur.....	72
Figure III.17	L'impact de la variation de la longueur de la ligne optique sur le diagramme de l'œil.....	73
Figure III.18	Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre.....	74
Figure III.19	Variation du BER en fonction de la longueur de la fibre.....	74
Figure III.20	Schéma bloc du test expérimental de l'OLP dans un setup optique : a) lorsque les 2 fibres fonctionnent, b) lorsque la fibre principale est endommagée.....	77
Figure III.21	Le setup optique réel doté d'un OLP passif.....	78
Figure III.22	Voyants d'état des deux convertisseurs de média.....	79
Figure III.23	Implémentation d'un atténuateur au setup.....	79
Figure III.24	Voyants d'état des deux convertisseurs de média après l'élimination de l'effet du crosstalk.....	80
Figure A.1	Interface graphique du logiciel OptiSystem.....	85

Liste des tableaux

Tableau I.1	Caractéristiques des types de fibres optiques	10
Tableau I.2	Caractéristiques des diodes LED et LASER	16
Tableau II.1	Propriétés de différents amplificateurs.....	30
Tableau II.2	Les différentes technologies du WDM.....	36
Tableau II.3	Caractéristiques des normes des réseaux PON.....	44
Tableau II.4	Table de vérité XOR.....	46
Tableau III.1	Impact du filtre optique sur la réception d'un signal	66
Tableau III.2	Puissances mesurées dans le scénario 1.....	69
Tableau III.3	Puissances mesurées dans le scénario 1.....	71
Tableau III.4	Puissances mesurées dans le scénario 2.....	72
Tableau III.5	Récapitulatif des résultats de simulation des deux mécanismes OLP passif conçu et actif.....	76
Tableau III.6	Mesures de puissance du scénario 1.....	78
Tableau III.7	Mesures de puissance du scénario 1 après l'implémentation de l'atténuateur	80
Tableau III.8	Mesures de puissance du scénario 2.....	80

Liste d'abréviations

A

ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line
ADSL 2+ : Asymmetric Digital Subscriber Line 2+
APD : Avalanche Photodetector Diode
APON : Asynchronous Transfer Mode PON
AWG : Arrayed Waveguide Grating

B

BER: Bit Error Rate
BLU : Bande Latérale Unique
BPON : Broadband PON

C

CO : Central Office
CSRZ : Carrier Suppressed Return to Zero
CWDM : Coarse Wavelength Division Multiplexing

D

DB: DuoBinary
DD- Dual Drive MZM
MZM : Diode Electroluminescente
DEL : Distributed-Feedback
DFB: Differential Group Delay
DGD : Diode Laser
DL : Double Side Band
DSB : Dense Wavelength Division Multiplexing
DWDM:

E

EAM : Electro-Absorption Modulator
EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier
EPON : Ethernet PON

F

FBT : Fused Biconical Tapered
FC : Ferrule Connector
FDM : Frequency Division Multiplexing
FEC : Forward Error Correction

Liste d'abréviations

FP : Fabry-Perot
FTTB: Fiber To The Building
FTTC : Fiber To The Curb
FTTCab: Fiber To The Cabinet
FTTN: Fiber To The Node
FTTH : Fiber To The Home
FTTx : Fibre To The x
FWHM : Full Width at Half Maximum

G

GPON : Gigabit PON

L

LAN : Local Area Network
LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LC: Lucent Connector

M

MAN : Metropolitan Area Network
MEMS : MicroElectroMechanical Systems
MMF : Multi Mode Fiber
MQWs : Multiple Quantum Wells
MZM: Mach-Zehnder Modulator

O

OLP : Optical Line Protection
OLT : Optical Line Terminal
OLU : Optical Line Unit
ONU: Optical Network Unit

P

PIN : Postive Intrinsic Negative
PMD : Polarisation Mode Dispersion
PLC : Planar Lightwave Circuit
PON : Passive Optical Network
P2M : Point To Multi-point
P2P : Point To Point

Q

QE : Quantum Efficiency

R

Liste d'abréviations

Re- Reach Extended ADSL
ADSL :

RN: Remote Node

S

SC: Subscriber Connector

SMF: Single Mode Fiber

SOA : Semiconductor Optical Amplifier

SSB : Single Side Band

ST : Straight Tip

T

TEB : Taux d'Erreur Binaire

TIA : Telecommunications Industry Association

V

VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

VDSL2 : Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line 2

W

WDM : Wavelength Division Multiplexing

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
ملخص	iii
Listes des figures.....	iv
Liste des tableaux	vii
Liste d'abréviations.....	viii
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les communications optiques	
1.1 Introduction	4
1.2 Principes de la communication optique	4
1.2.1 Fibre optique : principe et composition.....	4
1.3 Chaine de transmission optique.....	13
1.3.1 Bloc émetteur	13
1.3.2 Bloc récepteur	20
1.4 Critères d'évaluation d'une transmission	24
1.4.1 Diagramme de l'œil.....	24
1.4.2 Taux d'erreur binaire	25
1.4.3 Facteur de qualité	25
1.4.4 Bilan énergétique de la liaison	25
1.5 Conclusion.....	25
Chapitre 2 : Dispositifs optiques et réseaux FTTx.....	
2.1 Introduction	27
2.2 Dispositifs optiques pour les réseaux haut débit	27
2.2.1 Dispositifs optiques actifs.....	27
2.2.1 Dispositifs optiques passifs	31
2.3 Les réseaux PON	40
2.3.1 Architecture des réseaux PONs	41
2.3.2 Topologies des réseaux PON	42
2.3.3 Standards et évolutions des réseaux PON	44
2.3.4 Systèmes des protections optiques	44
2.4 Les réseaux FTTx.....	50

Table des matières

2.4.1	Contexte et importance des réseaux FTTx.....	50
2.4.2	Types de Réseaux FTTx.....	50
2.4.3	Déploiements des réseaux FTTx-PON	53
2.5	Conclusion.....	54
Chapitre 3 : Conception d'une ligne de protection passive à base de coupleurs optiques		
3.1	Introduction	56
3.2	Système de protection actif de la ligne optique.....	56
3.2.1	Système OLP1 +1 double transmission, sélectivement reçu	57
3.2.2	Système OLP1 :1 Sélectivement transmit, Sélectivement reçu	58
3.2.3	Les limites des systèmes de protection actifs	58
3.3	Système de protection passif de la ligne optique	59
3.3.1	Les coupleurs optiques (types PLC et FBT, rapport de couplage)	59
3.3.2	Description du nouveau dispositif OLP passif	59
3.4	Evaluation des performances du dispositif OLP passif via simulation	62
3.4.1	Caractéristiques du réseau simulé	62
3.4.2	Simulation du système OLP actif.....	67
3.4.3	Simulation du nouveau système OLP passif	70
3.4.4	Performances de l'OLP passif en fonction de la longueur de la ligne optique.....	72
3.4.5	Discussion des résultats de simulation	75
3.5	Validation expérimentale du dispositif OLP passif.....	77
3.5.1	Mise en place du banc d'essai.....	77
3.5.2	Présentation et analyse des résultats expérimentaux	78
3.6	Conclusion.....	81
Conclusion générale.....		83
Annexe		85
Annexe A : Le logiciel de simulation Optisystem		85
1.	Présentation du logiciel Optisystem.....	85
1.1	Principales parties de l'interface graphique.....	86
1.2	Créer et simuler un projet dans optisystem.....	86
Références.....		87

Introduction Générale

La notion du terme « communication optique » a été évoquée pour la première fois dans le début des années 60 lors de l'invention du Laser mais c'est qu'en 1970 que la première fibre optique dites Ultra pure a vu le jour grâce aux chercheurs de l'époque notamment Kao et Hockmann, leurs incroyable découverte a bousculé, au sens positif du terme, les technologies de la communication et de transmission des données qui étaient, à cette époque, principalement véhiculés via des câbles en cuivre pour la communication filaire et via d'ondes électromagnétiques pour la communication sans fil en déployant, à partir de 1978, des systèmes de communication optique progressivement un peu partout dans le monde en commençant par les liaisons intercontinentales appelées câbles de fibre optique sous-marins [1]. Ils sont restés, depuis, les systèmes les plus convoités par les opérateurs de part de leurs excellentes performances par rapport aux moyens de communications traditionnels précédemment cités.

Puis arrivent les années 2000 qui témoignent le phénomène d'explosion d'Internet et des technologies numériques et avec l'apparition d'un nombre incessant d'applications pour les réseaux d'accès dédiés aux particuliers qui consomment énormément de débits et de bandes passantes comme : les services de vidéo à la demande, la vidéo à trois dimensions, la visioconférence, l'arrivée de la 5G, de l'Internet des objets et des services à haute définition ce qui poussent encore les chercheurs à trouver des moyens de plus en plus optimaux pour répondre aux exigences des abonnés [2], c'est ainsi que la technologie de fibre jusqu'au domicile FTTH : Fiber To The Home a été développée également connu sous le nom de "Fibre à l'abonné" en français, est un réseau qui permet à l'opérateur ou au fournisseur d'accès à internet d'établir un lien direct en fibre optique jusqu'à l'intérieur du domicile de l'abonné. Ce réseau est actuellement majoritairement déployé grâce aux très nombreux avantages qu'il offre tels que les très hauts débits comparant à ceux de l'ADSL (ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line en français ligne d'abonné numérique asymétrique) qui utilise comme support les câbles en cuivre. En plus de l'excellente performance et fiabilité de l'infrastructure passive, le réseau FTTH propose des débits de connexion les plus rapides et symétriques et adhère à l'évolution de nouveaux usages d'internet et de services connectés. [3]

L'enjeu majeur de notre sujet de thèse est d'accroître les performances et la capacité d'un réseau FTTH en terme de nombre d'abonnés, optimiser sa flexibilité en vue du changement constant des technologies de la communication optique, ainsi que d'améliorer la qualité des services proposés et cela en concevant et réalisant de nouveaux dispositifs optiques de division, de multiplexage et de routage dédiés aux réseaux FTTH.

Dans notre thèse, on se focalise principalement sur l'aspect de la protection des réseaux FTTH, nous allons donc proposer un nouveau dispositif de protection de la ligne optique passif inspiré d'un mécanisme active qui existe déjà. Notre contribution va améliorer le rendement en termes de taux d'erreur binaire et simplifié la structure du réseau.

Ce manuscrit a été élaboré afin de montrer en première partie les avancées déjà atteints pour ces réseaux ainsi que les défis qui peuvent les rencontrer et en seconde partie, essayé de trouver des solutions optimales pour relever ces challenges et il est réparti en trois chapitres, comme suit :

Dans le premier chapitre, on propose une analyse détaillée sur la propagation de la lumière ainsi que des éléments constitutifs d'un système de transmission par fibre optique. On examinera ensuite les phénomènes de dégradations affectant le signal au cours de sa propagation dans la fibre optique pour ensuite introduire les critères d'évaluation de l'efficacité du système de transmission.

Le deuxième chapitre sera consacré à la composition et la conception des réseaux optiques en termes d'équipements actifs et passifs notamment ceux de division de multiplexage et de routage, on peut citer par exemple les diviseurs de puissance, les amplificateurs optiques, les coupleurs optiques, les commutateurs, les multiplexeurs etc. Ensuite, on exposera les différents types de réseaux optiques plus exactement une catégorie bien spécifique de ces réseaux optiques, les réseaux FTTx, en abordant leurs différents types ainsi que leur implémentations pour finir avec une brève revue sur ce qu'on nomme les réseaux hybrides : FTTH-PON (PON : Passive Optical Network).

Le troisième et dernier chapitre est consacré, d'une part, à une étude bibliographique sur les techniques de protection des lignes optiques OLP (OLP : Optical Line Protection) actives basée sur les commutateurs optiques en étalant leurs performances et limitations et d'autre part, à la présentation de notre contribution qui consiste à concevoir un dispositif de protection optique passif basé un coupleur optique ayant un rapport de couplage 99.9/0.1 qui propose une approche beaucoup plus simple et plus optimale que la précédente technique et après on enchainera avec les résultats de simulation des deux techniques sur un réseau FTTH via le logiciel optisystem, c'est dans cette partie du chapitre qu'on pourra voir l'impact d'implémentation des OLP actif et le notre passif sur le bilan de puissance du réseau simulé. Une seconde approche sera proposé afin de valider l'OLP passif en l'implémentant dans un setup optique au niveau du laboratoire LTT.

En guise de conclusion de cette thèse, nous proposerons des axes de recherche prometteurs que nous estimons pertinents pour d'éventuelles études. Ces pistes de réflexion ouvrent la voie à de

potentielles avancées dans le domaine et méritent, selon nous, d'être explorées dans les travaux à venir.

Chapitre 1 : Généralités sur les communications optiques

Généralités sur les communications optiques

1.1 Introduction

Ce chapitre met en évidence les différents blocs qui constituent un système de transmission par fibre optique, on commencera par décrire l'élément clé de cette méthode de communication à savoir la fibre optique et on enchainera par la suite par la description de la propagation de la lumière au sein de ce canal afin d'entamer concrètement la description de la globalité du système de communication optique notamment les composants du bloc émetteur et du bloc récepteur avant de clôturer le chapitre avec l'énonciation des différentes dégradations qui peuvent surgir lors de l'acheminement du signal optique ainsi que la description des critères qui permettent d'évaluer l'efficacité du système en question.

1.2 Principes de la communication optique

L'acheminement de l'information sous forme d'ondes lumineuses d'un point à un autre via un support optique est venu remplacer la technique classique du transport des données sous forme électrique en offrant des débits d'informations nettement plus supérieur à ceux des câbles coaxiaux pour les applications des smart-phones, la visioconférence ou encore la télévision et tout ça avec un minimum de pertes [4].

1.2.1 Fibre optique : principe et composition

La fibre optique est un support de transmission qui est capable de faire acheminer justement une intensité de lumière (ou onde optique) entre deux points distants (à des centaines de kilomètres) grâce au mécanisme de confinement du champ lumineux tout le long de la ligne optique. Les fibres optiques sont des « fils » conçues à base de verre ou de plastique transparent mais c'est plutôt le dioxyde de silicium (SiO_2) le matériau de base qui est utilisé pour fabriquer les fibres optiques en raison de son absorption ultrabasse dans les fenêtres de longueurs d'onde des communications optiques, d'après les recherches fournies, il s'est avéré que ce matériau est adapté aux longueurs d'onde prises dans le proche infrarouge (850 nm - 1300 nm - 1500 nm). La structure de base d'une fibre optique est montrée dans la figure I.1, elle comporte un noyau central appelé cœur de $10\mu m$ à $85\mu m$ de diamètre, c'est à ce niveau que la lumière se propage, une gaine diélectrique ayant une propriété matérielle différente de celle du cœur qui va venir l'entourer ayant un diamètre standard de $125\mu m$ ainsi qu'un revêtement externe en polymère de $250\mu m$ de

diamètre entoure ces deux couches pour protéger la fibre contre toutes contraintes mécaniques et tout effet environnemental et enfin, une enveloppe protectrice externe en polymère de $900\mu\text{m}$ de diamètre pour renforcer le tout. Il est important de noter que d'autres structures de fibres peuvent exister en variant les matériaux, la taille et la stratification de cette configuration fondamentale [1-4].

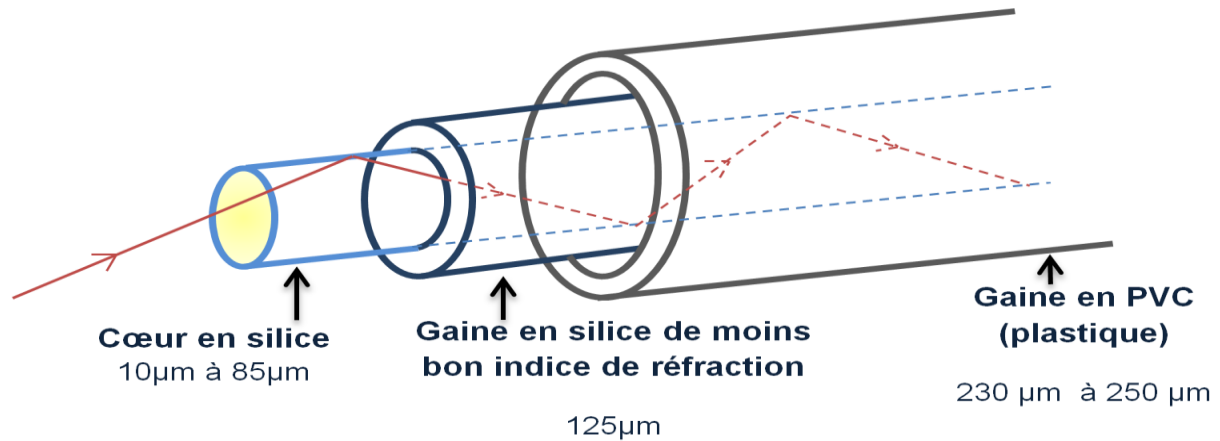


Figure I.1 Structure basique d'une fibre optique [4]

1.2.1.1 Propagation de la lumière dans une fibre optique

Comme il a été préalablement décrit, le cœur et la gaine sont conçus à partir du dioxyde de silicium (SiO_2), mais afin que la lumière reste bien confinée à l'intérieur du noyau de la fibre, il est crucial que l'indice de réfraction du cœur n_1 soit légèrement plus élevé que celui de la gaine n_2 en introduisant lors de la fabrication de la fibre certaines impuretés (ou dopants) dans le cœur tel que le germanium et le phosphore pour augmenter son indice de réfraction et du bore et du fluor pour diminuer l'indice de réfraction du silice de la gaine [5].

Afin de pouvoir comprendre tout le processus d'acheminement des données le long des fibres optiques, certaines notions liées à ce sujet doivent être décrites :

a. L'indice de réfraction n

Que veut-on dire par indice de réfraction n ? C'est simple, ce n'ai autre que le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à la vitesse de la lumière dans ce matériau, tiré de la relation ci-dessous [5].

$$n = c/v \quad (I.1)$$

Avec : v est la vitesse de la lumière dans un matériau transparent, C est la vitesse de la lumière dans le vide

b. Loi de Snell-Descartes

En s'appuyant sur la logique de la géométrie optique, la lumière peut être considérée comme étant constituée d'un ensemble de "rayons" se propageant sous forme de lignes droites à l'intérieur d'un matériau ou d'un milieu et se réfléchissant et/ou se réfractant aux interfaces entre deux matériaux comme indiqué dans la figure I.2 [5].

Les lois de Snell-Descartes de réflexion et réfraction (voir figure I.2) décrivent la trajectoire de l'onde lumineuse lorsqu'elle heurte la l'interface appelée dioptré qui sépare deux milieux transparents et d'indices de réfraction différents (n_1 et n_2). Ce faisceau lumineux se sépare en deux rayons, un réfléchi et l'autre réfracté, selon [6]:

$$\begin{aligned}\theta_{1r} &= \theta_1 \\ n_1 \cdot \sin \theta_1 &= n_2 \cdot \sin \theta_2\end{aligned}\quad (I.2)$$

Avec :

La normale: C'est l'axe perpendiculaire au dioptré, passant par le point d'incidence.

Plan d'incidence : Ce plan est perpendiculaire au dioptré, il contient le rayon incident et la normale au dioptré.

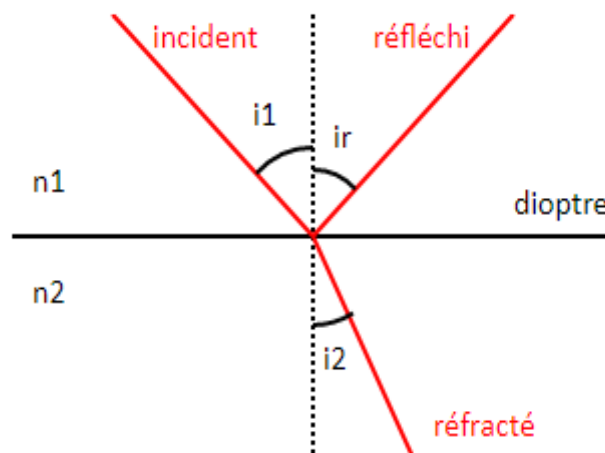


Figure I.2 Reconstitution des lois de Snell-Descartes [5]

Dans le cas où $n_1 > n_2$, il arrive un point où l'angle de réfraction θ_2 est égal à $\frac{\pi}{2}$ (90 degrés). Ce qui signifie la réfraction du rayon lumineux le long de la surface du dioptré. Et ce

phénomène se produit lorsque l'angle d'incidence atteint une valeur spécifique, θ_c , appelé l'angle critique, donnée par [7] :

$$\sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \theta_c \quad (1.3)$$

Concernant les valeurs d'angle d'incidence supérieures à l'angle critique, il n'y a pas de réfraction et tout le rayon est réfléchi à l'intérieur du même milieu d'incidence. C'est ce qu'on appelle la réflexion totale interne (en anglais, TIR : Total Internal Reflection) [5-7].

Comme récapitulatif, pour introduire la lumière transportant les données dans une fibre optique, on aura besoin d'avoir une réfraction de la lumière tandis que pour qu'elle se propage tout le long de la fibre, il va falloir assurer le phénomène de réflexion totale à condition que la différence d'indice cœur/gaine soit de l'ordre de 0,3 % [8].

c. Ouverture numérique

C'est avec cette grandeur, exprimé par la relation (1.4), qu'on va pouvoir définir l'angle d'incidence maximale $\theta_{0\max}$ d'injection d'un signal lumineux dans une fibre optique pour que ce dernier soit acheminé. Au-delà de cette valeur, il est impossible d'introduire la lumière au sein de la fibre [5] (voir la figure 1.3).

$$\theta_0 < \theta_{0\max} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad (1.4)$$

Avec : n_0 , indice de réfraction de l'air.

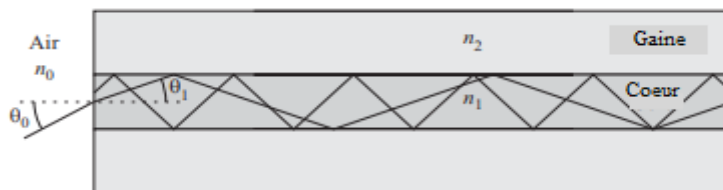


Figure 1.3 Phénomène de propagation dans la fibre optique par réflexion interne totale [5]

1.2.1.2 Types de fibres optiques

Dans une fibre optique, la différence exigée d'indice de réfraction du cœur et de la gaine, précédemment abordée, permet à la lumière de se propager en suivant de nombreux chemins appelés modes de propagation. On distingue deux types de fibres : monomodes, lorsque la

propagation suit l'axe de la fibre (en ligne droite) et multimodes, lorsqu'il y'a une suite des réflexions totales à la surface de séparation cœur – gaine (en zigzag).

Cette distinction va ce faire grâce à un paramètre sans dimension nommé la fréquence normalisée V [9]:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.5)$$

Où a est le rayon du cœur et λ est la longueur d'onde.

a. Fibre monomode (Single Mode Fiber SMF en anglais)

Distinguée par un cœur de 8 à 12 μm de diamètre ce qui implique l'existence d'un seul mode de propagation de la lumière (en ligne droite, avec des longueurs d'onde de 1300 nm et 1550 nm) (voir Figure I.4), la fibre monomode, à par défaut, une fréquence normalisée $V \leq 2.405$, Actuellement, ces fibres, de part leurs caractéristiques, sont en grande partie utilisées pour les liaisons à très grandes distances [8-9].



Figure I.4 Propagation de la lumière dans une fibre optique monomode [9]

b. Fibre multimodes (Multi Mode Fiber MMF en anglais à saut d'indice et à gradient d'indice)

Distinguée par un cœur de plus de 50 μm de diamètre Une fibre est dite multimodes, lorsque la valeur de la fréquence normalisée est $V > 2.405$, la propagation ce fait donc en réflexion totale de la lumière ayant des longueurs d'onde e de 850 nm ou 1300 nm [8-9].

Cette catégorie de fibre se devise en deux subdivisions, tout dépend de la répartition de l'indice de réfraction de la fibre (Voir la Figure I.5) :

➤ **Fibre MMF à saut d'indice**

Cette fibre à un profil à saut d'indice, car tout simplement l'indice de réfraction du cœur reste invariable ce qui implique que le rayon lumineux ne subit aucune déviation dans le cœur. Le trajet est donc dévié au niveau de l'interface cœur-gaine là où l'indice de réfraction change de valeur. Ce type de profil est performant pour les transmissions à faible débit (autour de 50Mb/s) car les rayons lumineux qui s'y propagent se déplacent à différentes vitesses (par rapport au trajet suivit) en

fonction de leurs longueurs d'onde et de l'angle d'incidence. À l'arrivée, on aura un phénomène appelé dispersion intermodale dû à étalement temporel de l'impulsion lumineuse de départ [8].

On peut, selon [7], calculer le nombre de mode de propagation de ce type de fibre en suivant la relation (I.5) :

$$\frac{V^2}{2} \quad (I.5)$$

➤ **Fibre MMF à gradient d'indice**

A l'inverse de la fibre MMF à saut d'indice, la fibre MMF à gradient d'indice a la particularité d'un indice de réfraction plus élevé dans l'axe du cœur et qui diminue progressivement en approchant l'interface cœur-gaine. Ce qui engendre des chemins plus proches les uns des autres des différents rayons lumineux parcourant la fibre sous forme d'oscillations sinusoïdales. Cette égalisation du temps de propagation va réduire considérablement la dispersion des modes, ce qui a comme conséquences positives : l'obtention d'une plus grande largeur de bande dans la fibre à gradient d'indice. Cette fibre est généralement utilisée dans les réseaux de communication à distance moyenne (de 10 à 20 km) et avec un débit relativement élevée (de 34 à 140 Mb/s) [8].

Le nombre de mode propagation de ce type de fibre peut être obtenu grâce à la relation (I.6) selon [7] :

$$\frac{V^2 a}{2(a+2)} \quad (I.6)$$

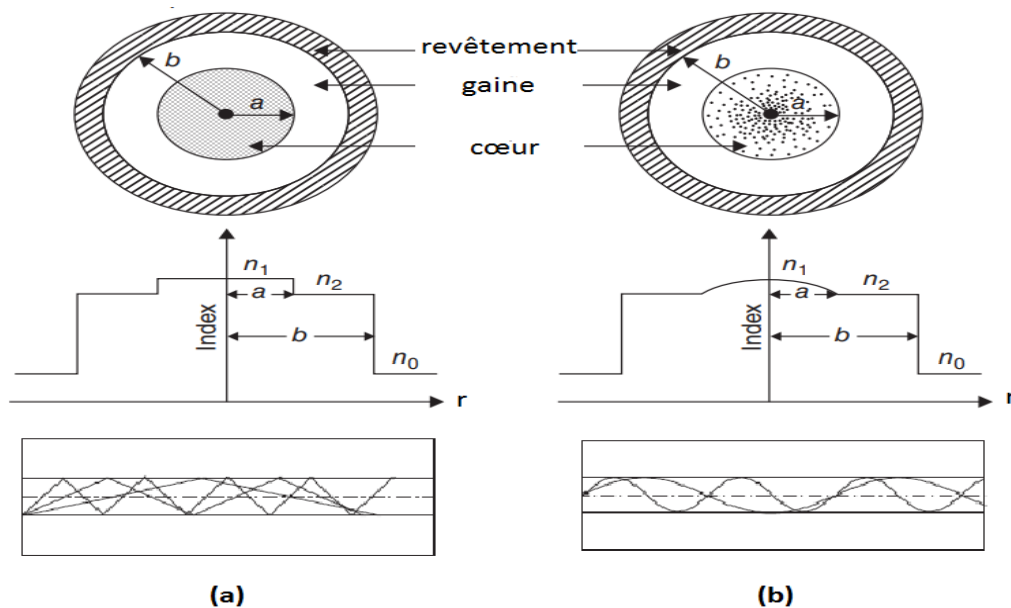


Figure I.5 Fibres multimodes a) fibre MMF à saut d'indice b) fibre MMF à gradient d'indice [10]

Selon la norme TIA-598C de l'association de l'industrie de télécommunications (TIA : Telecommunications Industry Association), il existe une distinction de la couleur du revêtement extérieur de la fibre selon son type, comme suit : l'enveloppe extérieure du câble monomode est de couleur jaune, et l'enveloppe extérieure du câble multimodes est de couleur orange.

Il est important à noter qu'il n'existe pas un type de fibre plus performant que d'autres, chaque type à ses propres avantages, tout dépendra de ce qui va le mieux convenir à chaque application [11] (voir le tableau I.1).

Tableau I.1 Caractéristiques des types de fibres optiques [11]

Type de fibre optique	Diamètre cœur/gaine (μm)	Atténuation dans la fibre (dB/km)			Largeur de la bande (MHz/km)
		850 nm	1300 nm	1550 nm	
Fibre multimodes à saut d'indice	200/240	6			50
	50/125	3	1		600
Fibre multimodes à gradient d'indice	62.5/125	3	1		500
	85/125	3	1		500
	100/140	3	1		300
Fibre monomode	8-12/125		0.36	0.2	illimitée

1.2.1.3 Effet de la Propagation de la lumière dans le support optique

Bien que la propagation sur fibre optique est considérée comme la manière la plus optimale de transporter les données à distance, mais il est à noter que cette propagation peut être affecté par différents effets qui peuvent détériorer la qualité du signal qui est supposé être reçue. On va donc rappeler les effets linéaires et non linéaires qui influent sur l'évolution de la propagation [12].

a. Limitation par les effets linéaires

Ces effets se manifestent lorsque la distance de propagation augmentent, ils y sont donc directement liés, ils peuvent soit avoir un impact négatif sur la puissance du signal, ce sera donc le phénomène d'atténuation, soit sur sa forme, on nommera ce phénomène la dispersion [12].

➤ Atténuation

L'atténuation dans une fibre optique (A) est un terme qui signifie l'affaiblissement, de manière exponentielle, du niveau de la puissance du signal transmis en fonction de la longueur de la fibre qui le transporte (L). Elle s'exprime en dB/km et elle est donnée par l'expression suivante [9-13] :

$$A_{(dB/km)} = - \frac{10}{L(Km)} \log \frac{P_s}{P_{in}} \quad (1.7)$$

Où P_{in} est la puissance du signal à l'entrée de la fibre, P_s est la puissance mesurée à sa sortie.

D'après la figure I.6, Il existe trois fenêtres utilisées : 850 nm, 1300 nm et 1550 nm , où chacune d'elles correspond à une zone du domaine des longueurs d'ondes optiques pour laquelle la fibre optique présente de faibles atténuations.

On observe, par exemple, autour de 1550 nm un minimum d'atténuation autour de 0.2 dB/Km, ce qui est révolutionnaire si on compare cette valeur à ceux des câbles électrique où les atténuations sont de l'ordre de 100 à 1000 dB/Km [13].

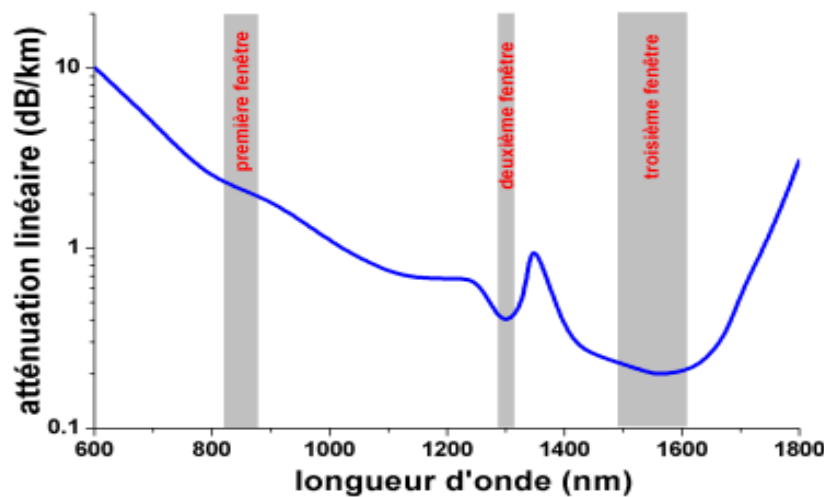


Figure I.6 Atténuation linéaire d'une fibre monomode en fonction de la longueur d'onde [13]

➤ Dispersion chromatique

Cet effet (D), exprimé en $ps/(nm.km)$, apparaît à cause de la variation de la vitesse de propagation des différentes composantes spectrales du signal de transmission, car, chaque impulsion de lumière est composée d'un nombre fini de longueurs d'onde qui se propagent de façon différente, ce qui en résulte que la dispersion chromatique provient de la variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde, et va causer un élargissement de l'impulsion à la sortie de la fibre (voir la figure I.7) ainsi que la limitation de la distance maximale sur laquelle le signal peut être acheminé mais aussi le débit de transmission (B) [9]. Cette distance appelée limite de dispersion est donnée par la relation suivante :

$$L_D \approx \frac{1}{2 B D \Delta \lambda} \quad (1.8)$$

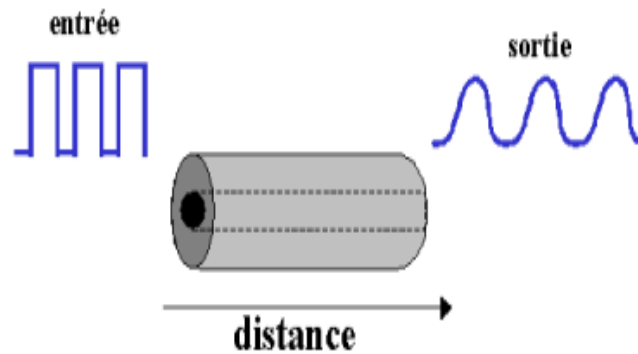


Figure I.7 L'effet de la dispersion chromatique sur un signal transmis le long d'une fibre optique [13]

➤ **Dispersion modale de polarisation (PMD)**

La dispersion de polarisation (ou *PMD : Polarisation Mode Dispersion*) est aussi une autre forme de dispersion qui va perturber la propagation dans une fibre optique, elle va donc causer un élargissement temporel d'une impulsion à la sortie de la fibre par le changement de l'état de polarisation du mode [14].

Il se peut que la fibre présente quelques défauts lors de sa fabrication en plus des contraintes mécaniques qu'elle va subir durant son installation. Ceci dit, ces événements peuvent provoquer ce qu'on appelle la biréfringence dans la fibre optique. De ce fait, on observera une levée de dégénérescence des constantes de propagation. Les 2 modes se propagent alors à des vitesses de groupe différentes, ce qui entraîne l'étalement ou l'élargissement de l'impulsion. Alors, on suppose avoir une fibre de longueur L qui présente une biréfringence constante, l'étalement de l'impulsion peut être estimé à partir du retard temporel $4T$ entre les deux composantes de polarisation pendant la propagation de l'impulsion, appelé le retard différentiel de groupe (*DGD : Differential Group Delay*) (voir la figure I.8) [14].

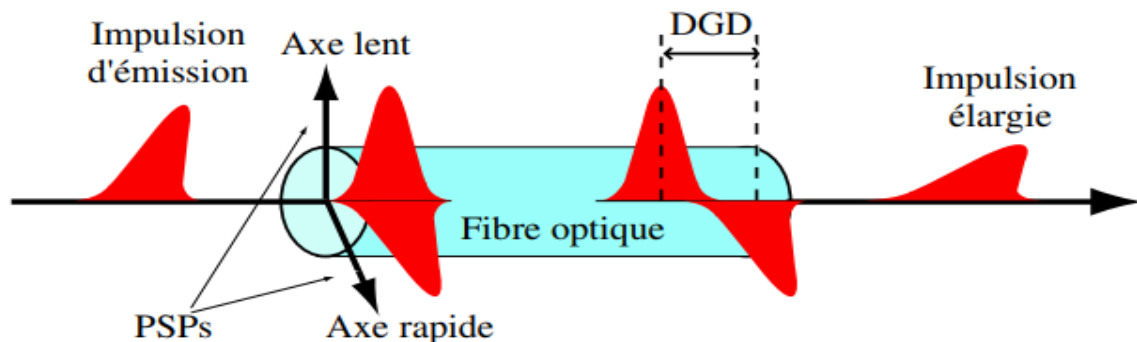


Figure I.8 L'effet de la dispersion modale de polarisation sur un signal transmis le long d'une fibre optique [14]

b. Limitation par les effets non-linéaires

Un milieu transparent traversé par un champ électromagnétique intense peut subir des changements dans ses propriétés sous l'effet de cette interaction. Ces modifications affectent non seulement l'onde lumineuse originale, mais également d'autres ondes présentes dans le même milieu, entraînant ce que l'on appelle des effets non linéaires. Ces altérations, qui s'accumulent au fil de la propagation, peuvent devenir particulièrement problématiques pour les communications à longue distance. En raison de sa structure, la silice est principalement sujette à des effets non linéaires du troisième ordre, tels que la génération de troisième harmonique, l'effet Kerr optique, le mélange à quatre ondes, ainsi que les diffusions stimulées Brillouin et Raman [13].

1.3 Chaîne de transmission optique

Après avoir décrypté le principe de la fibre optique ainsi que ces différentes propriétés, on va désormais explorer les deux blocs (émission et réception) installés aux extrémités du support optique comme indiqué dans la figure I.9.

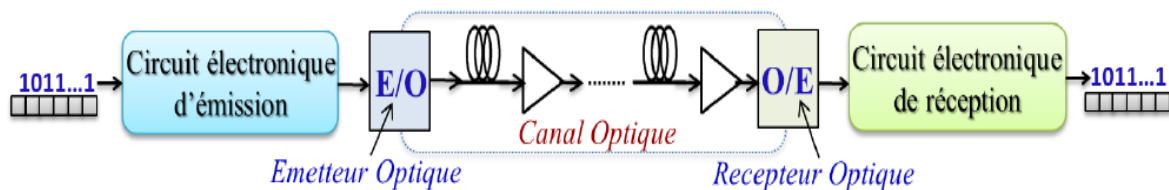


Figure I.9 Chaîne de transmission optique classique [15]

1.3.1 Bloc émetteur

Le rôle de ce bloc est de générer un signal adapté à la propagation le long de la fibre sur lequel les données utiles seront inscrites. Il comprend ainsi un ensemble de composants optoélectroniques notamment une source optique qui génère l'onde lumineuse ainsi que le système de modulation (voir figure I.10) [16].

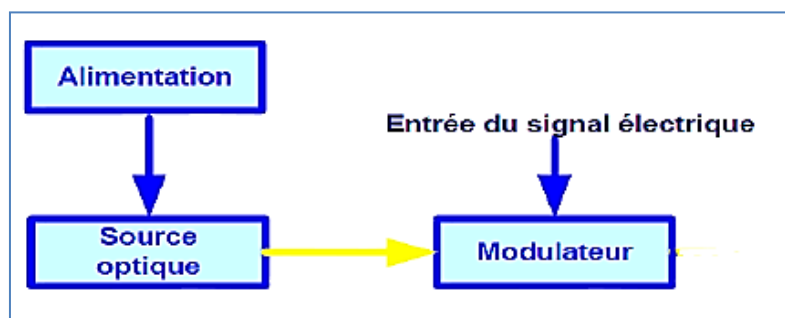


Figure I.10 Eléments constituant l'émetteur optique [16]

1.3.1.1 Génération du signal électrique

Le codage électrique sert à la production des signaux électriques. Une fois que la correction d'erreur avant codage (FEC : Forward Error Correction) a été appliquée à la série de bits, ces derniers sont associés à des symboles correspondant au format de modulation employé. Ces symboles, répartis de manière identique et indépendante, sont ensuite convertis en une forme d'impulsion pour créer une représentation échantillonnée contenant les mêmes informations [17]

Il existe, dans la transmission optique, plusieurs formes d'impulsion optique telles que la Duobinary (DB), Nyquist, Retour à zéro et retour à zéro à suppression de porteuse (CSRZ : Carrier Suppressed Return to Zero). On peut discernés les différents formats par des paramètres comme le profil d'intensité, le profil spectral, la durée T (équivalent à l'inverse du débit), la durée T_{FWHM} (Temps Pleine Largeur à Mi-Hauteur" (en anglais, Full Width at Half Maximum) et la largeur spectrale à 3 dB F_{FWHM} (Fréquence Pleine Largeur à Mi-Hauteur). Une fois le format adéquat est choisit, les données électriques sont désormais une succession de tensions de niveau haut ($+a$ Volt) et de niveau bas ($-a$ Volt) [17].

1.3.1.2 Source de lumière

En télécommunications optiques, le besoin des bandes passantes de plus en plus larges, nous a obligé de choisir des sources capables de fournir des spectres réduits telles que les diodes DL (DL : Diode Laser) et les diodes DEL (DEL : Diode Electroluminescente). Ces deux sources de lumière sont réalisées à partir de jonctions PN polarisées en direct où le principe d'émission est dû à la recombinaison des paires électrons-trou [18].

a. Diode DEL

La DEL ou diode électroluminescente (en anglais, LED : Light Emitting Diode) est un composant optoélectronique conçu à base de matériaux semi-conducteurs très efficace qui convertit l'énergie électrique en lumière, voir Figure I.11, capable d'émettre de la lumière lorsqu'elle est polarisée en direct. La lumière rayonnée est dans la plupart du temps polychromatique (constituée de plusieurs longueurs d'ondes) non cohérente et qui va dans tous les sens. Ce phénomène est dû à l'émission spontanée des photons. Il est à noter que cette source n'est adaptée qu'aux fibres multimodes [18].

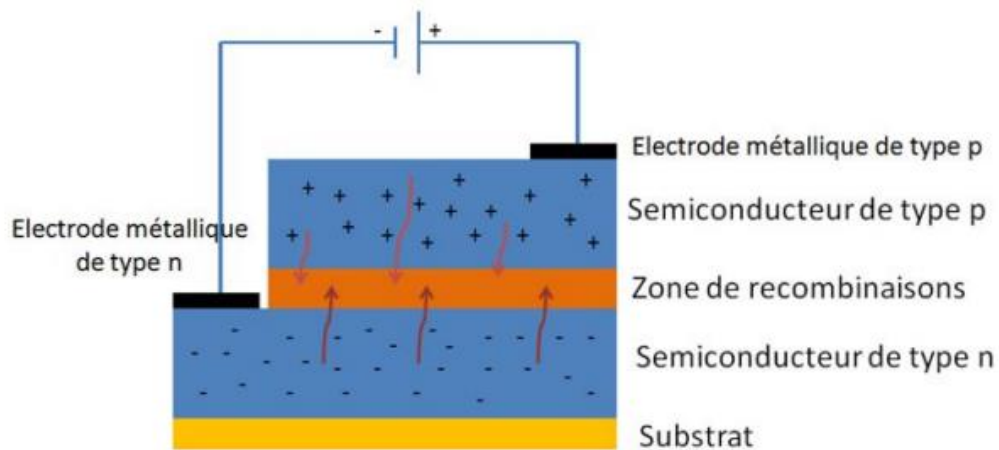


Figure I.11 Structure de base d'une diode DEL [19]

b. Diode LASER

Le LASER (LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) est un acronyme en anglais qui consiste à amplifier la lumière par émission stimulée de photons tout en produisant une lumière monochromatique (constituée d'une seule longueur d'onde), directionnelle, cohérente (les photons émis ont la même phase et la même polarisation, voir Figure I.12, et de haute intensité. Cette source est compatible à la fois avec les fibres monomodes et multimodes et il existe plusieurs types de laser, on peut citer les plus utilisés dans la communication optique : les lasers FP (Fabry-Perot), les DFB (distributed-feedback) et les VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser), ils sont dotés d'une faible consommation énergétique, une bonne qualité spectrale ainsi d'une longueur d'onde ajustable [19].

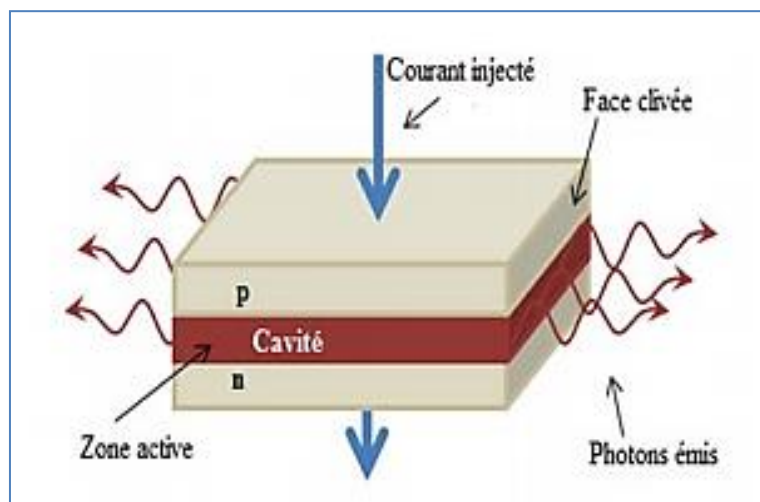


Figure I.12 Structure de base d'une diode LASER [19]

Le tableau I.2 met en évidence la différence entre les diodes DEL et diodes LASER afin de savoir concrètement quelle source de lumière utilisé selon l'application désirée.

Tableau I.2 Caractéristiques des diodes LED et LASER [20]

Type de diode	Diode LED	Diode LASER
Puissance optique	0.1 –0.5 mW	1 –10 mW
Longueur d'onde	850-1300 nm	1300 nm-1500 nm
Largeur spectrale	50 -150 nm	0.1 -0.5 nm
Débit max	Quelques centaines de Mbit/s	jusqu'à 10 Gbit/s
Types de fibre	MM	SM-MM

1.3.1.3 Modulateur optique

La phase de modulation optique c'est l'étape où les données doivent être inscrites sur une porteuse afin de se propager dans le canal de transmission. Un modulateur optique est donc un dispositif opto-électronique qui altère un signal lumineux grâce à une tension électrique de commande lorsqu'un faisceau continu est introduit à son entrée. Typiquement équipé d'au moins deux entrées et une sortie (figure I.13), ce dispositif opère sur les propriétés de la lumière, qui incluent son amplitude, sa phase, sa longueur d'onde et sa polarisation, car la lumière est une onde électromagnétique. En général, on agit sur l'amplitude et la phase pour la modulation, tandis que la longueur d'onde et la polarisation sont exploitées pour le multiplexage de différents signaux. Ainsi, pour réaliser la modulation, il est possible de modifier soit le coefficient d'absorption (qui influe sur l'amplitude) soit l'indice de réfraction du milieu de propagation (qui altère la phase), processus connu respectivement sous les termes de modulation par électro-absorption ou électro-réfraction [21].

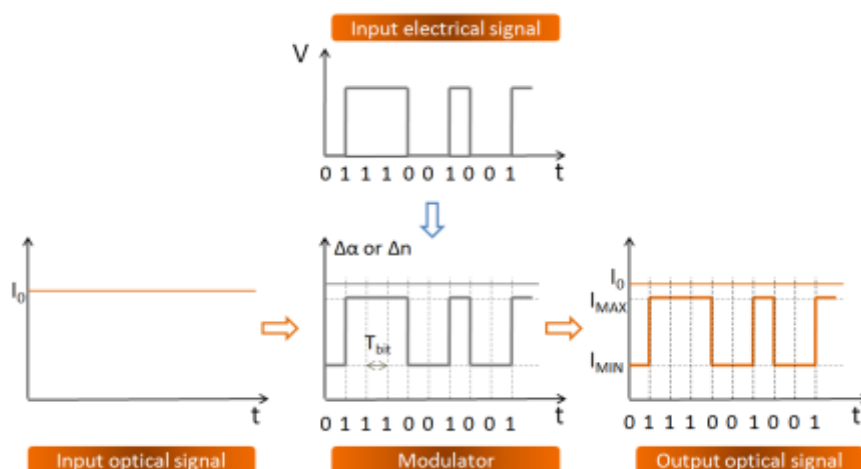


Figure I.13 Principe de modulation optique [21]

En réalité, il existe deux types de modulation optique : la modulation directe et la modulation externe [22] :

a. Modulation directe

La modulation directe est considérée comme une technique de modulation dit "classique". Elle est nommée ainsi grâce à la simplicité de cette opération. En effet, le courant injecté en entrée de la source de lumière (diode LASER) va être modulé directement (voir figure I.14)

Plus le courant délivré à l'entrée de la source est important, plus l'intensité lumineuse qu'elle produira sera puissante

Bien que cette méthode soit très intéressante, elle comporte, tout de même, quelques inconvénients [23] :

- ✓ La modulation d'amplitude du courant affecte en effet la fréquence du signal émis, ce phénomène est appelé « chirp » où bien modulation parasite qui va contribuer à l'élargissement de l'impulsion optique
- ✓ Elle est limitée en termes de bande passante (quelques GHz seulement).

C'est pour ces raisons, cette technique n'est plus très utilisée, au profit de la modulation externe.

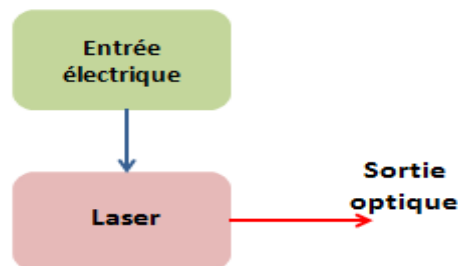


Figure I.14 Bloc-descriptif d'un émetteur optique avec une modulation directe [23]

b. Modulation externe

Cette méthode de modulation est très privilégiée pour les télécommunications à haut débit sur de longues distances, car elle a le pouvoir de limiter l'effet du « chirp ». La modulation externe repose sur l'ajout d'un autre composant optoélectronique appelé modulateur externe (voir figure I.15) qui a pour tâche de changer l'un des paramètres de l'onde lumineuse [24].

La porteuse optique, émis par la source lumineuse fonctionnant à courant constant, subit très peu de dégradation. Lors de sa transmission à travers le modulateur, elle est modulée par les

données utiles associées au signal électrique. Ce dernier peut changer l'indice optique du matériau du modulateur et par suite son facteur de transmission. Ce qui permet d'obtenir une bande passante plus importante que dans le cas de la modulation directe [25].

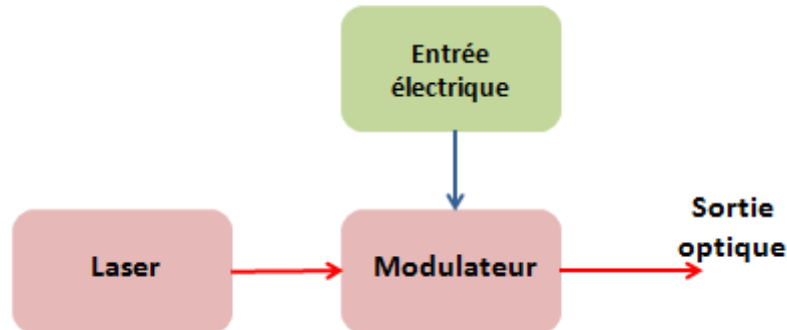


Figure I.15 Bloc-descriptif d'un émetteur optique avec une modulation externe [23]

En pratique, deux types de modulateurs externe se distinguent : le modulateur Mach-Zehnder (MZM) et le modulateur à électro-absorption (EAM)

✓ Interféromètres de Mach Zehnder (MZM)

Il est considéré comme l'un des modulateurs optiques les plus populaires. Connu sous le nom du modulateur électro-optique, utilisé pour générer des signaux soit à double bandes latérale (DSB : Double Side Band) soit à bande latérale unique (SSB : Single Side Band) [26].

Dans un modulateur MZM, la variation de la tension correspondante au signal radio modifie la phase de l'onde qui se propage dans l'un des bras ou bien dans les deux bras de l'interféromètre Mach-Zehnder (voir figure I.16). Ce déphasage va influencer sur l'amplitude du signal optique modulé par effet d'interférences constructives et *destructives*. De ce fait, le modulateur MZM est utilisé pour contrôler à la fois la phase et l'amplitude d'un signal optique [26].

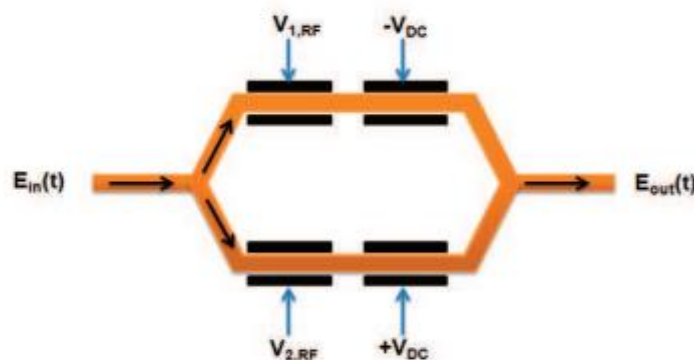


Figure I.16 Schéma d'un modulateur électro-optique de type Mach-Zehnder [23]

On peut trouver deux types de modulateurs MZM, ceux à seul bras, et d'autres à deux bras équivalents à deux paires d'électrodes jouant le rôle d'entrées électriques, nommé DD-MZM (Dual Drive MZM). Ce dernier est fabriqué en utilisant un matériau diélectrique connu sous le nom de Niobate de Lithium (LiNbO_3) assurant ainsi une limitation de l'effet de la dispersion chromatique grâce au format de modulation BLU (BLU : Bande Latérale Unique) [27].

✓ **Modulateur à électro-absorption (EAM)**

Le modulateur électro-absorption à semi-conducteurs (EAM) est constitué d'un guide d'ondes planaire comprenant une couche dopée p superposée à une couche dopée n, formant ainsi une jonction p-n. Son fonctionnement repose sur le principe de l'effet Franz-Keldysh, où la largeur de la bande interdite effective du semi-conducteur diminue avec l'intensification du champ électrique (voir figure I.17).

En l'absence de tension de polarisation sur la jonction p-n, la bande interdite de la zone active est suffisamment large pour permettre le passage de la lumière laser à sa longueur d'onde. Toutefois, lorsque qu'une polarisation inverse d'une ampleur suffisante est appliquée à la jonction p-n, la largeur de la bande interdite effective diminue au point où la zone active commence à absorber la lumière laser, devenant ainsi opaque.

Dans les modulateurs à électro-absorption, la zone active est généralement structurée sous forme de puits quantiques multiples (MQWs : Multiple Quantum Wells), offrant ainsi une absorption plus prononcée en fonction du champ électrique (connue sous le nom d'effet Stark confiné quantiquement) [23].

Dans ce cas, la tension qu'on applique à ce modulateur modifie la transparence du matériau, par conséquent, le signal optique sera modulé en amplitude. Néanmoins, cette technique introduit de fortes pertes optiques de l'ordre de 10 à 20 dB. Un autre inconvénient est qu'on a incapable de générer une modulation à bande latérale unique optique avec ce composant, ce qui s'avère gênant lorsque les porteuses RF (Radiofréquence) sont très élevées (> 10 GHz) [27].

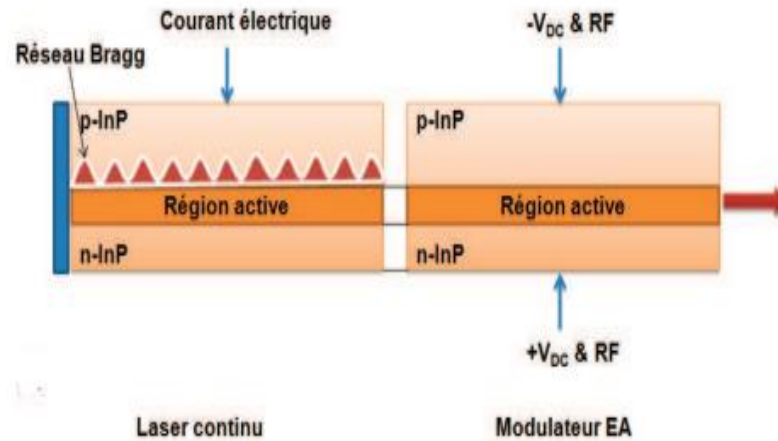


Figure I.17 Schéma d'un modulateur à électro-absorption (EAM) [23]

1.3.2 Bloc récepteur

Après avoir introduit le bloc émetteur ainsi que le support de transmission optique, le temps est venu pour aborder le bloc récepteur, illustré sur la figure I.18, dans lequel on exécutera les opérations inverses à celles appliquées à l'émission dans le but de retrouver les bits d'information transmis. On s'intéressera dans cette section, en particulier, aux photodiodes.

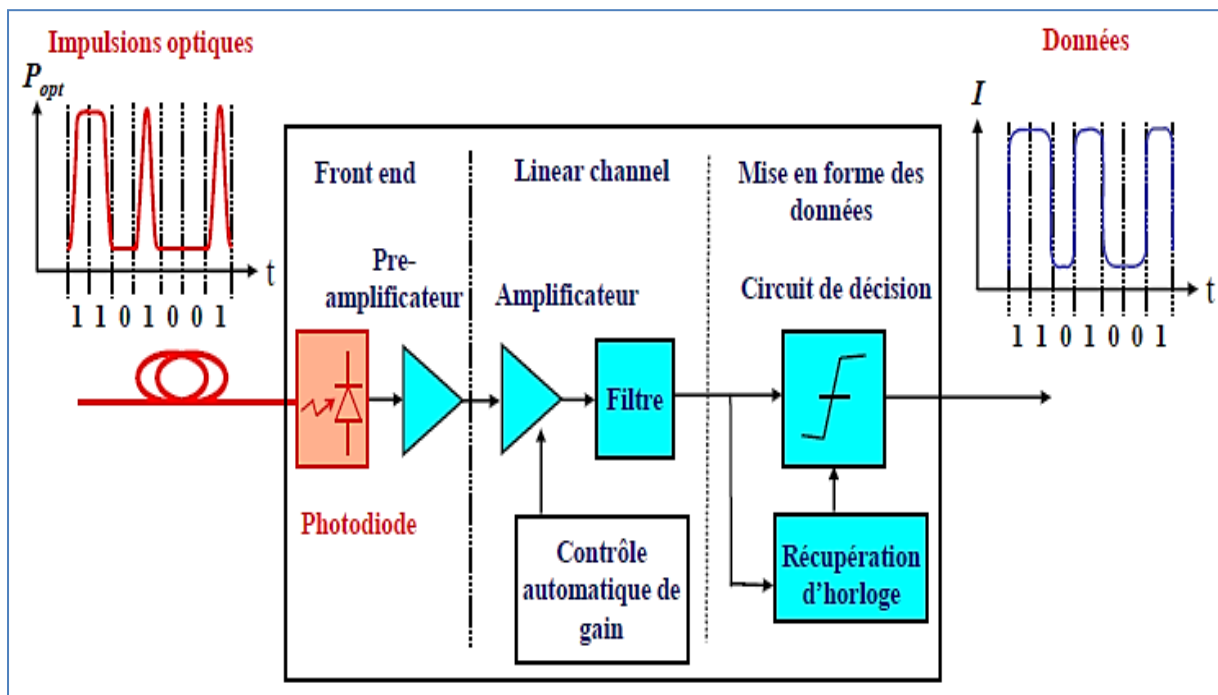


Figure I.18 Schéma du bloc récepteur optique [28]

1.3.2.1 Photodétecteurs

L'élément récepteur du signal optique est le photodétecteur qui est, d'ailleurs, l'un des éléments cruciaux qui influent sur la performance globale du système. Sa fonction est de convertir le

signal optique reçu en un signal électrique, qui est ensuite amplifié avant un traitement ultérieur. Ceci implique que la performance du système est déterminée à son niveau. C'est ainsi que en ayant un photodétecteur performant, moins de stations de répéteurs seront installées ce qui réduit à la fois les coûts d'investissement et de maintenance. Le rôle joué par le détecteur exige qu'il satisfasse des exigences très strictes en matière de performance et de compatibilité. Les critères suivants définissent les exigences importantes en matière de performance et de compatibilité pour les détecteurs, qui sont généralement similaires à celles des sources [28], tels que :

- **Rendement quantique**

Le rendement quantique ou QE (QE : Quantum Efficiency), en anglais, une mesure effectuée pour quantifier la quantité du flux de porteurs de charges (courant électrique) à partir du flux des photons collectés (lumière) [28]. Ce rendement dépend de la longueur d'onde du rayonnement et des paramètres de construction du composant et il est souvent exprimé par η [28]:

$$\eta = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{P_{opt}}{h\nu} \quad (1.9)$$

Avec :

I_p : Le photocourant ;

q : La charge de l'électron égale à $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C.;

h : La constante de Planck égale à $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s ;

ν : La fréquence du photon correspondante à la longueur d'onde λ ;

P_{opt} : La puissance optique absorbée, exprimée par (1.10):

$$P_{opt} = \Phi_{opt} \cdot E \cdot S \quad (1.10)$$

Où :

Φ_{opt} : Le flux des photons incidents ;

E : L'énergie des porteurs ;

S : La surface active du composant.

- **Sensibilité spectrale**

Les photorécepteurs (comme l'œil) sont sensibles dans une certaine gamme spectrale. A l'intérieur de cette gamme, ils ne sont pas sensibles de la même façon à toutes les longueurs d'onde. C'est ce que représente la sensibilité spectrale (donnée en Ampère/Watt). La sensibilité spectrale $\mathcal{R}$ n'est autre que le photocourant généré par unité de puissance optique absorbée pour une longueur d'onde donnée [28], d'où :

$$\mathcal{R} = I_p / P_{opt} = \frac{\eta \cdot q}{h \cdot \nu} \quad (I.11)$$

- **Courant d'obscurité**

Lorsque le photodétecteur ne reçoit pas de signal optique, il génère un courant dit courant d'obscurité I_{obs} . Ce dernier est le courant électrique résiduel d'un photodétecteur en l'absence d'éclairement lumineux. C'est le cas d'une photodiode PIN polarisée en inverse (absence du signal optique) [28].

Les deux types de photodétecteurs utilisés en systèmes à fibre optique sont la diode PIN (PIN : Positive Intrinsic Negative) et la photodiode à avalanche (APD : Avalanche Photodetector Diode) :

- **Photodétecteur PIN**

La photodiode PIN n'est autre qu'une diode ayant une large zone intrinsèque I (zone soit très faiblement dopée soit non dopée) comprise entre les zones P et N d'où la nomination PIN [29].

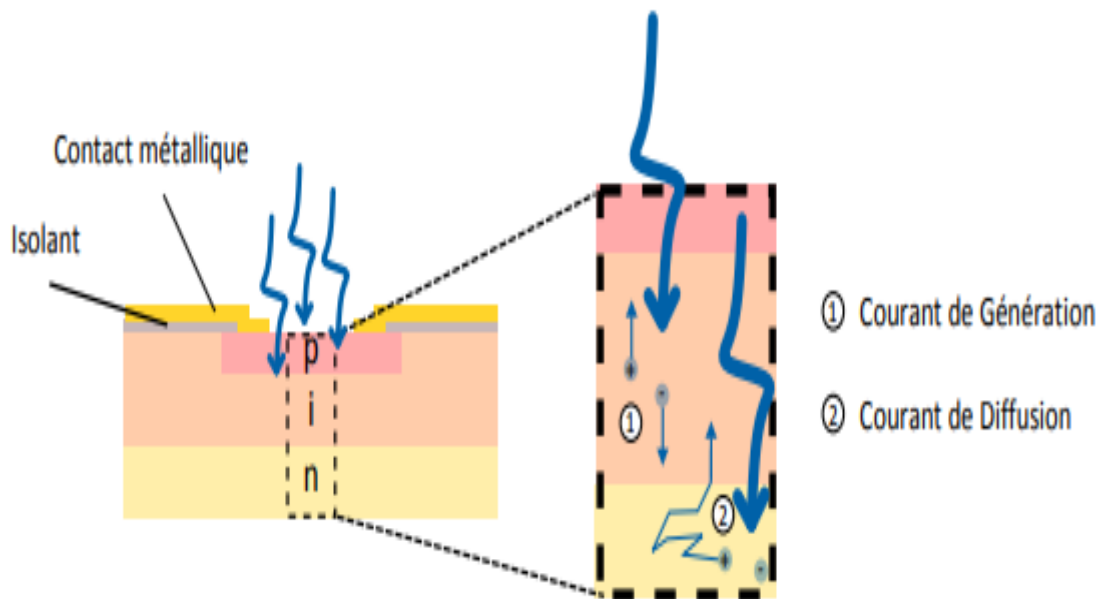


Figure I.19 Photodiode PIN [30]

De plus, la région I correspond à une augmentation artificielle de la zone de charge d'espace et elle est généralement large de sorte que les photons qui pénètrent dans le composant ont une plus grande probabilité d'absorption dans la région intrinsèque, plutôt que dans les régions P et N [29].

La photodiode PIN fonctionne en polarisation inverse. En effet, comme la région Intrinsèque I n'a pas de charges libres, sa résistance est élevée et donc la tension aux bornes de la diode apparaît aux bornes de la région I. ainsi, pour une polarisation inverse suffisante, un champ électrique important règne dans toute la zone intrinsèque et les porteurs sont propulsés vers la région où ils sont majoritaires et atteignent vite une vitesse limite. Le déplacement de ces porteurs est à l'origine du photocourant. On a ainsi une photodiode qui est rapide et très sensible [29].

• Photodétecteur APD

La conception d'une photodiode à avalanche se base sur une structure PIN, à laquelle on applique une polarisation inverse proche à la tension de claquage. Son principe de fonctionnement se repose sur l'effet d'avalanche qui va faire multiplier le nombre de photos porteurs créés dans la zone de charge d'espace, ce processus est illustré dans la figure I.20 [29].

Ce genre de photodiodes est considéré comme un dispositif attractif car il bénéficie d'un gain interne dû à la multiplication des porteurs générés par l'absorption de la lumière incidente. En effet, lorsque ces porteurs traversent une région où règne un champ électrique élevé ($> 10^5$ V/cm), ils peuvent acquérir une énergie suffisante pour ioniser les atomes du réseau cristallin créant ainsi de nouvelles paires électron-trou qui immédiatement dissociées, pourront à leur tour créer d'autres paires électron-trou, entraînant une amplification du photocourant primaire [29].

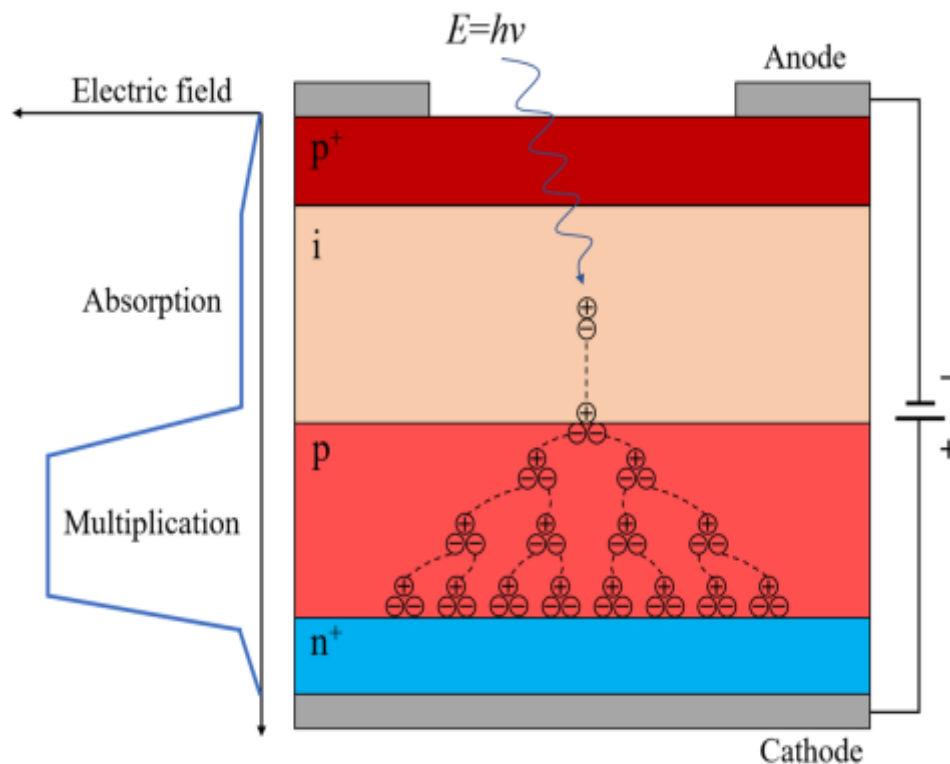


Figure I.20 Principe d'une photodiode à avalanche [31]

1.4 Critères d'évaluation d'une transmission

Dés que le système optique est installé et mis en place, Il s'avère nécessaire d'établir des critères pour juger ses performances car le signal optique peut subir des dégradations lors de son transport via la fibre optique, tel qu'il a été décrit précédemment. En pratique, ces critères sont les suivants :

1.4.1 Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est un moyen de visualiser la qualité du signal électrique après la détection faite par la photodiode et cela se fait en termes de bruit d'amplitude, d'interférences inter symboles ou de gigue temporelles. Il repose sur le principe de la superposition de tous les symboles binaires qui constituent la séquence transmise dans le domaine temporel, en d'autres termes il permet de constater la dégradation de chaque symbole sur le même graphique. Le constat d'une bonne ou mauvaise qualité de transmission se base sur à quel point l'œil est ouvert où bien fermé, plus précisément, 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 qu'il est impossible de distinguer entre les deux niveaux, nous parlerons, dans ce cas, d'un œil fermé soit horizontalement ou verticalement [12].

La figure I.21 illustre le Principe d'un diagramme de l'œil où (A) c'est l'ouverture verticale, (W) c'est l'ouverture horizontale de l'œil, et (J) c'est la gigue de phase.

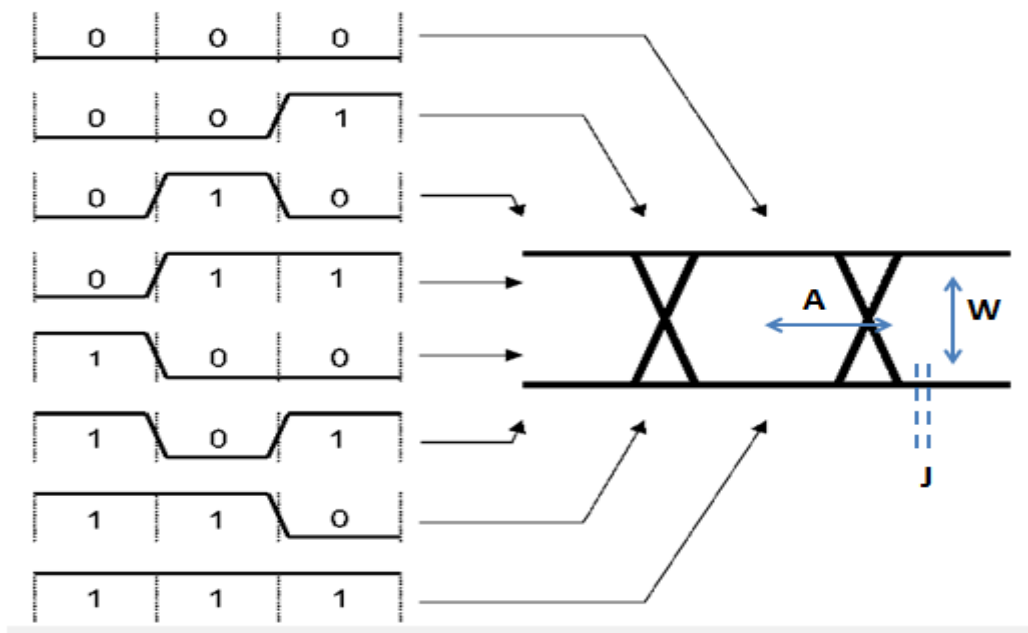


Figure I.21 Principe de constitution d'un diagramme de l'œil [12]

1.4.2 Taux d'erreur binaire

Le critère le plus intuitif permettant d'évaluer la qualité du signal transmis est celui du TEB : taux d'erreur binaire, BER en anglais : Bit Error Rate, puisque qu'il est connu que la transmission des données se fait d'une façon numérique, c'est-à-dire sous forme de séquences de données binaires [12].

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

$$\text{BER} = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (1.12)$$

1.4.3 Facteur de qualité

Le facteur Q, ou facteur de qualité, est un autre critère de qualité d'un signal optique. Il est obtenu à partir des statistiques de bruit (moyennes et écarts-types) des niveaux « 1 » et « 0 » du signal à détecter [12], définit comme suit :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1.13)$$

Où I_1 et I_0 sont respectivement les valeurs moyennes des niveaux « 1 » et « 0 », σ_1 et σ_0 les racines carrées des variances des densités de probabilité des symboles « 1 » et « 0 ».

1.4.4 Bilan énergétique de la liaison

Le calcul du budget optique d'une liaison consiste à évaluer les pertes totales entre l'émetteur et le récepteur, tout en s'assurant que la puissance reçue est suffisante pour garantir une transmission fiable. Le budget optique peut être déterminé en additionnant les pertes liées à chaque composant de la chaîne optique : les pertes dues aux connecteurs, aux épissures et à la fibre elle-même. La puissance de sortie de l'émetteur est d'abord mesurée, puis les pertes successives sont retranchées pour arriver à la puissance reçue. Enfin, il est essentiel de comparer cette puissance reçue à la sensibilité du récepteur. Si la marge (différence entre la puissance reçue et la sensibilité minimale) est positive, la liaison est fonctionnelle. Sinon, des ajustements, tels que l'utilisation d'amplificateurs optiques ou de composants de meilleure qualité, doivent être envisagés [32].

1.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter une vue générale sur les systèmes de communication optiques. Au début, nous avons commencé par introduire les principaux éléments constituant une simple chaîne de communication par voie optique à savoir l'émetteur, le support de transmission et

le récepteur. Nous avons aussi passé en revue sur les composants essentiels à tous systèmes optiques et qui permettent la conversion électrique/optique (diode LASER et diode LED), la conversion optique/électrique (photodiodes PIN et APD) et la modulation du signal (modulateurs MZM). Finalement, nous avons dressé les critères qui peuvent décrire la qualité et les performances des chaînes de transmission optiques.

Chapitre 2 : Dispositifs optiques et réseaux FTTx

Dispositifs optiques et réseaux FTTx

2.1 Introduction

Ce chapitre va aborder, d'une manière simple et efficace, la composition des réseaux optiques tout en décrivant la quasi-totalité des équipements nécessaires à leur conception. Ces équipements auront le rôle de multiplexer, de diviser, de diriger et de protéger la lumière transportant les données au sein des réseaux optiques en question. La seconde section du chapitre va concerner une catégorie spécifique des réseaux optiques : les réseaux FTTx.

2.2 Dispositifs optiques pour les réseaux haut débit

Pour qu'un réseau optique fonctionne correctement et pour qu'il soit rentable, un ensemble d'équipements doit être parfaitement installé, ces dispositifs sont divisés en deux sous catégories : les dispositifs actifs et les dispositifs passifs.

2.2.1 Dispositifs optiques actifs

Les dispositifs optiques actifs sont des composants qui nécessitent une alimentation électrique afin de pouvoir correctement accomplir leurs tâches dans le réseau optique où ils sont déployés.

Les fibres optiques ; les Lasers, les photodiodes et les modulateurs sont des dispositifs actifs qu'on a déjà évoqué lors du précédent chapitre. Cependant, il existe d'autres dispositifs qui appartiennent à cette catégorie, on peut citer :

a) Les amplificateurs optiques

Bien que la transmission par fibre optique est considérée comme étant un support très efficace et robuste, une légère dégradation de la puissance du signal est tout de même signalée et elle doit être récupérée afin d'augmenter la portée de la transmission. Ceci est rendu possible grâce aux amplificateurs optiques qui, sans avoir recours à la conversion optique-électrique et électrique-optique, peuvent avoir un principe de fonctionnement qui se base soit sur l'utilisation de différents aspects physiques tout comme l'amplification par effet Raman, basée sur le principe de la diffusion Raman dans la fibre optique là où le milieu amplificateur est la fibre elle-même soit ceux basés sur des fibres dopées grâce à des ions de terres rares. On citera le très populaire amplificateur à fibre dopée à l'erbium EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) qui amplifie dans la bande C et/ou la bande L. L'amplification d'un signal optique peut également se faire grâce à une structure semi-conductrice,

dans ce cas la on parle donc d'Amplificateur optique à semi-conducteur SOA (Semiconductor Optical Amplifier) [33].

- **Amplificateur à fibre dopée à l'erbium EDFA**

Pour comprendre comment marche cet amplificateur, il va falloir introduire la notion de l'Erbium : c'est un composant chimique qui va réagir au contact des signaux de longueur d'onde de 800, 980 et 1480 nm ce qui va dégager l'énergie qu'il faut pour l'amplification. Par conséquent, L'idée de cet amplificateur repose sur une fibre optique d'une dizaine de mètre dopé en ion Erbium sur une certaine distance. Puis, à l'aide d'un coupleur, on introduira dans la fibre un signal pompe avec une des longueurs spécifiques à l'excitation des ions erbium. Une énergie photonique va donc être dégagée Lorsque qu'un contact entre ce signal et les ions sera fait. Cet amplificateur offre un excellent avantage qui consiste à ce que l'énergie dégagée par la réaction chimique va impérativement amplifier tous les canaux qui constituent la fibre ce qui le rend l'amplificateur le plus utilisé avec une puissance du signal à sa sortie qui peut être 50 fois plus élevée qu'à son entrée [33].

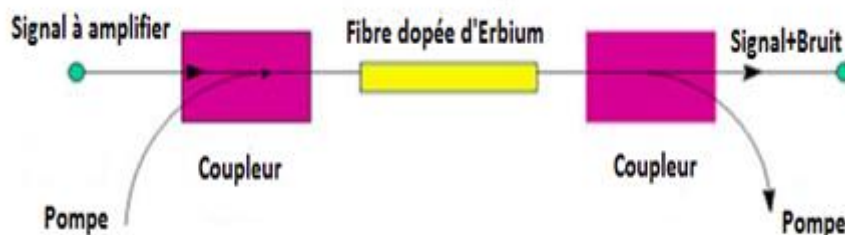


Figure II.1 Principe de l'amplificateur EDFA [33]

- **Amplificateur optique à semi-conducteur SOA**

Dans les systèmes photoniques couplés dans une fibre optique, Les amplificateurs optiques SOA sont considérés comme des éléments clés pour la compensation de l'atténuation.

Leur principe repose sur l'émission stimulée de photons, tout en étant alimenté par un courant électrique. On qualifiera une réelle amplification de la lumière qui traverse ce dispositif lorsqu'un maximum d'électrons soit dans un état excité plutôt que dans un état de repos. Cet inversement de population est réalisé en appliquant un courant à une jonction P-N du semi-conducteur, excitant ainsi les électrons et les trous ce qui va créer une condition où plus d'électrons peuvent émettre des photons qu'en absorber [34].

Les amplificateurs (SOA) modernes utilisent une jonction à double hétéro-structure, où une couche active est encadrée par deux couches de semi-conducteurs avec une bande interdite plus

large. Cette structure particulière permet de confiner à la fois les porteurs libres et les photons, permettant une inversion de population sur toute l'épaisseur de la couche active. Ils offrent une amplification beaucoup moins puissante que celle des amplificateurs EDFA ce qui implique leur application dans des liaisons optiques courtes telles que les réseaux métropolitains (MAN : Metropolitan Area Network) [34].

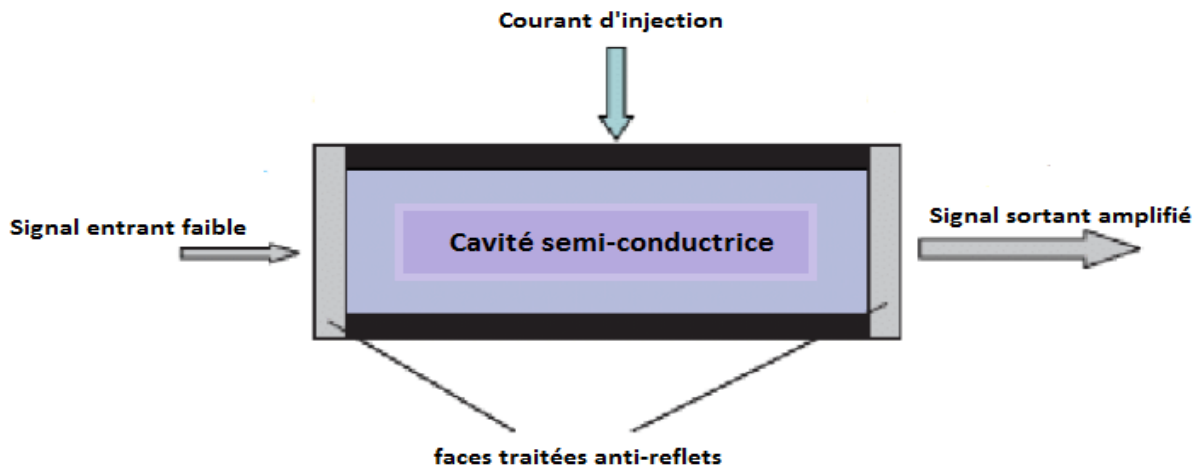


Figure II.2 Configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur [35]

- **Amplificateur à effet Raman**

L'utilisation constructive de l'effet Raman dans la fibre pour l'amplification est un des plus récents et intéressants développements dans le domaine d'optique. L'amplificateur basé sur cet effet utilise les propriétés intrinsèques des fibres de verre pour obtenir l'amplification des signaux. Ceci se traduit par l'utilisation de la fibre (un milieu de gain) pour minimiser ces atténuations; Ce type d'amplification dépend essentiellement de la puissance de la pompe et de la différence en fréquence séparant la longueur d'onde de la pompe de celle des signaux.

Les amplificateurs Raman constituent l'un des développements les plus récents et intéressants dans le domaine de l'optique fibrée. Leur fonctionnement repose sur l'utilisation constructive de l'effet Raman stimulé intrinsèque aux fibres de verre pour amplifier les signaux optiques. Contrairement aux amplificateurs à fibre dopée qui utilisent un milieu de gain externe, les amplificateurs Raman exploitent directement les propriétés de la fibre de transmission elle-même comme milieu à gain, permettant ainsi de minimiser les pertes.

Ce type d'amplification par effet Raman dépend essentiellement de la puissance du ou des lasers de pompe et de la différence en fréquence entre la longueur d'onde de pompe et celle des signaux à amplifier. Leur grande flexibilité provient du fait que la longueur d'onde de travail

n'est déterminée que par le choix de la longueur d'onde du laser de pompe, ce qui les rend bien plus flexibles que les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium. Une amplification Raman sur une large bande spectrale peut être obtenue en combinant plusieurs lasers de pompe à longueurs d'onde différentes multiplexés. De plus, on peut optimiser les longueurs d'onde et puissances de ces différents lasers de pompe pour contrôler la platitude du gain dans la bande amplifiée [4].

D'autres propriétés concernant les trois catégories d'amplificateurs cités ci-dessus, seront dressées dans le tableau qui suit, ce qui va nous permettre de comprendre qu'il n'y a pas une technologie plus meilleur que d'autres, il suffit juste de faire le bon choix lors d'une quelconque implémentation du réseau optique car chaque réseau à ses propres caractéristiques, paramètres et exigences [4].

Tableau II.1 Propriétés de différents amplificateurs [4]

Propriétés	EDFA	SOA	RAMAN
Gain (dB)	> 40	> 30	> 25
Longueur d'onde (nm)	1530 – 1560	1280 – 1650	1280 – 1650
Bande passante (3 dB)	30 – 60	60	Dépend de la pompe
Saturation maximale (dBm)	22	18	$0.75 * pompe$
Puissance de pompage	25 dBm	< 400mA	> 30 dBm
Coût	Moyen	Bas	Elevé

b) Les commutateurs optiques

Les commutateurs optiques contribuent à la gestion des réseaux de fibres optiques en offrant des solution de routage et d'interconnexion des signaux optiques, tout en préservant leur intégrité et par conséquent optimisés les performances du réseau en question. En réalité, c'est une passerelle réseau à multi-ports ($1*N$ ou $N*N$) qui connecte plusieurs fibres optiques entre elles et contrôle le routage des paquets de données entre les entrées et les sorties [36].

Il existe en réalité deux types de commutateurs optiques, qu'il s'agisse de commutateurs optoélectroniques, qui passent par une étape de conversion électrique, ou de commutateurs tout-optiques (Figure II.3) comme les systèmes MEMS (MicroElectroMechanical Systems), les dispositifs à cristaux liquides ou à guides d'ondes, ces technologies offrent des fonctionnalités cruciales telles que la redirection de canaux, la protection du réseau et l'équilibrage de charge [36].

Si on prend l'exemple des commutateurs MEMS, ils utilisent des éléments mécaniques miniaturisés pour rediriger les signaux lumineux dans les réseaux optiques. Typiquement, ils fonctionnent en ajustant physiquement la position de micro-miroirs, de prismes ou de guides d'ondes (grâce à un courant électrique) pour changer le chemin de la lumière. Cette manipulation permet de commuter les signaux optiques d'une fibre à une autre sans conversion en signaux électriques, ce qui réduit la latence et préserve la qualité du signal. Les commutateurs optiques MEMS offrent des avantages tels qu'une faible perte d'insertion, une diaphonie minimale, une indépendance à la longueur d'onde et une consommation d'énergie réduite [36].

Dans les réseaux WDM (WDM : Wavelength Division Multiplexing), par exemple, ils jouent un rôle central dans la gestion du trafic, l'évolutivité et la flexibilité, tout en apportant des avantages significatifs en termes de vitesse, d'efficacité énergétique et d'adaptabilité, faisant des commutateurs optiques un élément indispensable diverses applications dans les télécommunications et les réseaux de données [37].

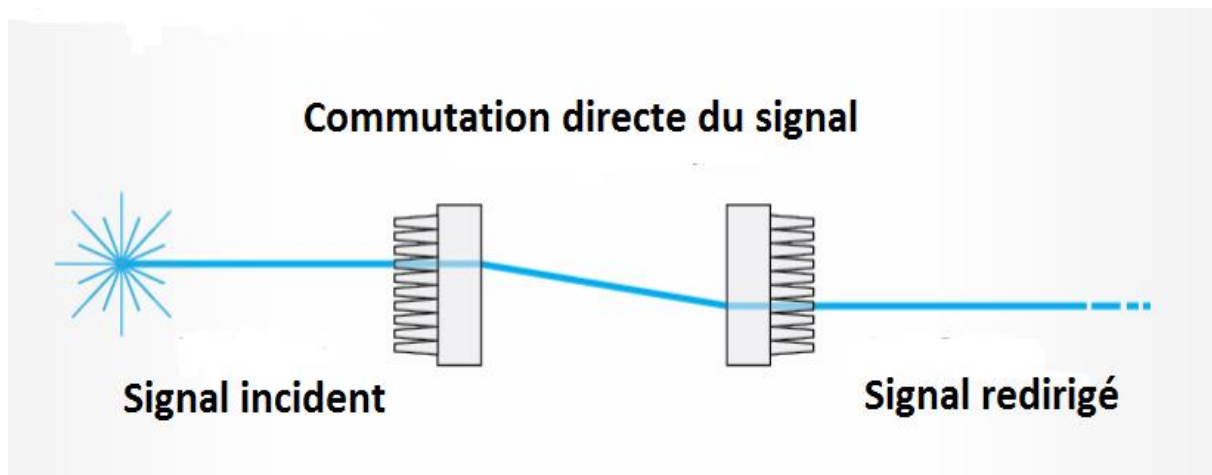


Figure II.3 Description d'une commutation directe du signal [37]

2.2.1 Dispositifs optiques passifs

Cette section concerne les dispositifs optiques qui opèrent dans le réseau optique sans le besoin d'une quelconque alimentation électrique, ce qui va donner un avantage sur le coût d'installation et de maintenance des réseaux.

Dans le chapitre précédent, on a déjà décrit un des dispositifs passifs : la fibre optique, le médium de transmission principal dans un PON, qui transporte les signaux optiques

a) Les Coupleurs optiques

Nombreuses sont les applications qui demandent l'intervention des coupleurs optiques au sein du réseau (tels que les systèmes de distribution d'information par fibre optique, les réseaux locaux (LAN : Local Area Network), les réseaux informatiques et les réseaux d'accès télécoms), c'est en effet une sorte d'embranchement multi-fibres qui permet de distribuer, combiner ou diviser la puissance lumineuse (voir Figure II.4) [38].

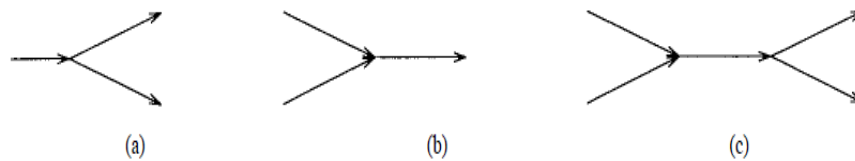


Figure II.4 Les fonctions d'un coupleur optique : a) diviser b) combiner c) coupler [38]

Il existe deux technologies de coupleurs (illustré dans la Figure II.5) : la méthode conique biconique appelée en anglais Fused Biconical Tapered (FBT) et la méthode à circuit d'onde planaire appelée en anglais Planar Lightwave Circuit (PLC) :

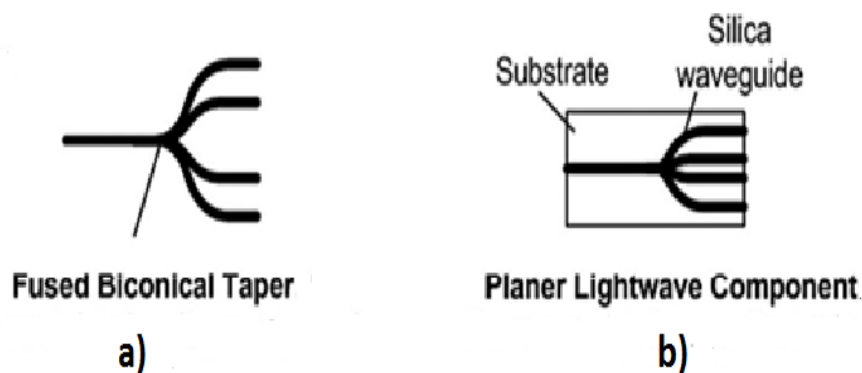


Figure II.5 Les technologies de conception des coupleurs optiques : a) FBT b) PLC [38]

Les coupleurs FBT sont fabriqués en fusionnant et en étirant deux fibres optiques ou plus. Ce processus crée une région où les cœurs des fibres sont suffisamment proches pour permettre le couplage des modes optiques. Les caractéristiques clés des coupleurs FBT incluent [39] :

- a. Fabrication : La fusion est réalisée en chauffant localement les fibres (souvent avec une flamme ou un arc électrique) tout en les étirant pour réduire leur diamètre. Cette technique permet un contrôle précis du ratio de couplage.

- b. Performance optique : Les coupleurs FBT présentent généralement de faibles pertes d'insertion et une bonne uniformité entre les ports. Ils peuvent atteindre des ratios de couplage allant de 50:50 à des ratios très asymétriques.
- c. Dépendance à la longueur d'onde : Les coupleurs FBT ont une réponse spectrale qui varie avec la longueur d'onde, ce qui peut être soit un avantage (pour le multiplexage en longueur d'onde), soit un inconvénient (pour les applications large bande).
- d. Stabilité environnementale : Bien que robustes, les coupleurs FBT peuvent être sensibles aux variations de température et aux contraintes mécaniques en raison de leur structure effilée.

Les coupleurs PLC sont basés sur la technologie des circuits optiques intégrés, où les guides d'ondes sont fabriqués sur un substrat plan, généralement en silice sur silicium. Les aspects importants des coupleurs PLC sont [39]:

- a. Fabrication : Les guides d'ondes sont créés par des techniques de photolithographie et de gravure, similaires à celles utilisées dans l'industrie des semi-conducteurs. Cette approche permet une production en masse et une bonne reproductibilité.
- b. Design flexible : La technologie PLC permet la conception de structures complexes intégrant plusieurs fonctions sur une même puce, comme le couplage, le multiplexage et la commutation.
- c. Performance optique : Les coupleurs PLC offrent une excellente uniformité entre les ports et des pertes d'insertion faibles. Ils peuvent facilement réaliser des configurations à plusieurs ports (1xN, NxN).
- d. Indépendance à la longueur d'onde : Contrairement aux FBT, les coupleurs PLC ont généralement une réponse plus plate sur une large bande spectrale, ce qui les rend adaptés aux systèmes WDM.
- e. Stabilité : Les coupleurs PLC sont moins sensibles aux variations environnementales que les FBT, grâce à leur structure monolithique.
- f. Intégration : La possibilité d'intégrer d'autres composants optiques (AWG, VOA, etc.) sur la même puce est un avantage majeur des PLC.

Comparaison et applications :

Les coupleurs FBT sont souvent préférés pour leur simplicité, leur coût relativement bas et leurs excellentes performances dans des applications spécifiques comme les capteurs à fibre optique.

Les coupleurs PLC sont plus adaptés aux systèmes complexes nécessitant une haute densité d'intégration, une stabilité élevée et une indépendance à la longueur d'onde, tels que les réseaux FTTH et les systèmes de télécommunication à haut débit.

b) Les filtres optiques

Les filtres sont des composants optiques qui transmettent, réfléchissent ou absorbent, de manière sélective, certaines longueurs d'onde ou fréquences de lumière. Les types de filtres les plus répandus sont les filtres passe-bande, passe-haut, passe-bas, coupe-bande d'interférence ou robustes, de couleur, dichroïque, et à densité neutre [40].

Les filtres optiques accordables font partie des composants essentiels dans les systèmes de communication optique, caractérisés principalement par leur plage d'accord et leur temps de réponse ce qui va déterminer respectivement la couverture spectrale et la rapidité d'ajustement du filtre, deux aspects cruciaux pour les réseaux WDM. Les filtres optiques multicouches, quant à eux, sont conçus pour façonner les caractéristiques spectrales d'un faisceau lumineux. Constitués d'empilements alternés de couches minces à haut et bas indices de réfraction, ces filtres peuvent réaliser diverses fonctions, allant de la réflexion haute performance à la séparation de faisceaux. Leur conception vise à atteindre une réponse spectrale cible, qui peut être simple (comme un miroir ou un antireflet) ou complexe (tels que les filtres dichroïques à large bande ou les antireflets multi-bandes). Cette technologie offre une grande flexibilité dans la manipulation et le contrôle des propriétés optiques, jouant un rôle crucial dans l'optimisation des performances des systèmes de communication optique modernes [40].

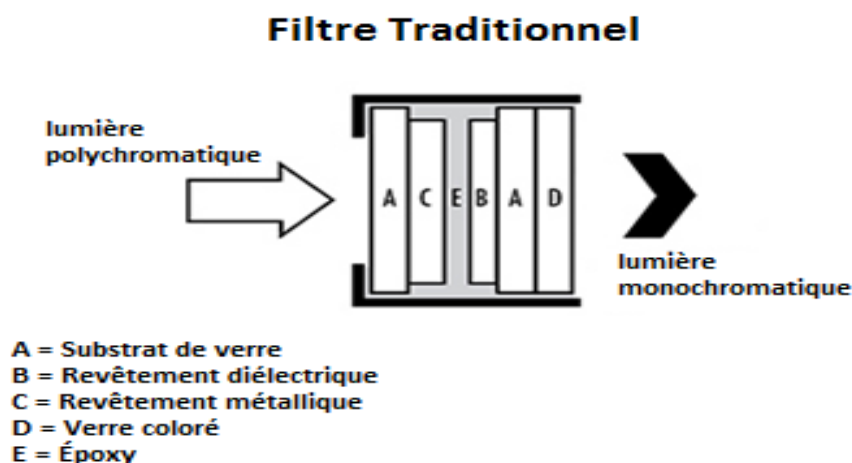


Figure II.6 Mode de fonctionnement d'un filtre traditionnel [40]

c) Les multiplexeurs optiques

Ces dispositifs ont comme rôle de créer un multiplex qui n'est d'autre qu'un flux de données à très haut débit en commençant par de multiples flux à un débit inférieur et donc par conséquent, le débit total capable d'être transmis dans une unique fibre optique va définir la capacité du réseau optique [41].

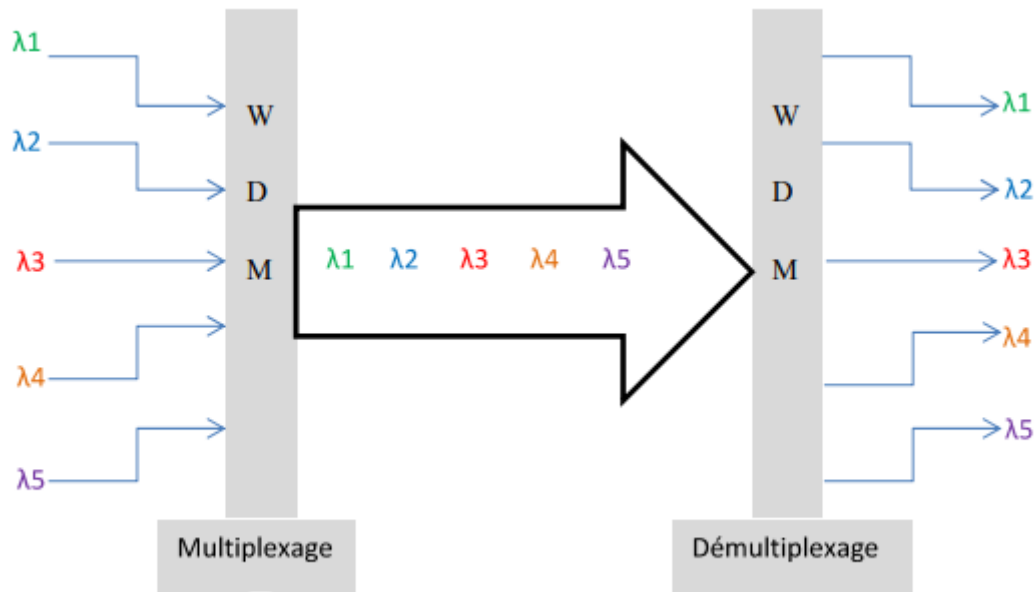


Figure II.7 Architecture générale d'une liaison WDM [42]

Le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing, WDM) est une technique fondamentale dans les réseaux de fibres optiques qui permet d'augmenter considérablement leur capacité de transmission. Cette méthode consiste à envoyer simultanément plusieurs signaux optiques, chacun sur une longueur d'onde différente, à travers une unique fibre optique [41].

Dans un système WDM, chaque longueur d'onde représente un canal de communication distinct, capable de transporter son propre flux de données. Ainsi, au lieu de découper l'axe du temps en périodes pour chaque utilisateur, comme dans certaines autres formes de multiplexage, le WDM divise la bande passante optique disponible. Chaque sous-bande de fréquence, ou canal, est affectée à une voie de transmission spécifique [42].

Le rôle des dispositifs WDM est crucial dans ce processus. Ils créent un multiplex, c'est-à-dire un flux de données à très haut débit, en combinant de multiples flux à débits inférieurs. Par

conséquent, le débit total pouvant être transmis dans une unique fibre optique définit la capacité du réseau optique. Les coupleurs WDM sont des composants clés qui assurent deux fonctions essentielles [42] :

- Le multiplexage : ils combinent différents signaux optiques de longueurs d'onde variées pour les injecter dans la fibre.
- Le démultiplexage : ils séparent les différents signaux optiques de longueur d'onde sortant de la fibre.

Un multiplexeur en longueur d'onde peut être défini comme un dispositif de dérivation avec deux accès de sortie, où la lumière à chaque accès d'entrée est restreinte à une gamme de longueurs d'onde présélectionnée. La sortie est une combinaison de lumières provenant des accès d'entrée. Inversement, un démultiplexeur en longueur d'onde effectue l'opération inverse, séparant les différentes longueurs d'onde en sortie de fibre.

Il est important de noter la distinction terminologique entre le multiplexage en longueur d'onde (WDM) et le multiplexage en fréquence (Frequency Division Multiplexing, FDM). Bien que ces deux termes recouvrent la même notion fondamentale - la division du spectre optique - on parle généralement de WDM lorsque la séparation entre deux canaux est relativement grande (typiquement plus de 1 nm), tandis que l'on utilise le terme FDM lorsque cet écart est relativement petit. Cette distinction reflète les différentes échelles et applications de ces technologies dans les systèmes de communication optique.

En fonction des longueurs d'ondes utilisées, le nombre de canaux qu'une fibre peut transporter est borné, conduisant ainsi à deux techniques de multiplexage (voir le tableau II.2) [41] :

- Le CWDM (CWDM : Coarse Wavelength Division Multiplexing);
- Le DWDM (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing).

Tableau II.2 Les différentes technologies du WDM [41]

Types	Fenêtres	Espacements (nm)	Canaux
CWDM	2 ^{ième}	20	Jusqu'à 16
WDM	3 ^{ième}	0.8-1.6	Jusqu'à 32
DWDM	3 ^{ième}	0.2-0.4	Jusqu'à 160

L'avantage majeur du WDM est qu'il permet d'augmenter considérablement la capacité d'une fibre optique sans nécessiter l'installation de nouvelles infrastructures physiques. Cela rend

cette technologie particulièrement attrayante pour les opérateurs de réseaux cherchant à répondre à la demande croissante de bande passante de manière économique et efficace.

La mise en œuvre efficace d'un système WDM nécessite des composants spécialisés pour la combinaison (multiplexage) et la séparation (démultiplexage) des différentes longueurs d'onde. Parmi ces dispositifs, l'Arrayed Waveguide Grating (AWG), ou réseau de guides d'ondes matricés, se démarque par sa performance et sa polyvalence en tant que composant passif [43].

L'AWG occupe une place centrale dans les systèmes WDM, remplissant à la fois les fonctions de multiplexeur et de démultiplexeur. Sa configuration particulière, illustrée en Figure II.8, repose sur un agencement de multiples guides d'ondes en réseau. Cette architecture lui confère la capacité de gérer simultanément et avec précision un nombre important de canaux optiques [43].

En configuration multiplexeur, l'AWG fusionne efficacement divers signaux de longueurs d'onde distinctes en un unique faisceau optique. À l'inverse, en mode démultiplexeur, il dissocie avec exactitude les différentes longueurs d'onde d'un signal WDM entrant, les acheminant vers des sorties spécifiques [43].

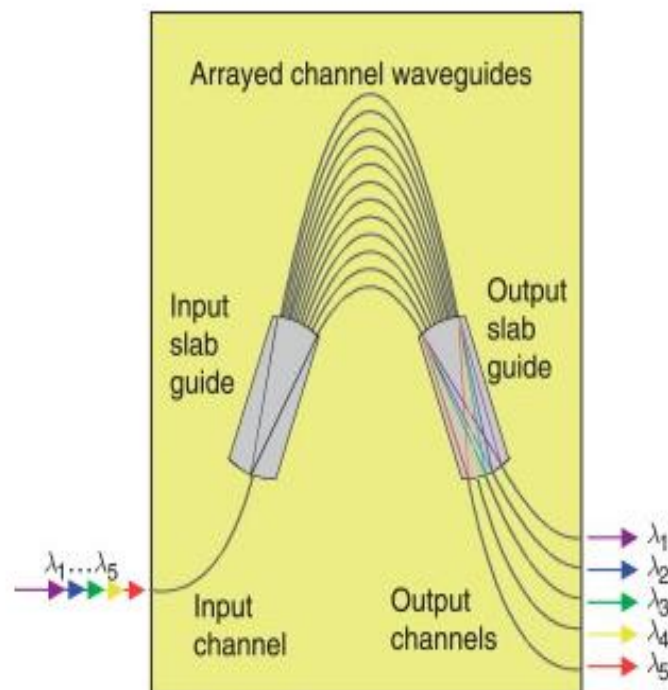


Figure II.8 Schéma descriptif d'un AWG [44]

Intégrer l'AWG dans les systèmes WDM peut offrir plusieurs avantages [43-44]:

- Une forte capacité de traitement de canaux multiples, dans le but de gérer efficacement les systèmes WDM denses.
- De faibles pertes d'insertion, ce qui contribue à maintenir une bonne qualité du signal sur de longues distances.
- Une bonne isolation entre canaux, permettant de réduire les interférences et améliorer la qualité de transmission.
- Un design compact et facilement intégrable, lui permettant ainsi d'être incorporer dans les équipements de réseau.

d) Les circulateurs optiques

Ce dispositif fait partie de la classe des dispositifs optiques passifs, il est doté de plusieurs ports (minimum trois ports), sa fonction consiste à transporter le flux lumineux, avec une intensité maximale, d'un port au port qui le suit d'une façon séquentielle par contre la transmission du flux d'un port à celui qui le précède n'est pas permise. Cette fonction est permise grâce à la rotation de polarisation non réciproque de l'effet Faraday [43].

Les circulateurs optiques peuvent être divisés en deux classes, ceci dépendra de l'état de polarisation de la lumière [43] :

- a. les circulateurs dépendants de la polarisation circulateur optique, qui ne fonctionne que pour un luminaire avec un état de polarisation particulier.
- b. le circulateur optique indépendant de la polarisation, qui est fonctionnel indépendamment de l'état de polarisation d'une lumière.

La plupart des circulateurs optiques utilisés dans les systèmes de communication à fibre optique font partie de la deuxième catégorie car l'état de polarisation d'une lumière varie lors de la propagation dans la fibre optique standard en raison de la biréfringence (la vitesse de propagation de la lumière peut varier selon son orientation de polarisation) causée par ses imperfections. Tandis que les circulateurs qui dépendent de la polarisation sont appliqués dans la communication en espace libre entre les satellites et la détection optique [43].

Le circulateur optique est indispensable dans les systèmes de communication optique avancés, surtout pour les systèmes optiques WDM.

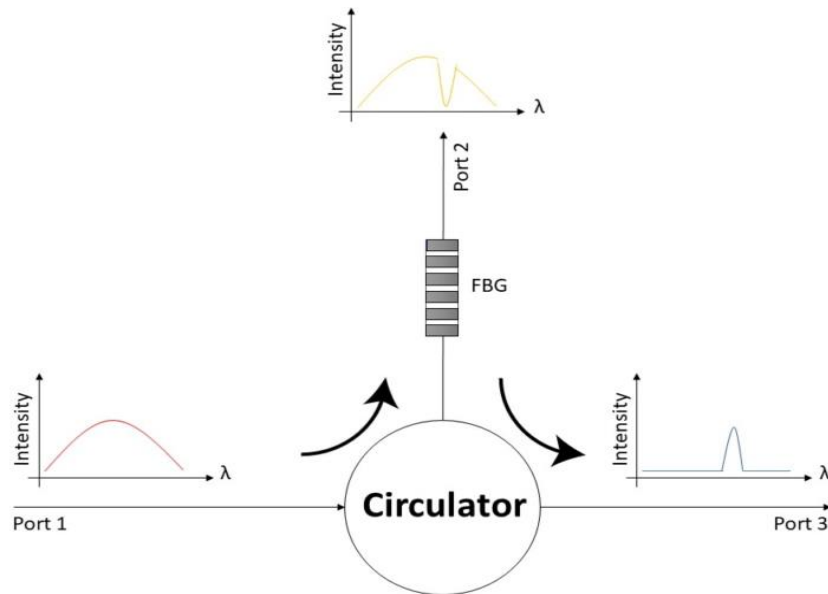


Figure II.9 Fonctionnement d'un circulateur optique [43]

e) Les atténuateurs optiques

Un signal optique ayant une forte puissance dans les liaisons par fibre optique, nécessaire pour la transmission de données surtout sur de longues distances, peut parfois surcharger les récepteurs et causer des problèmes sur le réseau optique, d'où l'utilisation d'atténuateurs à fibres optiques pour réduire la puissance. Ces dispositifs passifs, également appelés atténuateurs optiques, sont cruciaux pour obtenir les meilleures performances du système, particulièrement dans les systèmes monomodes et les liaisons DWDM longue distance, tandis que les systèmes multimodes en ont rarement besoin en raison de la puissance de sortie limitée de leurs sources. Les atténuateurs fonctionnent selon divers principes tels que la perte d'espace, l'absorption ou encore la réflexion, permettant d'ajuster la puissance optique pendant la transmission et d'éviter ainsi la saturation des récepteurs, un phénomène qui pourrait compromettre l'intégrité du signal et la fiabilité du réseau [45].

f) Les connecteurs optiques

Les connecteurs optiques sont des dispositifs qui se chargent du raccordement de la fibre et assurent ainsi la continuité de la propagation du signal lumineux, ils sont la principale source de pertes des réseaux optiques si on ne respecte pas les normes applicables à la connectique optique [46]. Ils se composent tous de : la fêrle, du corps du connecteur ainsi que le dispositif de couplage.

Plusieurs types de connecteurs optiques sont disponibles sur le marché actuel, on peut en citer ceux qui sont les plus utilisés [46] :

- **CONNECTEUR SC (Subscriber Connector)**

Compatible avec les fibres monomodes et multimodes avec une connexion rapide de type push/Pull, ce connecteur à une atténuation moyenne de $0,25dB$ et il a la particularité d'avoir une bonne densité de connecteur par équipement. Il est applicable en FTTH, CATV, réseau télécom, etc. Ces caractéristiques lui en permis d'être le connecteur le plus populaire

- **CONNECTEUR LC (Lucent Connector)**

Compatible avec les fibres monomodes, ce connecteur ressemble à un RJ45 (type push / pull) avec une atténuation moyenne de $0,1dB$. Son corps est encore plus compact que celui du connecteur SC. Il est applicable en FTTH mais aussi pour l'amélioration de la densité des points de raccordement

- **CONNECTEUR FC (Ferrule Connector)**

Compatible avec les fibres monomodes, ce connecteur est doté de vis avec fixation qui résiste aux vibrations une atténuation moyenne de $0,3dB$. Il est applicable en CATV et dans les instruments de mesures.

- **CONNECTEUR ST (Straight Tip)**

Compatible qu'avec les fibres multimodes car il ne présente pas une bonne précision axiale, ce connecteur est doté d'un système de verrouillage de baïonnette de type BNC avec une atténuation moyenne de $0,75dB$.

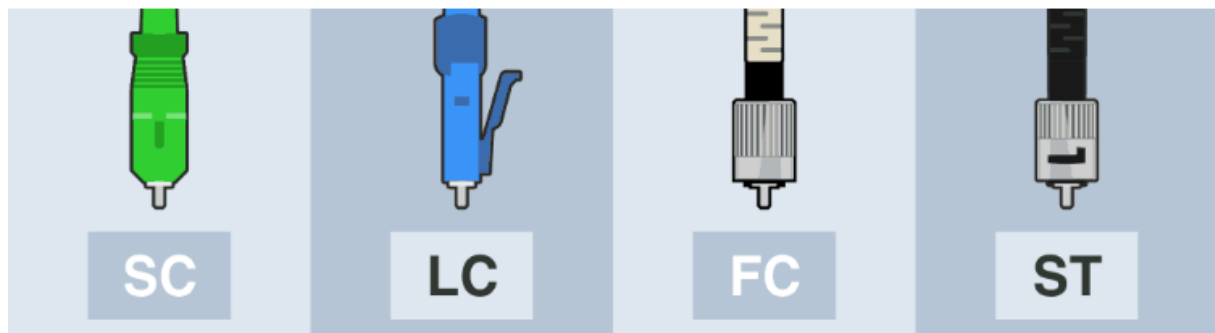


Figure II.10 Types de connecteurs optiques [46]

2.3 Les réseaux PON

Le transport des données, de la vidéo et de la voix nécessite le déploiement d'un réseau de fibres optiques qui peut être classifié en trois catégories : Le réseau cœur (core network) qui est constitué d'un ensemble de commutateurs et de liaisons entre ces commutateurs, le réseau

métropolitain (Metropolitan Area Network: MAN) qui correspond un réseau à l'échelle d'une ville, et enfin les réseaux d'accès ou réseau local (Local Area Network : LAN) qui relie ce dernier aux terminaux des utilisateurs [47].

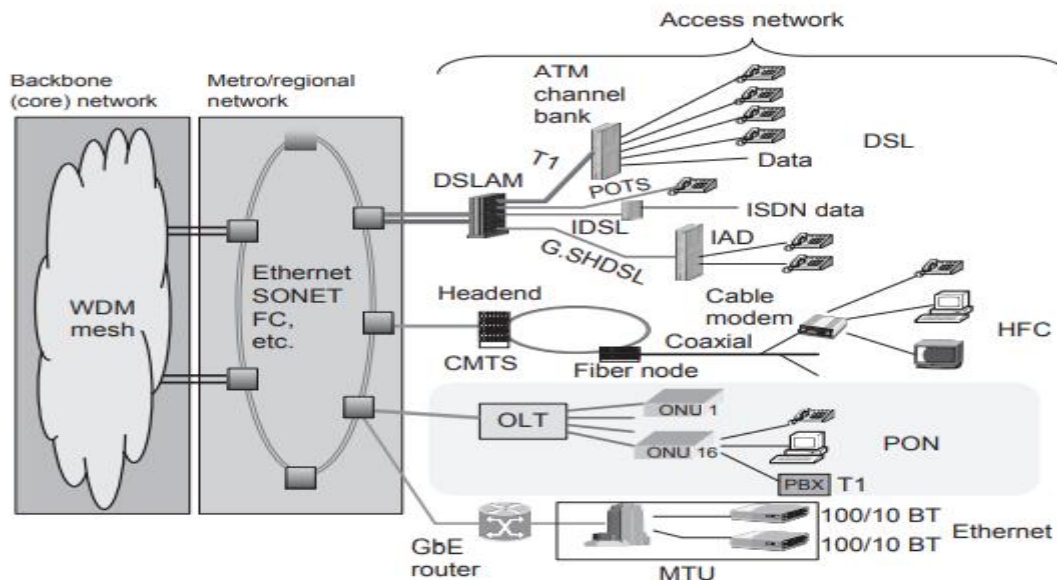


Figure II.11 Schéma de base d'un réseau de télécommunications [47]

Les réseaux optiques passifs (PON : Passive Optical Network) représentent une technologie clé dans l'évolution des réseaux d'accès optique modernes. Ces réseaux d'accès constituent le dernier maillon entre l'infrastructure de télécommunication principale et l'utilisateur final, souvent appelé "dernier kilomètre" ou "boucle locale" et peut desservir de 16 jusqu'à 64 utilisateurs en moyenne [12].

2.3.1 Architecture des réseaux PONs

La figure ci-dessous représente l'architecture de base d'un réseau PON, elle permet une exploitation efficace des infrastructures en partageant une seule fibre principale entre plusieurs utilisateurs, tout en offrant une connexion dédiée sur le dernier tronçon en plus d'une utilisation efficace de la bande passante optique. Elle est constituée de plusieurs éléments clés [48] :

- **OLT (Optical Line Terminal)**

Considéré comme le point de départ du réseau, il gère la transmission et la réception des signaux optiques pour l'ensemble du réseau, il est très souvent situé dans le central de l'opérateur.

- **Fibre de transport (Feeder fiber)**

C'est la fibre principale transportant les données optiques qui débute de l'OLT. Elle est partagée entre plusieurs utilisateurs, optimisant ainsi l'utilisation de la ressource de transport.

- **RN (Remote Node)**

C'est n'est autre qu'un nœud passif (splitter ou filtre) qui a le rôle de diviser le signal optique le répartissant ainsi vers plusieurs fibres de distribution.

- **Fibre de distribution (Distribution fiber)**

Ce sont les fibres individuelles qui partent du splitter vers chaque client ayant donc le profil d'une fibre "monopolisée" par un client spécifique.

- **ONU (Optical Network Unit)**

Il convertit les signaux optiques reçus par les fibres de distribution en signaux électriques utilisables par les équipements du client, c'est l'équipement terminal chez le client.

L'aspect passif du réseau PON revient à l'absence d'éléments actifs entre l'OLT et les ONUs, réduisant les coûts et la complexité du réseau.

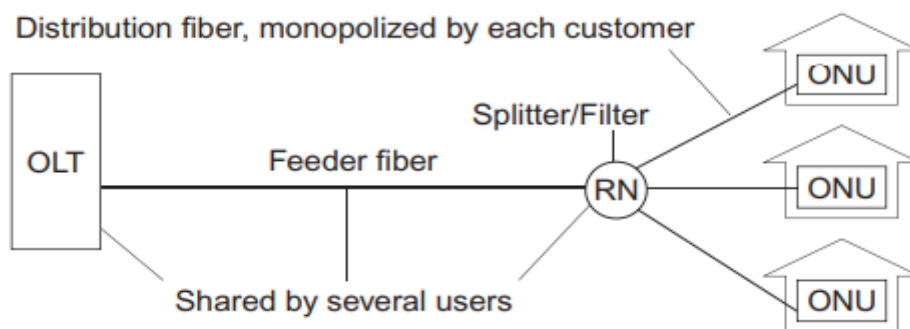


Figure II.12 Architecture de base d'un réseau PON [48]

2.3.2 Topologies des réseaux PON

Dans le contexte des réseaux de communication, Le mot "topologie" désigne la manière d'arrangement (quelle soit physique ou logique) des éléments qui constituent un réseau. Le choix de la topologie va donc dépendre de plusieurs facteurs : la zone géographique, la densité de population,

les services offerts, le budget ainsi que les exigences de fiabilité. Les réseaux PONs peuvent être déployés selon différentes topologies, Voici les principales topologies utilisées [49] :

- **Topologie en bus (en anglais Bus topology)**

Le principe de cette topologie c'est le fait de partager une fibre principale entre les différents ONUs en utilisant de coupleurs pour la connexion. On fait souvent recours à cette topologie pour les déploiements linéaires (le long d'une route par exemple). Elle a l'avantage de faciliter l'extension du réseau si besoin, en revanche, elle a l'inconvénient d'une perte croissante du signal le long du bus.

- **Topologie en arbre (en anglais Tree topology)**

C'est la topologie la plus courante dans le déploiement des réseaux PONs plus précisément pour la distribution dans les zones résidentielles. Son principe consiste à ce que la fibre qui part de l'OLT se ramifie via des splitters optiques. Elle a l'avantage de l'utilisation optimale de la bande passante. Par contre, elle est vulnérable lors d'une coupure de la fibre principale.

- **Topologie en anneau (en anglais Ring topology)**

La particularité de cette topologie est qu'elle forme une boucle fermée entre l'OLT et les ONUs tout en offrant une redondance complètement naturelle. Elle a l'avantage d'offrir une fiabilité lors d'une potentielle coupure de la fibre principale, en revanche, le coût de sa mise en œuvre est plus élevé et plus complexe.

- **Topologie en étoile (en anglais Star topology)**

Lors de la mise en œuvre de cette topologie, on connecte chaque ONU directement à l'OLT via une fibre dédiée ce qui va engendrer un coût beaucoup plus élevé, c'est pour cette raison qu'elle est peu utilisée. Cette topologie offre une gestion indépendante et simple des différents ONUs.

- **Topologie hybride**

Comme son nom l'indique, on aura la possibilité de combiner plusieurs topologies (ex : anneau-arbre) ce qui va permettre une optimisation du réseau, une flexibilité et une bonne adaptation selon les contraintes et besoins exigés, par contre, elle est très complexe à concevoir et à gérer.

En résumé et après avoir étalé plusieurs topologies, la topologie en arbre est celle la plus répandue pour sa simplicité et son efficacité dans la plupart des scénarios de déploiement PON.

2.3.3 Standards et évolutions des réseaux PON

Depuis l'apparition des réseaux PON d'énormes efforts ont été effectués afin de pouvoir répondre aux exigences des utilisateurs ce qui a conduit à l'instauration de plusieurs normes. APON (Asynchronous Transfer Mode PON) est la toute première norme basé sur une des techniques de commutation ATM ça a ensuite évolué vers la norme PON à large bande appelée BPON (Broadband PON) ce qui inclut l'utilisation du multiplexage WDM. L'amélioration considérable des distances de transmission et de la largeur de bande quand à elle a été ressenti avec l'implémentation des réseaux EPON (Ethernet PON) et GPON (Gigabit PON) [88]. Le tableau qui suit retrace les caractéristiques de ces normes selon [50-51-52].

Tableau II.3 Caractéristiques des normes des réseaux PON [50-51-52]

	BPON	EPON	GPON
Standard	ITU G983	IEEE 802.3av	ITU G984.1
Débit Mbit/s (Descendant/Montant)	622.08/155.52	1000/1000	2488/ 1244
Longueur d'onde nm (Descendante/Montante)	1490/1310	1490/1310	1490/1310
Nombres d'utilisateurs	Maximum 64	De 16 à 32	60
Distance de transmission Km	20	20	Maximum 60

2.3.4 Systèmes des protections optiques

Les liaisons optiques sont très souvent exposées à des points de défaillance qui peuvent potentiellement interrompre le réseau, de ce fait, plusieurs architectures de protection (redondance) ont été conçues afin de limiter les dégâts et ainsi renforcer leur fiabilité. Les architectures de redondances en question seront évoquées ci-dessous :

a) Systèmes de protection des réseaux PON

Nombreux sont les schémas de protection développés pour les réseaux PON, tel que : Les architectures standard définies par l'ITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) qui sont regroupées en quatre (4) types (A, B, C et D), l'architecture en anneau, radio sur fibre (RoF), architecture hybride WDM/TDM PON, protection de bout en bout etc.

- **Système de protection de type A**

Définie par la norme ITU-T G983.1, la protection de type A assure, au niveau de la section d'alimentation (Feeder section), la redondance du canal FF (Feeder Fiber). Deux fibres FF et FF' sont déployées dont l'une principale et l'autre secondaire auquel les données basculent grâce à un commutateur ou Switch en cas de défaillance de la ligne primaire et vis vers ça [53] (voir la Figure II.13).

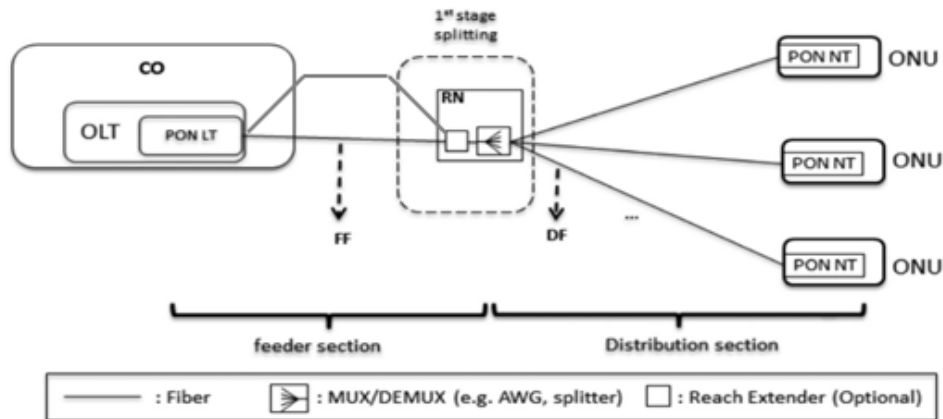


Figure II.13 Architecture de protection de type A [53]

- **Système de protection 1+1**

Ce système fait partie de la famille du standard du type C et il fonctionne en mode full duplex ce qui veut dire autorisé la circulation du trafic de données en simultanées sur deux lignes et une fois arrivé à la réception, une seule ligne sera choisi en fonction de la qualité du signal. Avec un faible coût et une vitesse de communication assez importante, L'OLP 1+1 est fréquemment utilisé dans les applications telles que : les communications vidéo et vocales, le transfert de données de large largeur de bande sur de courtes distances [54].

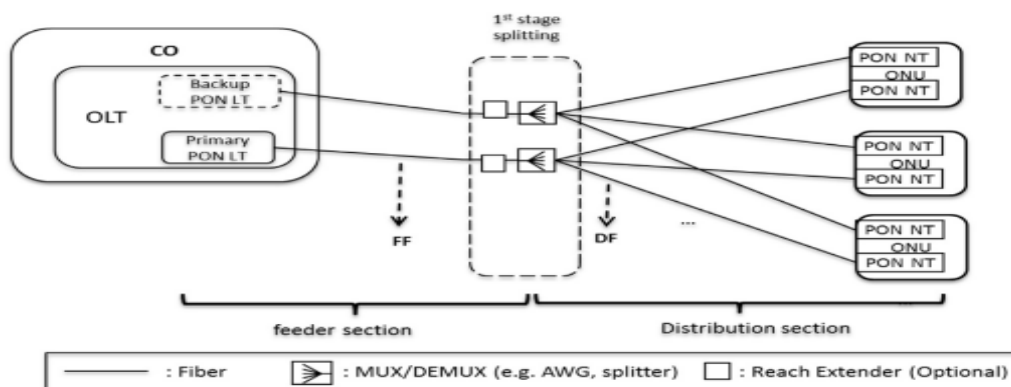


Figure II.14 Schéma Protection 1+1 [54]

Dans cette architecture, le récepteur est équipé d'un opérateur logique tout-optique XOR (OU exclusif) permettant de fournir en sortie l'un des signaux reçus comme illustré dans sa table de vérité.

Tableau II.4 Table de vérité XOR [55]

A	B	$A \oplus B$	$A \oplus (A \oplus B) = B$	$B \oplus (B \oplus A) = A$
0	0	0	0	0
0	1	1	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	1	1

Illustrons un scénario d'un réseau à quatre nœuds, avec deux nœuds sources **A** et **B** et un nœud de destination **D**, mais aussi à un nœud intermédiaire **C** comme le montre la Figure II.15 a). Le nœud **A** transmet un flux continu **a** de bits tandis que le nœud **B** envoie le flux **b**. Ici on souhaite établir une connexion robuste à la défaillance d'un seul lien ; ainsi, un seul chemin depuis une source jusqu'au puits est insuffisant. Par conséquent, les deux nœuds sources envoient leurs flux au nœud **C** et ce dernier combine les bits des deux flux en utilisant l'opération XOR ($a \oplus b$) avant de les transmettre au nœud **D**. Si le lien (**A-D**) échoue, alors **D** peut toujours récupérer le flux **a** via le XOR du ($a \oplus b$) flux reçu du nœud **C** avec le flux **b** reçu à partir de **B**. De même, **D** peut récupérer le flux **b** si la liaison (**B-D**) échoue. Cette méthode offre une protection efficace contre la panne d'un seul lien, ce qui serait impossible avec une approche traditionnelle sans codage réseau, tout en optimisant l'utilisation des ressources du réseau [55].

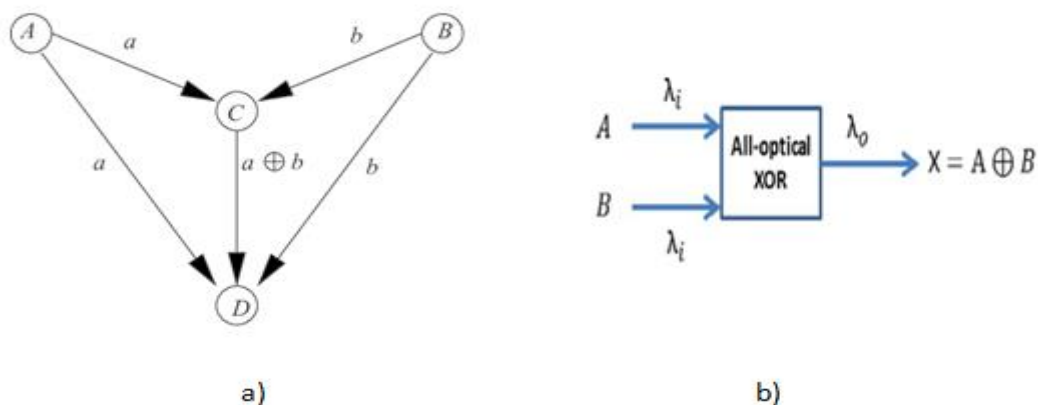


Figure II.15 a) Code réseau statique contre une panne de lien unique, b) Model XOR [55]

- **Système de protection basé sur l'architecture en anneau**

Le principe de fonctionnement d'une telle topologie pour la protection des PONs repose sur l'utilisation d'un mécanisme de protection efficace et global combinant surveillance et réaction rapide. Des encodeurs optiques surveillent continuellement le réseau, tandis qu'un système de gestion réseau dans le bureau central initie le processus de protection en surveillant les informations collectées. En fonctionnement normal, la technologie de multiplexage par répartition spatiale est adoptée pour réduire les pertes et les diaphonies des signaux. De plus, les signaux montants et descendants sont propagés dans des anneaux de fibre séparés, une stratégie qui atténue l'impact de la rétrodiffusion Rayleigh. Cette approche intégrée assure une surveillance constante, une réaction rapide aux anomalies et une transmission optimisée, garantissant ainsi la fiabilité et la performance du réseau PON dans diverses conditions de fonctionnement [56].

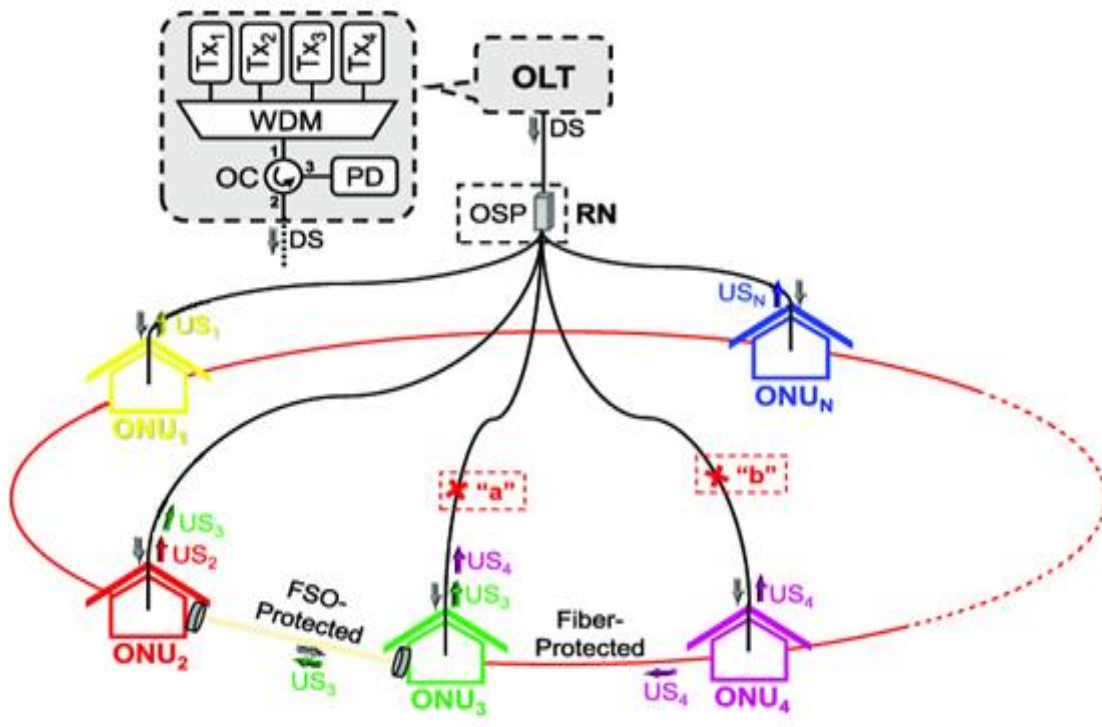
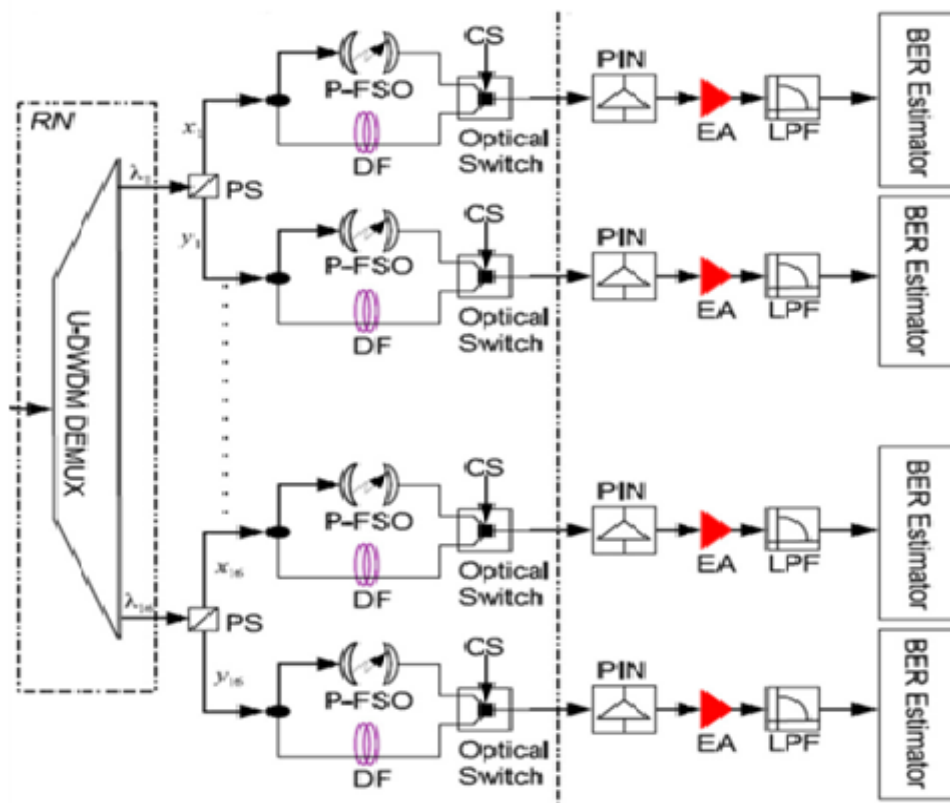


Figure II.16 Architecture d'un système de protection en anneau [54]

b) Système de protection par FSO

Le Système de protection par FSO (Free Space Optics) est utilisé dans des liaisons de transmission Backup en Outdoor, particulièrement dans des environnements géographiques difficiles ou inappropriés pour installer la fibre optique, cette technologie qui utilise des faisceaux laser pour

transmettre des données à travers l'espace libre, s'avère précieuse lorsque l'installation de fibres optiques est complexe ou impossible, comme en présence de larges rivières, de sols rocheux ou de montagnes imposantes. Au-delà de son rôle de secours pour assurer la continuité des réseaux à très haut débit dans des conditions défavorables, le FSO se positionne comme une solution de redondance complémentaire aux liaisons optiques filaires. Cette approche permet de garantir une disponibilité optimale du réseau en combinant la fiabilité de la fibre optique avec la flexibilité du FSO, offrant ainsi une stratégie de protection adaptée aux défis topographiques et environnementaux rencontrés dans les déploiements de réseaux outdoor. Le concept schématique du réseau peut se définir comme l'indique la figure ci-dessous (Figure II.17) [57].



Remote Node; PS: Polarization Splitter; EA: Electrical Amplifier; DF: Distributed Fiber;
LPF: Lower pass filter; CS: Switch; PIN: Positive Intrinsic Negative

Figure II.17 Architecture d'un système de protection par FSO [57]

c) Système de protection par satellite

L'approche de redondance en lien optique s'étend même au-delà des solutions terrestres pour inclure des options satellitaires, une diversification plus que nécessaire face aux désastres naturels comme les éruptions volcaniques ou les séismes, qui peuvent affecter l'efficacité des

protections terrestres habituelles. Cette stratégie combine des réseaux optiques terrestres (TON : Terrestrial Optical Network) avec des satellites géostationnaires (GEO : Geostationary Earth Orbit), créant une architecture intégrée et résiliente. L'interconnexion entre ces deux systèmes et leur contrôle est assurée par des stations optiques au sol (OGS : Optical Ground Station) et des liaisons laser satellite-terre, offrant ainsi une solution de secours robuste lorsque les infrastructures terrestres sont menacées ou inaccessibles. Cette approche globale de protection garantit une continuité de service même dans les scénarios les plus extrêmes, en exploitant la complémentarité entre les technologies terrestres et spatiales pour surmonter les limitations géographiques et les vulnérabilités liées aux catastrophes naturelles [58].

Il y a quatre satellites GEO localisés à l'orbite géosynchrone. Ces quatre satellites GEO sont interconnectés par des liaisons laser spatiales et forment une topologie en anneau. La topologie en anneau présente les avantages de fournir des liaisons laser satellite-Terre suffisantes, une connectivité élevée et une capacité de survie élevée. Les interconnexions entre deux satellites GEO et entre un satellite GEO et un OGS. En outre, nous supposons que toute liaison laser inter-satellite et toute liaison laser satellite-terre prend en charge le multiplexage par répartition en longueur d'onde WDM [59]. En cas de défaillance d'une liaison du réseau TON, le choix du trajet de secours la plus propice est déterminé par un service de supervision utilisant l'algorithme de Dijkstra.

d) Système de protection par multi-trajets

L'architecture multi-trajet consiste à déployer plusieurs chemins de secours entre une source et une destination. C'est une approche largement utilisée pour la protection de réseau EON (Elastic Optical Network) qui s'adapte aux besoins fluctuants du trafic de données avec une grande agilité. Par exemple, dans un réseau à 5 nœuds (de 0 à 4), avec des liaisons entre la source (nœud 0) et la destination (nœud 2) passant par le nœud 3 comme route principale, un débit de 100 Gb/s peut être attribué à cette route principale. Pour assurer une protection, un débit équivalent doit être prévu en réserve pour la route secondaire, ce qui correspond à la méthode de protection DPP (Dedicated Path Protection) ou Chemin de Protection Dédié. Cependant, il est également possible de réserver une capacité de protection réduite à 50 % du trafic initial, une approche appelée DPPS (Dedicated Path Protection with Squeezing) ou DPP compressé. La différence entre ces deux approches réside dans la capacité totale du réseau, qui serait de 200 Gb/s pour la DPP et de 150 Gb/s pour la DPPS [57].

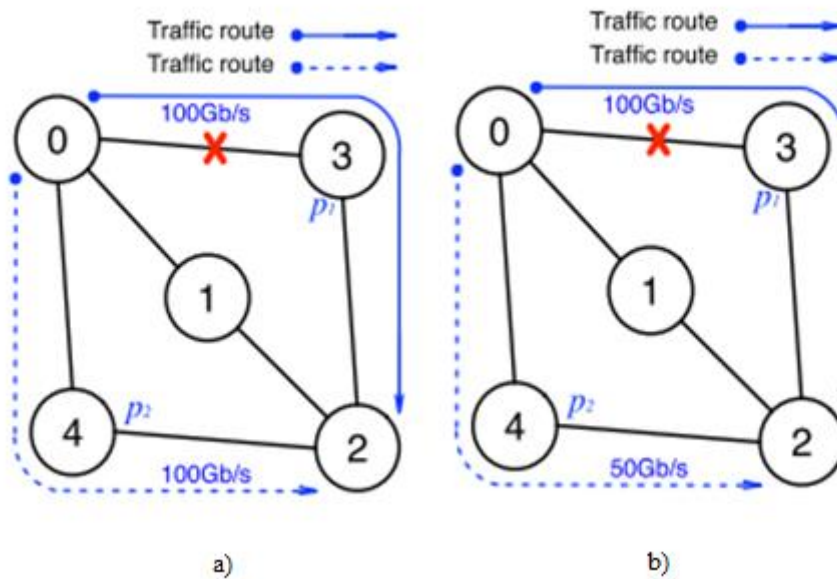


Figure II.18 Architecture de protection multi-chemin a) sans compression b) avec compression [57]

2.4 Les réseaux FTTx

2.4.1 Contexte et importance des réseaux FTTx.

Avant qu'elle dessert les foyers des abonnés, il y'a plus d'une dizaine d'années, la fibre optique a été le support d'internet surtout pour les liaisons intercontinentales. Désormais, les réseaux de fibres optiques jusqu'à même le foyer de l'utilisateur, appelé Fibre-to-the-x (FTTx) sont devenus une réalité dans plusieurs régions du globe atteignant et connectant ainsi une centaine de millions de foyers tout ça en échangeant progressivement les câbles en cuivre des tout derniers mètres reliant le domicile de l'abonné au central par de la fibre optique permettant d'augmenter considérablement les débits de transmission et d'offrir de nombreux services [41].

Ces réseaux peuvent être installés suivant deux configurations, L'architecture active, également appelée Point à Point (P2P : Point To Point), et l'architecture passive est appelée Point à Multipoint (P2M : Point To Multi-point). Le choix entre ces deux architectures pour l'installation va dépendre du type de services proposés, du coût de l'infrastructure, de l'infrastructure déjà existante et des plans futurs de migration vers d'éventuelles nouvelles technologies [53].

2.4.2 Types de Réseaux FTTx

Pour bien comprendre l'utilité de ces réseaux ainsi que les avantages qu'ils offrent par rapport aux réseaux basés sur les supports en cuivre, nous illustrons dans la Figure II.19 les débits

descendants des différentes technologies d'accès à Internet en fonction de la distance qui sépare l'utilisateur et le point de distribution du réseau [54]:

- **Les technologies traditionnelles basées sur des lignes en cuivre**

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line): Offre des services Internet asymétriques en utilisant des lignes téléphoniques en cuivre avec des débits allant jusqu'à 8 *Mbps* sur une portée de 3300 *m*.

Re-ADSL (Reach Extended ADSL): C'est une version de l'ADSL qui va pouvoir étendre la portée de la transmission jusqu'à 4700*m* avec un débit minimal de 512 *Kbps*.

ADSL 2+ (Asymmetric Digital Subscriber Line 2+): Une autre version de l'ADSL, qui va améliorer le débit l'élevant à Jusqu'à 24 *Mbps* sur des distances similaires.

VDSL2 (Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line 2): Offre des débits Jusqu'à 100 *Mbps* pour une distance de 1300*m*.

- **Les technologies FTTx basées sur des lignes optiques**

Comme FTTB/FTTC et FTTCab (qu'on étalera par la suite), offrent des débits très élevés jusqu'à 100 *Mbps* à courte distance (jusqu'à 300 *m* pour FTTB/FTTC et 1300 *m* pour FTTCab).

Le constat de l'impact de la distance sur les débits des différentes technologies d'accès à Internet, montre que les technologies à base de fibre optique offrent des performances clairement plus supérieures sur des distances plus courtes, tandis que les technologies basées sur le cuivre ont des limitations plus marquées avec l'augmentation de la distance.

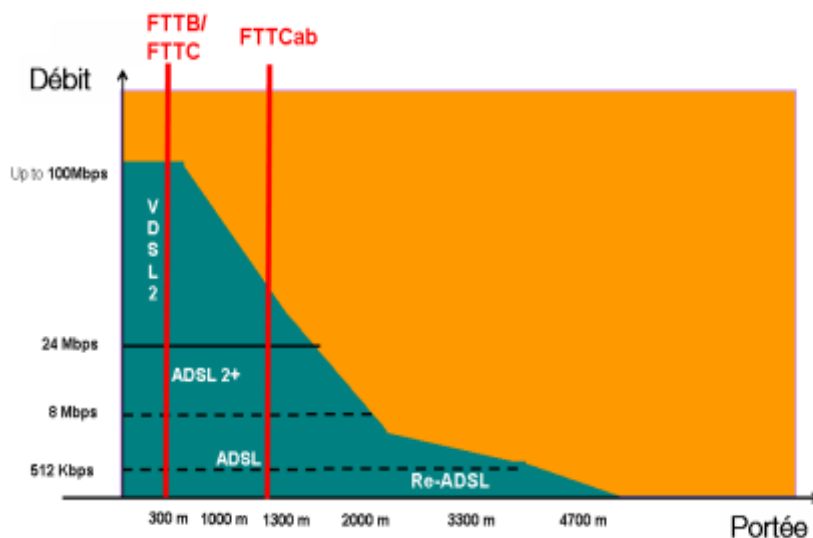


Figure II.19 Performances des différentes technologies d'accès à Internet en fonction de la distance [54]

Dans cet anglet, nous explorerons les différents types ou nominations des réseaux FTTx (en français Fibre jusqu'à x) et ceux Selon la localisation de la terminaison du réseau optique, Ces réseaux sont déployés afin de pouvoir transporter les données, internet, la voix et la vidéo [38] :

FTTN (Fiber To The Node) ou FTTCab (Fiber To The Cabinet):

Dans cette configuration, La fibre optique est déployée jusqu'à un nœud de raccordement distant à plus de 300 mètres de l'utilisateur final. En ce qui concerne les derniers mètres restants, ils sont couverts par des câbles en cuivres.

Avantages et inconvénients : Offre des débits raisonnables, mais qui peuvent diminuer en fonction de la distance des câbles en cuivres.

FTTC (Fiber To The Curb):

La liaison par fibre optique s'arrête au trottoir ou à une armoire de rue à moins de 300 mètres de l'utilisateur final. En ce qui concerne les derniers mètres restants, ils sont couverts par des câbles en cuivres.

Avantages et inconvénients : Vu que la distance des câbles métalliques est réduite ça permet de fournir des débits plus élevés que FTTN.

FTTB (Fiber To The Building):

La fibre optique couvre la ligne de transmission jusqu'au bâtiment. Les quelques derniers mètres qui correspondent à l'intérieur du bâtiment, sont couverts par des câbles en cuivres.

Avantages et inconvénients : Puisque la majeure partie de la distance est couverte par la fibre optique, on obtiendra dans ce cas des débits très élevés.

FTTH (Fiber To The Home):

La fibre optique est déployée directement jusqu'à l'intérieur du foyer de l'utilisateur final ce qui veut dire qu'aucun câble métallique n'est utilisé entre le point de distribution et l'utilisateur final.

Avantages et inconvénients : Offre les meilleures performances et débits des plus élevés, car il n'y a pas de perte de signal due aux câbles métalliques.

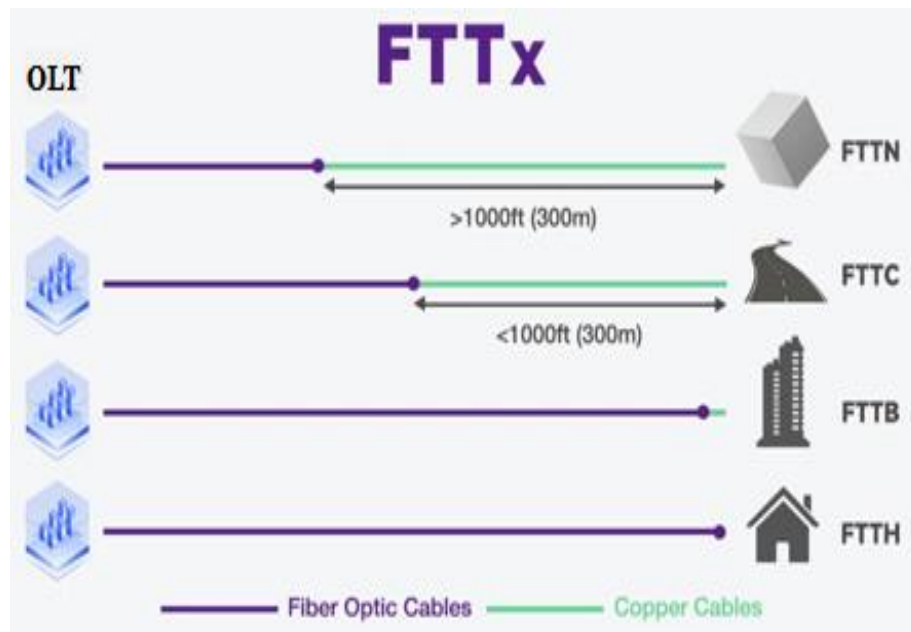


Figure II.20 Différentes architectures de réseau d'accès optique FTTx [55]

2.4.3 Déploiements des réseaux FTTx-PON

On étalera, ci-dessous un des exemples concrets de déploiements réussis des réseaux hybrides : FTTH-PON, tel montré dans la figure II.21.

En effet, la figure montre une architecture réseau avec un très haut débit dédié à la distribution des services d'internet en utilisant la technologie PON. Le Central Office (CO) contient l'OLT qui administre les connexions et répartit le signal vers plusieurs OLU (Optical Line Units) à travers une fibre optique partagée (connexion point multipoints utilisant le multiplexage WDM). Ces OLU, avec leurs interfaces PON (PON IF), connectent plusieurs ONTs situés soit dans les foyers (FTTH) soit à proximité (FTTC). Les ONTs convertissent le signal optique en signaux électroniques compatibles aux services téléphoniques (POTS IF), aux circuits Ethernet et aux interfaces xDSL. Les buffers et la gestion du trafic (Buff. & TM) sont utilisés pour optimiser la transmission des données [55].

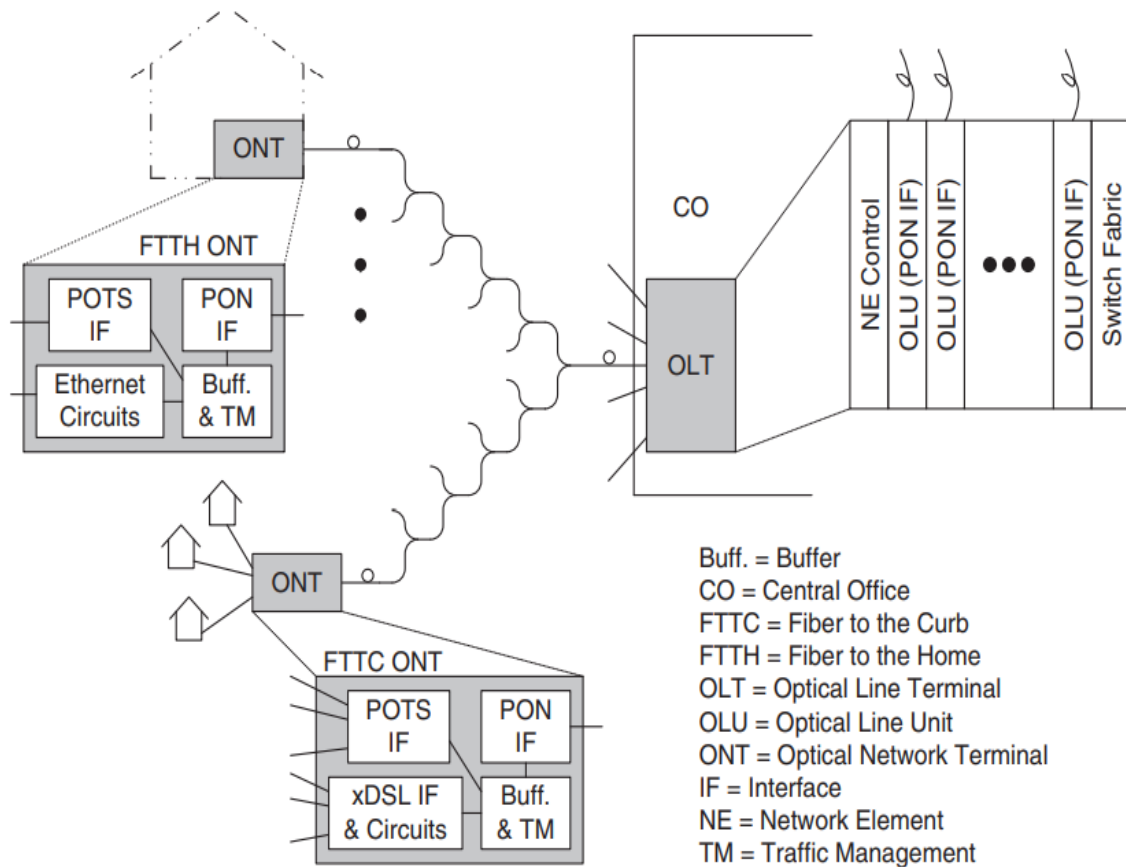


Figure II.21 Flexibilité du PON pour différentes configurations (FTTH et FTTC) [55]

C'est ainsi qu'on peut affirmer que les réseaux FTTx-PON offrent beaucoup plus d'avantages par rapport aux réseaux classiques à base de supports électriques notamment au sujet de la bande passante, du coût d'entretien, du gigantesque débit ainsi que de la fiabilité de la structure installée. En revanche, on notera quelques défis tels que le coût et la complexité du déploiement, les soucis de la réglementation et le renforcement de la sécurité du réseau même.

2.5 Conclusion

Avec ce chapitre nous avons pour but d'atteindre l'intégration de différents éléments vers un objectif commun mettre la lumière sur la connectivité haut débit et les réseaux FTTx. Cela implique que les dispositifs optiques (qu'ils soient actifs ou passifs) seront combinés ou alignés pour répondre aux différentes exigences. Nous avons donc décrit une variété d'équipements tels que des amplificateurs optiques, des coupleurs optiques, des commutateurs optiques, des répartiteurs optiques, des filtres optiques, etc. Ce qui nous a permis de conclure que ces dispositifs sont essentiels pour la transmission efficace et rapide des données à travers les réseaux optiques dans le but de diviser, multiplexer et protégé les signaux lumineux dans un réseau optique. Dans ce contexte,

les réseaux optiques plus particulièrement les FTTx-PON émergent comme une solution efficace et économique pour déployer la fibre optique jusqu'aux abonnés tout en offrant des débits nettement supérieurs et une meilleure qualité de service.

Chapitre 3 : Conception d'une ligne de protection passive à base de coupleurs optiques

Conception d'une ligne de protection passive à base de coupleurs optiques

3.1 Introduction

Ce dernier chapitre de la thèse va donc mettre en évidence les résultats de nos recherches durant la formation doctorale notamment au sujet de la protection des réseaux FTTH, plus précisément la protection de la ligne optique OLP (Optical Line Protection) lors de la transmission des données. En effet, le travail a débuté par une étude théorique des techniques de protection dites actives couramment utilisées. De ce fait, les lacunes que peuvent avoir ses méthodes ont été identifiées et par la suite, une toute nouvelle méthode qui est entièrement passive avec des résultats très prometteurs sera proposée et décrites en détails dans ce chapitre. Les performances des deux méthodes active et passive vont être testées dans un réseau qui représente une liaison multiplexée via le logiciel Optisystem afin de constater l'efficacité de la nouvelle méthode conçue par rapport à la méthode déjà utilisée et par conséquent, trancher sur le mécanisme le plus adéquat et le plus optimal pour la protection des lignes optiques pour les réseaux FTTH. Par la suite, une seconde démarche a été faite afin de valider le nouveau OLP passif, il s'agit d'un travail expérimental réalisé au niveau du laboratoire LTT.

3.2 Système de protection actif de la ligne optique

Les opérateurs qui proposent la technologie FTTH à leurs utilisateurs, rencontrent un défi majeur en ce qui concerne la continuité de leurs services car les réseaux FTTH, et d'ailleurs comme chaque réseau de télécommunications, ne sont pas à l'abri des problèmes que peuvent subir les lignes de transmission tels que les pertes de fibre optique, l'endommagement de la fibre etc.

C'est ainsi, et comme le montre la figure suivante, qu'un dispositif de protection optique appelé OLP est installé dans les deux extrémités du réseau afin de protéger les lignes montante et descendante du réseau.

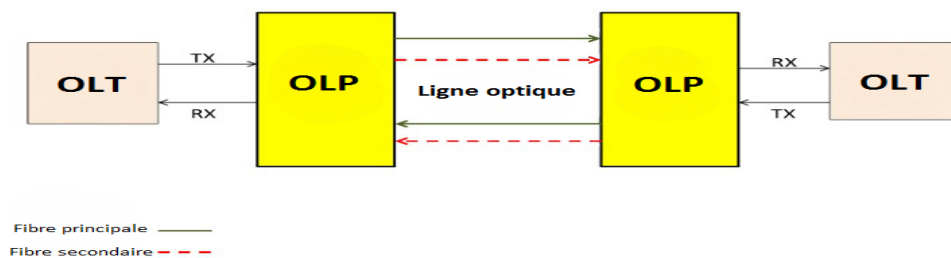


Figure III.1 Déploiement des dispositifs OLP dans un réseau optique [56]

La technique de protection qui est commercialisée par les développeurs et adoptée par les opérateurs est nommée la méthode active, ce nom vient du fait que son dispositif principal n'est autre que le commutateur optique, il existe actuellement deux méthodes de protection de la ligne optique avec des mécanismes de commutation active : la méthode OLP 1+1 et la méthode OLP 1:1[56].

3.2.1 Système OLP1 +1 double transmission, sélectivement reçu

Le système 1+1 est basé sur une double méthode de transmission car le diviseur de puissance partage le signal optique fourni par le dispositif de transmission en deux parties égales lorsqu'il traverse le dispositif OLP, une moitié servant de signal optique pour la ligne principale et l'autre pour la ligne secondaire, et une méthode de réception sélective où le commutateur va se charger de guider la réception vers la ligne adéquate : réception des données provenant de la fibre principale si aucun problème n'est signalé par les capteurs sinon le commutateur va guider la réception des données en provenance de la ligne de secours afin de maintenir le réseau en marche. Cette méthode est illustrée dans la Figure III.2: le premier étage du mécanisme de protection OLP 1+1 est le diviseur de puissance qui va desservir les deux fibres principale et de secours de la ligne descendante, le deuxième étage n'est autre que le commutateur optique.

Ce système a un total de pertes d'insertion égal à 4.2 dB au minimum selon [56] : cette valeur a été obtenue en additionnant les pertes d'insertion d'un diviseur de puissance de N sorties selon la relation (III.1), ce qui va être estimé à 3 dB, aux pertes d'insertion d'un commutateur qui est estimé à 1.2 dB.

$$3 * \log_2 N \quad (III.1)$$

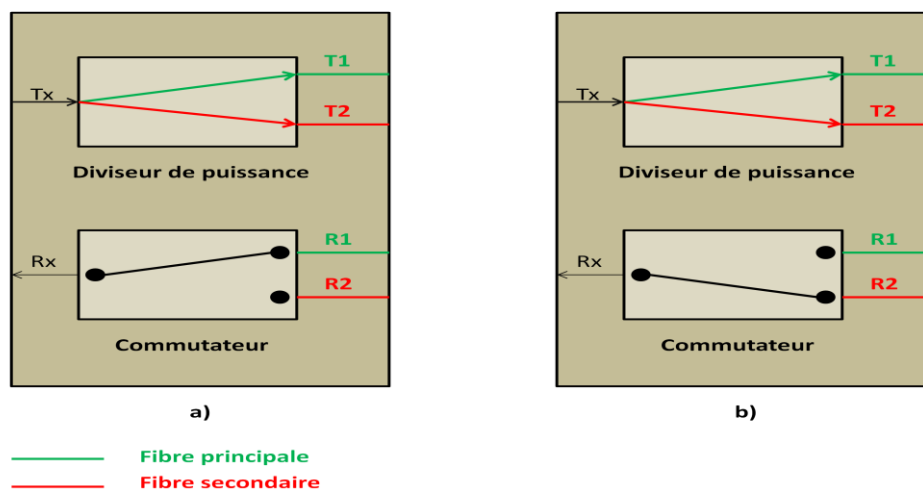


Figure III.2 a)mécanisme de protection OLP1+1 coté émission b) mécanisme de protection OLP1+1 coté réception [56]

3.2.2 Système OLP1 :1 Sélectivement transmit, Sélectivement reçu

La deuxième méthode c'est OLP 1:1 (voir Figure III.3), dans ce cas là, le diviseur de puissance est remplacé par un autre commutateur ce qui fait que ce système adopte une méthode de transmission et de réception sélective, cela signifie que l'appareil envoie et reçoit un seul signal à la fois. Lorsqu'un défaut se produit dans la fibre principale (chute de puissance du signal), le système OLP modifie la route de transmission et de réception du signal vers la ligne de secours via un commutateur optique. Ce système engendre un plus faible taux de pertes d'insertion par rapport au mécanisme précédant égal à 2.4 dB au lieu de 4.2 dB selon [56]: cette valeur a été obtenue en additionnant les pertes d'insertion des deux commutateurs ($2 * 1.2 \text{ dB}$).

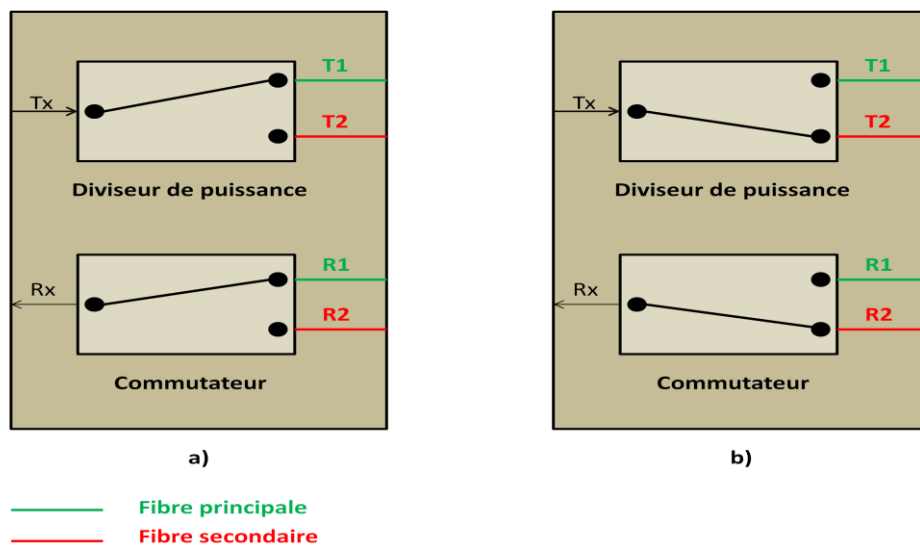


Figure III.3 a) mécanisme de protection OLP1:1 coté émission b) mécanisme de protection OLP1:1 coté réception [56]

3.2.3 Les limites des systèmes de protection actifs

L'aspect de commutation dans le cas de protection active, va considérablement avoir un impact sur les performances du réseau car en optant pour un commutateur on va perdre 50% de la puissance qui est censé être délivrer par l'une des fibres : car il est important de noter que le diviseur de puissance va répartir en deux parties égales le signal délivré par la source, une partie va être transporter par la fibre principale et l'autre par la fibre de secours jusqu'à arriver au commutateur et c'est à ce stade là qu'on va perdre la moitié du signal . On va pouvoir faire ce constat dans la partie de simulation qui va suivre. Aussi, et toujours par rapport au commutateur, switcher d'une fibre à une autre va nécessiter un contrôle externe tout en vérifiant le seuil de puissance de la fibre principale, c'est de ce fait que ce mécanisme est dits actif.

3.3 Système de protection passif de la ligne optique

3.3.1 Les coupleurs optiques (types PLC et FBT, rapport de couplage)

Cet onglet est très important lors du processus de réalisation du nouveau OLP passif, car en effet toute l'innovation réside dans le fait de remplacer le commutateur (élément actif de l'OLP 1+1) par un coupleur (dispositif passif) donc il est crucial de choisir la bonne technologie de fabrication de coupleurs afin d'avoir le meilleur des résultats.

Les coupleurs optiques ont toujours été considérés comme des composants clés dans la communication optique de part leurs fonctionnalités ainsi que de leurs propriétés, comme par exemple, le ratio ou rapport de couplage, Il est généralement exprimé en pourcentage, il indique la répartition de la puissance optique entre les différents ports de sortie du coupleur [57].

Il existe deux technologies de conception de coupleurs : la méthode conique biconique (FBT) et la méthode à circuit d'onde planaire (PLC), pour notre cas et parce que les systèmes sophistiqués comme les réseaux FTTH et plus généralement les réseaux de télécommunication à très haut débits tirent davantage profit des coupleurs PLC, on optera pour l'utilisation de ces derniers qui excellent dans les environnements exigeant une intégration dense, une grande fiabilité et une performance constante quelque soit la longueur d'onde utilisée.

3.3.2 Description du nouveau dispositif OLP passif

La protection de la ligne de transmission optique est un point très crucial pour assurer sa fiabilité, c'est pour cela que les opérateurs doivent être en mesure pour d'investir à ce sujet afin d'offrir des services de qualité à leurs utilisateurs [58]. Notre travail de recherche a débuté par une étude approfondie des systèmes de protection à base de commutateurs qui sont en cours de commercialisation, et on s'est aperçue qu'ils ne sont pas vraiment optimaux pour les applications dans des réseaux FTTH-GPON.

Le système de protection qu'on a proposé dans [58] est conçu à partir de dispositifs dits passifs, par ce terme, on sous entend la volonté de maintenir le profil totalement passif du réseau FTTH-GPON, l'innovation de notre idée consiste à proposer un dispositif OLP à base d'un coupleur en s'inspirant du modèle de protection 1+1 déjà existant dans le but de remédier aux limites des systèmes de protection actifs déjà cités au dessus.

Les dispositifs qui constituent une unité du système OLP passive sont le diviseur de puissance ainsi qu'un coupleur optique de rapport 99.9/0.1.

Tout comme la méthode de protection active illustrée à la Figure III.4, il est nécessaire d'implémenter deux unités d'OLP passives dans le réseau afin d'assurer la protection des lignes descendante et montante, garantissant ainsi la continuité du service même en cas de défaillance de la ligne principale.

Concrètement, une seule unité de protection de ligne optique fonctionne à deux niveaux. Par exemple, comme le montre la Figure III.4, dans l'OLP Unit 1, le diviseur de puissance opère au niveau de la ligne descendante, tandis que le coupleur combine les signaux de la fibre principale et de la fibre de secours pour la ligne montante. La même logique s'applique à l'OLP Unit 2, mais avec une inversion des rôles du diviseur de puissance et du coupleur.

Dans le chapitre 2, les caractéristiques d'un diviseur de puissance ont déjà été citées. En tenant en compte qu'on aura besoin d'un diviseur 1×2 où à son entrée on aura le signal optique délivré par l'OLT (coté émetteur) et à ses 2 sorties on aura 50% du signal qui va être délivré par la fibre principale et les 50% restantes vont être délivrés par la fibre de secours. Avec un tel diviseur de puissance et à partir de la relation (1) on obtiendra un taux des pertes d'insertion de l'ordre de 3 db qui va venir s'ajouté dans le bilan final des pertes du réseau optique.

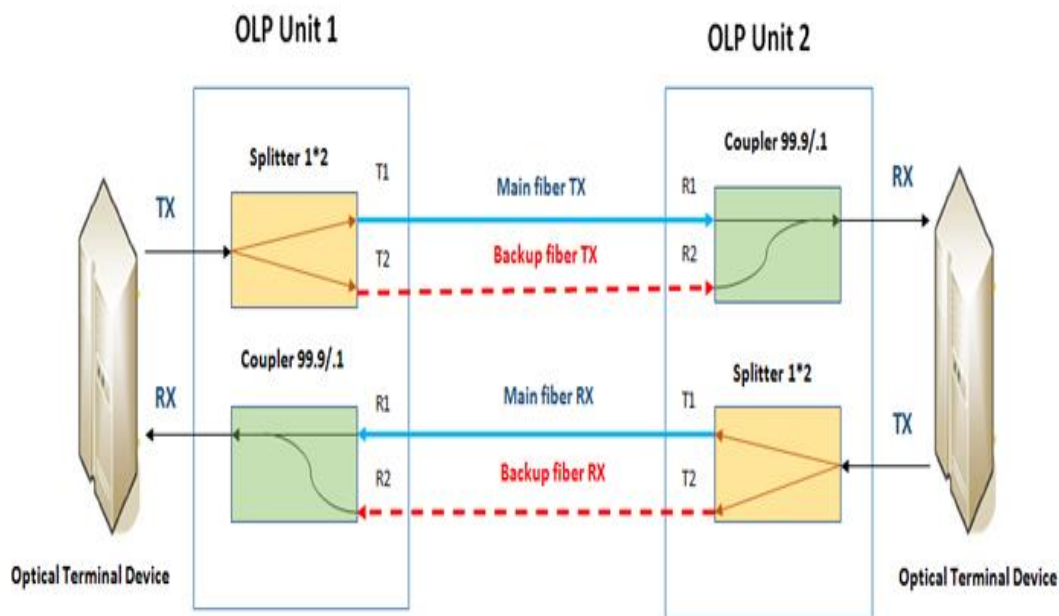


Figure III.4 Schéma théorique du système OLP passif proposé [58]

Le coupleur optique de rapport (99,9/0,1) est le dispositif clé de notre contribution, il va en effet venir remplacer le commutateur optique grâce à son mode d'opération qui est d'ailleurs assez simple comme indiqué dans [43] ainsi il va former avec le diviseur de puissance le nouveau OLP conçu: Au début de la ligne de transmission, le splitter va diviser le signal lumineux en deux signaux égaux en terme de puissance, à la fin de la ligne de transmission, le coupleur (99,9/0,1) va venir fusionner, à son entrée, les deux signaux provenant des deux fibres optiques, il est important de souligner qu'un coupleur est incapable de retarder, de modifier ou de bloquer les signaux qui le traversent. Il va uniquement diviser le signal lumineux au sein des fibres de sortie.

L'atout majeur de ce coupleur revient à son rapport de (99,9/0,1), un tel rapport n'a pas été choisi au hasard pour à la fois éviter le phénomène de la diaphonie (Crosstalk en anglais) car ces deux derniers ont une relation de Corrélation inverse ce qui veut dire que plus le ratio de couplage est élevé (une inégalité de répartition de puissance entre les ports), plus la diaphonie tend à être faible, mais aussi un tel rapport va nous permettre d'obtenir deux cas de figure :

Le premier illustré dans Figure III.5 a) où les deux fibres principale et de secours ne présentent aucun endommagement ce qui signifie que les ports 1 et 2 (ports d'entrées du coupleur) reçoivent 100% de la puissance du signal optique délivré par la fibre principale et celle de secours, cela amène le coupleur à combiner les deux puissances avec un minimum de pertes au port 4 qui mène à la fin du réseau (le port 3 n'est pas utilisé).

Le deuxième cas, montré dans Figure III.5 b), décrit la situation où un problème survient à la fibre primaire, le coupleur va donc être détourné, automatiquement sans aucun contrôle externe, 99,9% de la puissance reçue de la fibre de secours vers le port 3 selon son propre rapport de couplage, puis vers le terminal optique où bien l'extrémité du réseau. Ainsi dans tout les cas, la transmission des données ne sera pas perturbée ce qui va permettre aux opérateurs de garantir la continuité des services proposées aux utilisateurs. On pourra dire que le coupleur fait le cumul des puissances à son entrée pour la réception

Cette valeur particulière du rapport de couplage permet au coupleur de présenter une perte d'insertion de 0,2 dB [58] qui vont venir s'ajouter aux pertes du diviseur de puissance estimés à 3 dB, ce qui fait qu'une unité d'OLP passif aura au total 3,2 dB de pertes d'insertion au lieu des 4,2 dB estimés pour une unité d'OLP active. Ce qui nous fait, théoriquement, un gain de 1 dB du bilan de puissance, améliorant ainsi le rendement du réseau.

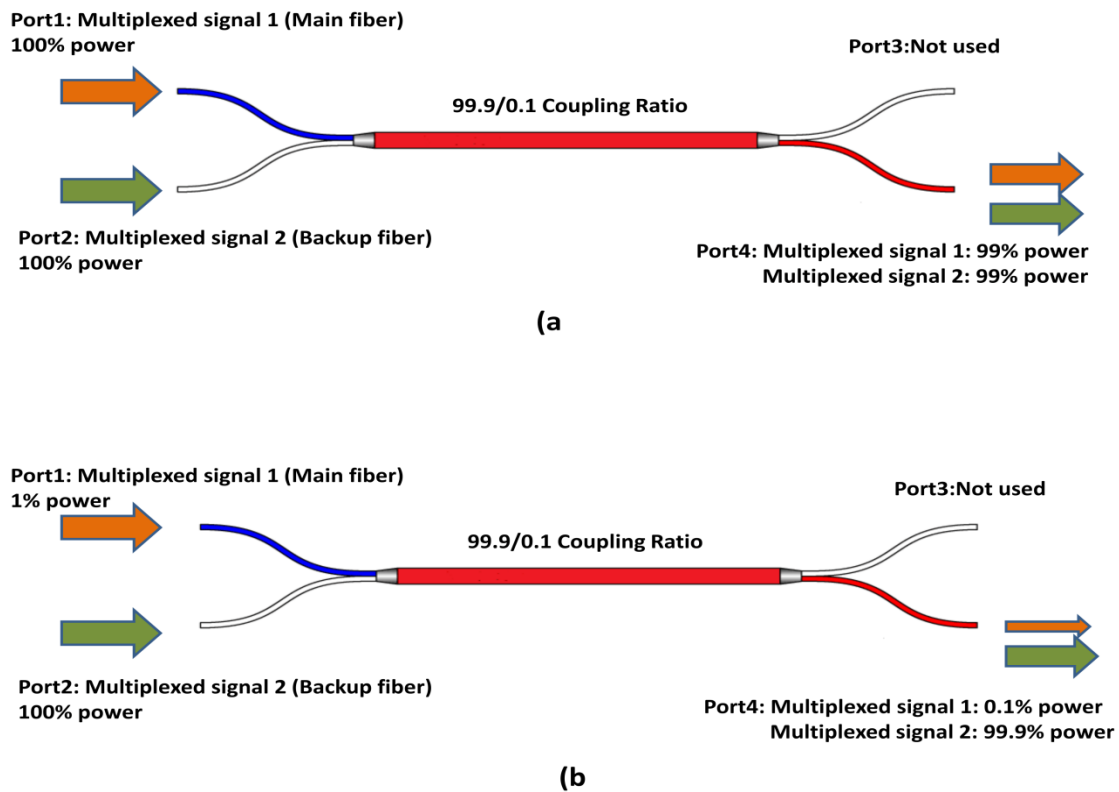


Figure III.5 a) Principe de fonctionnement du coupleur (99.9/0.1) lorsque la fibre principale et la fibre de secours fonctionnent en même temps; b) Principe de fonctionnement du coupleur fusionné (99,9/0,1) lorsque la fibre principale est en panne et que la fibre de secours fonctionne [58].

3.4 Evaluation des performances du dispositif OLP passif via simulation

3.4.1 Caractéristiques du réseau simulé

Cette partie décrit la première démarche de la validation du nouveau OLP passif ainsi que les paramètres de simulation et l'architecture du système de liaison optique fournie avec un dispositif de protection de ligne optique dans le but de se rapprocher au maximum au cas réel afin que les résultats de simulation puissent paraître logiques et prisent en compte.

L'efficacité du dispositif de protection proposé va être déterminé par la simulation d'une liaison multiplexée doté en premier lieu par le dispositif OLP actif actuellement utilisé et en second lieu on va le doté par le dispositif OLP passif nouvellement conçu. C'est ainsi qu'on va pouvoir comparer les résultats des performances des deux méthodes.

Le réseau en question, défini par la série de recommandations UIT-T G. 984.1 [59] (voir Figure III.6), qui à l'aide d'une fibre monomode de 50 km de long et avec une atténuation de 0,2 dB/km,

transmettra un signal multiplexé à 16 canaux délivré par des sources optiques (Lasers) fonctionnant dans l'intervalle de 1530– 1536 nm (la bande C) avec une puissance de 0 dBm pour chaque canal en utilisant le type de modulation directe avec un espacement spectral de 0,4 nm entre chaque longueur d'onde ce qui correspond à la technologie DWDM au lieu de la technologie CWDM dédié principalement pour la bande O dans le but de d'augmenter le nombre de canaux de 8 à 16 canaux [60]. Ce signal multiplexé transporte un débit binaire total de 2,5 $Gbps$ vers le terminal optique situé à l'autre bout du réseau ce qui implique que chaque canal à un débit de 156.25 $Mbits/s$.

Afin de simplifier le processus de simulation, seule la liaison descendante du réseau sera testée car le même mécanisme ainsi que le même constat seront noté pour la liaison montante, il est important de noter que la ligne protégée et la ligne de transport du réseau FTTH (transmission entre deux OLT).

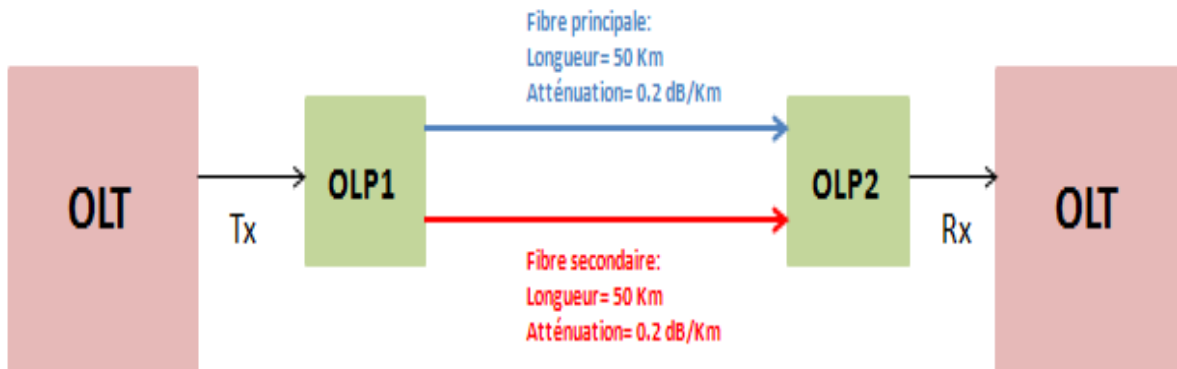


Figure III.6 Vue générale sur la liaison descendante du réseau simulé

3.4.1.1 Bloc émetteur

La Figure III.7 représente le bloc OLT coté émetteur d'où parvient le signal optique multiplexé : Le générateur de séquence pseudo aléatoire (PRBS : Pseudo-Random Bit Sequence) et le premier dispositif du bloc émetteur, la suite des bits qu'il génère est caractérisée par le terme pseudo-aléatoire : **pseudo** car il s'agit d'une suite périodique donc déterministe et **aléatoire** car chaque élément à une valeur indépendante des autres. On obtiendra à la fin une séquence de n bits avec une équiprobabilité d'apparition entre les bits « 0 » et « 1 » en fonction du débit binaire estimé à 2,5 $Gbps$.

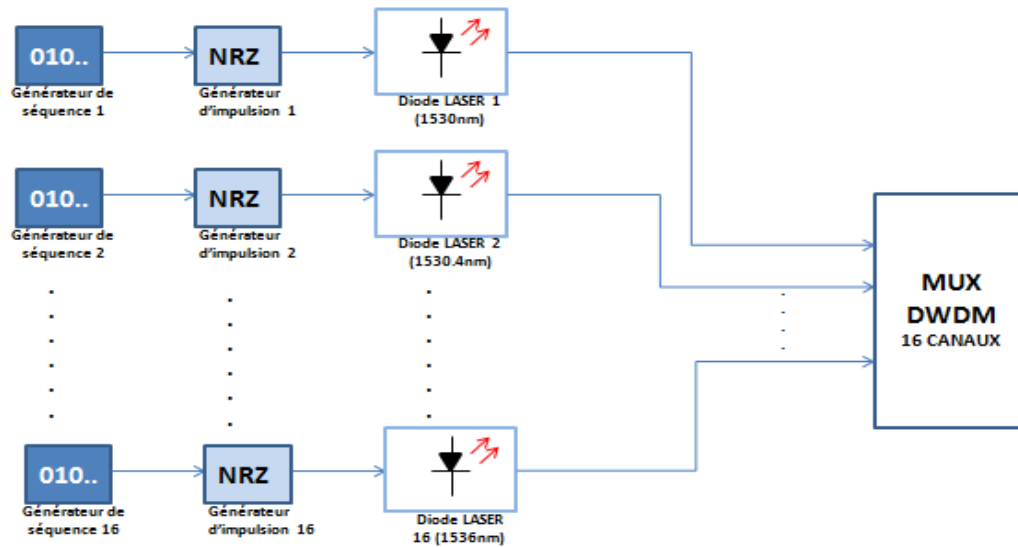


Figure III.7 Bloc OLT coté émetteur

Ensuite, la séquence est codée en NRZ (NRZ : Non Return to Zero) transformant à sa sortie la séquence binaire en un signal électrique qui est à présent prêt à être transformé en un signal optique grâce au laser dotant de la fonctionnalité de modulation directe à la longueur d'onde préalablement déterminée (dans la bande C), il est important de souligner le fait que la puissance délivrée par chaque Laser est choisie de telle sorte que la puissance optique transportée par la fibre optique n'excède pas 6 *dBm* (recommandations de ITU dans le but d'éviter les effets non linéaires). On se retrouve au final avec le signal optique d'un canal qui va être multiplexé avec les 15 autres signaux optiques avec un espacement de 0.4 *nm* (ce qui correspond au multiplexage DWDM) formant ainsi un seul signal optique qui va parvenir au second OLT après avoir parcouru le canal de transmission qui consiste au système de protection OLP ainsi que les 2 Fibres. Le signal en question est illustré dans la Figure III.8.

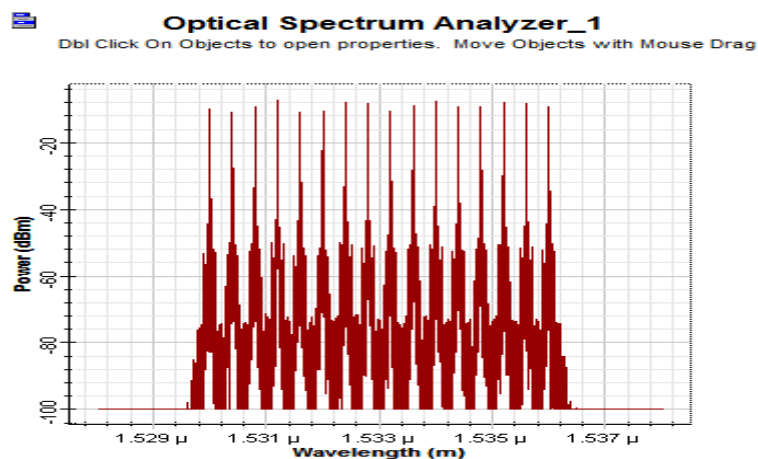


Figure III. 8 Le spectre optique émis du signal multiplexé à 16 canaux

3.4.1.2 Ligne de transmission optique

Les deux fibres optiques utilisées sont monomode (SMF) de type G652 d'une longueur estimée à $L=50\text{ Km}$, d'une atténuation minimale autour de 1550 nm estimée à 0.2 dB/km et d'une dispersion de 17 ps/nm/Km . Ces paramètres vont avoir un impact direct sur la puissance du signal qui circulera dans ce canal. Cela va être vérifié à l'aide des mesureurs de puissance optique disponible dans la bibliothèque des composants du logiciel OptiSystem.

La figure III. 9 indique le spectre reçu du signal multiplexé des 16 canaux à la fin de la ligne optique, en comparant cette figure avec la figure III.8, on constate que des interférences sont apparues ainsi qu'une atténuation de la puissance du signal de l'ordre de 10 dB , dû aux effets de la fibre optique mentionnés précédemment.

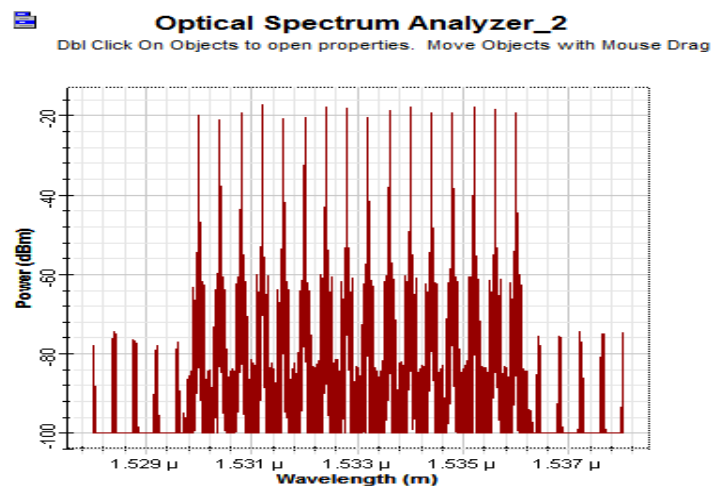


Figure III. 9 Le spectre optique reçu du signal multiplexé à 16 canaux

L'emplacement du dispositif de protection de la ligne optique sera aux deux extrémités du réseau (un au début du canal de transmission et l'autre à sa fin).

3.4.1.3 Bloc récepteur

La Figure III.10 représente le bloc OLT coté récepteur, cette figure montre l'acheminement du signal optique multiplexé d'une des fibres vers la réception, en effet un démultiplexeur et plus que nécessaire afin de réobtenir les 16 signaux du départ ensuite chaque signal va subir individuellement un filtrage par le biais d'un filtre optique de Bessel, le choix d'utiliser ce filtre s'est reposé sur plusieurs avantages qu'on pourra pas trouvé en utilisant d'autres filtres optiques principalement la réduction de l'interférences inter-symbole, avec une meilleures gestion de la distorsion temporelle et du bruit.

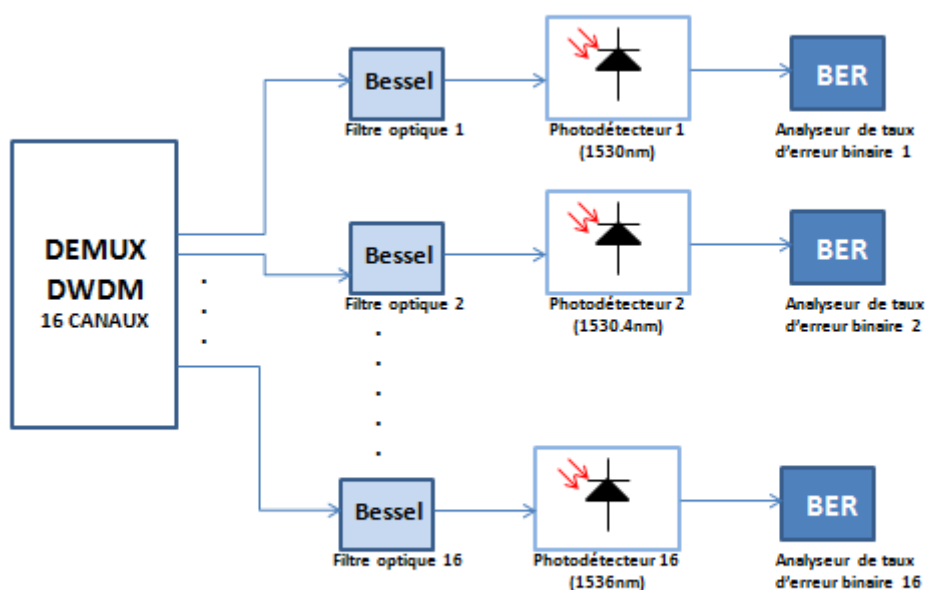


Figure III.10 Bloc OLT coté récepteur

Ces fonctionnalités sont particulièrement utiles dans les systèmes de communication optiques à haut débit et à large bande passante. Ce choix de filtre est justifié par le test de simulation suivant : On a analysé les performances de la réception du premier canal (1530 nm) avec un bloc récepteur doté d'un filtre Bessel et un autre doté du filtre Butterworth, voici les résultats obtenus :

Tableau III.1. Impact du filtre optique sur la réception d'un signal

Type du filtre optique	Taux d'erreur binaire (BER)	Facteur de qualité (Q)
Bessel	$3.14977 * 10^{-40}$	13.2227
Butterworth	$8.771 * 10^{-34}$	12.0555

D'après les résultats du tableau III.1, on se rend compte qu'effectivement Le filtre de Bessel est particulièrement adapté pour des signaux optiques multiplexés en fréquence car il minimise la distorsion temporelle et phase, améliorant ainsi la qualité du signal et les performances globales du système (BER et facteur Q). En revanche, le filtre Butterworth, bien qu'efficace pour une forte atténuation hors bande, peut introduire des distorsions de phase et d'amplitude qui impactent négativement ces métriques dans un tel contexte.

Après vient l'étape de conversion du signal lumineux en un signal électrique pour qu'au final on puisse définir la puissance du signal délivré vers les domiciles.

Les performances des systèmes de protection optique seront évaluées après simulation sous OptiSystem, en analysant les pertes d'insertion totales et en observant le comportement du réseau FTTH-PON multiplexé après l'intégration du nouvel OLP. Cette évaluation inclura notamment la mesure du taux d'erreur binaire (BER) et du facteur Q du signal multiplexé reçu à l'extrémité du réseau.

3.4.2 Simulation du système OLP actif

La figure suivante (Figure III.11) montre l'implémentation du système de protection actif. Cette figure illustre en détail l'étage de la liaison descendante avec dans la partie émission l'implémentation du diviseur de puissance 1*2 et dans le côté réception, l'implémentation d'un commutateur optique commandé par un générateur de séquence à un bit qui va avoir le rôle de faire passer la communication d'une fibre à une autre en cas de nécessité de la manière suivante : si le générateur de séquence est à 0, la transmission des données optiques sera assurée par la fibre principale et si il est à 1, ça sera donc la fibre secondaire qui va se charger de la transmission le temps que l'en régle le problème de la fibre principale tout en garantissant la continuité de service du réseau.

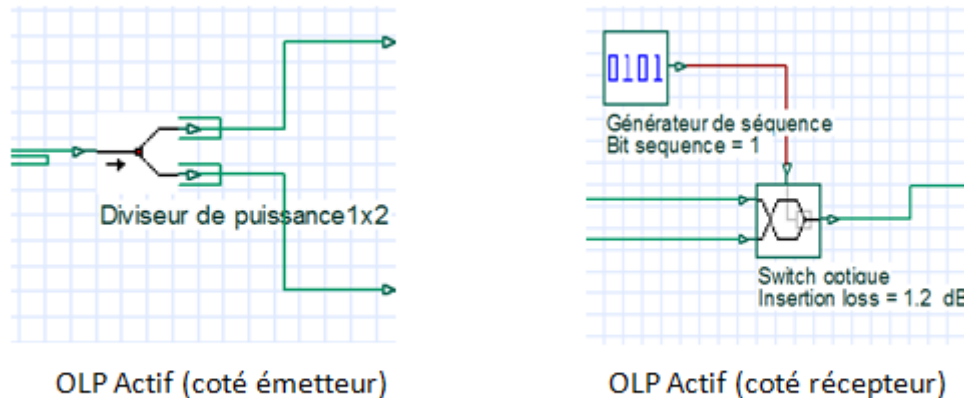


Figure III.11 Implémentation du dispositif OLP actif dans le réseau simulé

Durant cette rubrique de simulation, deux cas de figure seront reconstitués, le premier étant lorsque la fibre principale est parfaitement en marche comme dans la Figure III.11 et le second cas de figure c'est lorsque la fibre principale est complètement endommagée, ceci va être réalisé en plaçant un atténuateur juste après la fibre principale de notre réseau avec un taux d'atténuation estimé à 100dB comme indiqué dans la Figure III.12 pour s'assurer qu'aucune puissance optique venant de cette fibre ne passera vers l'OLP.

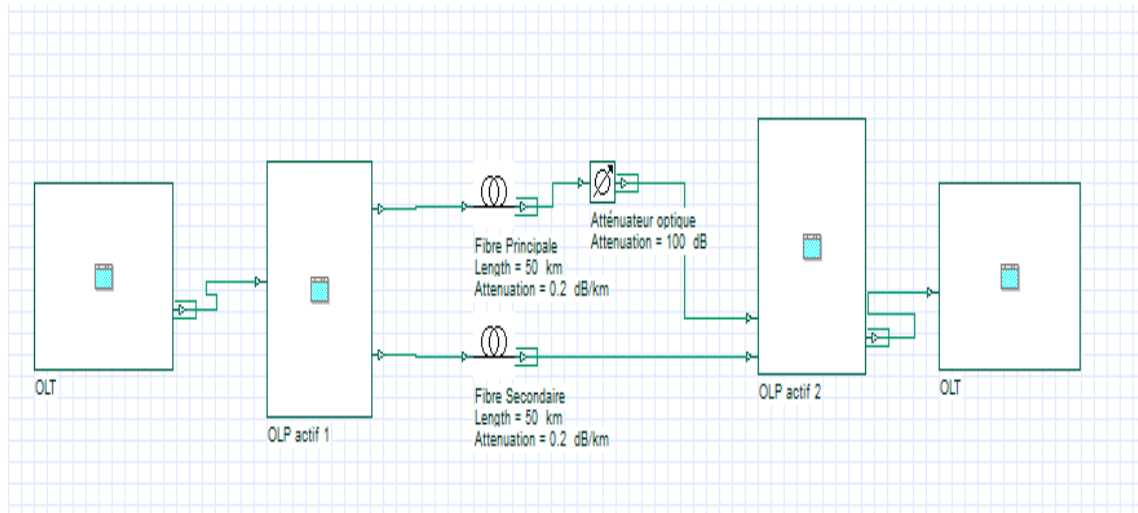


Figure III.12 Implémentation de l'atténuateur dans le réseau simulé

3.4.2.1 Résultats de simulation

Ci-dessous seront dressés tous les résultats obtenus lors de la simulation décrite précédemment via le logiciel optisystem afin de juger les performances du dispositif OLP actif.

Scénario1 : Générateur de séquence=0

Dans ce scénario, les données sont acheminées vers les utilisateurs par la fibre principale (la fibre principale ne rencontre aucun problème). Afin de déterminer l'efficacité du dispositif actif. En lançant la simulation du scénario 1 et en plaçant des mesureurs de puissance dans des endroits stratégiques du réseau : un à l'entrée du diviseur de puissance et un à sortie et un à la sortie du commutateur afin de pouvoir faire un bilan de puissance, on a obtenu les résultats suivant bien détaillé dans le tableau III.2 :

- **Le calcul des pertes d'insertion du diviseur de puissance :**

La relation suivante permet de calculer les pertes relatives à l'insertion du diviseur de puissance dans le réseau afin de les prendre en compte pour le bilan de puissance final et ainsi déterminer les performances du réseau

$$\begin{aligned} \text{Les pertes d'insertion du diviseur de puissance (dBm)} = \\ \text{la puissance mesurée à l'entrée du diviseur} - \\ \text{la puissance mesurée à la sortie du diviseur} \end{aligned}$$

On estime donc les pertes d'insertion du diviseur de puissance à **3.011 dBm**

- **Le calcul des pertes d'insertion du commutateur :**

La relation suivante permet de calculer les pertes relatives à l'insertion du commutateur dans le réseau afin de les prendre en compte pour le bilan de puissance finale et ainsi déterminer les performances du réseau :

$$\begin{aligned} & \text{Les pertes d'insertion du commutateur (dBm)} = \\ & \text{la puissance mesurée à la sortie du diviseur de puissance} - \\ & \text{(les pertes de la fibre optique)} - \text{la puissance mesurée à la sortie du commutateur} \quad (\text{III.4}) \end{aligned}$$

$$\text{Les pertes d'insertion du commutateur} = 3.325 - (50 * 0.2) + 7.87 \approx 1.2 \text{ dBm}$$

On estime donc les pertes d'insertion du commutateur à approximativement **1.2 dBm**.

Tableau III.2. Puissances mesurées dans le scénario 1

	Puissance en (W)	Puissance en (dBm)
Puissance mesurée à l'entrée du diviseur de puissance	4.301×10^{-3}	6.336
Puissance mesurée à la sortie du diviseur de puissance	2.150×10^{-3}	3.325
Puissance mesurée à la sortie du commutateur	163.288×10^{-6}	-7.870

Et en amont et grâce au BER analyzer, on a pu dresser un diagramme de l'œil (voir Figure III.13) ainsi que de quantifier la valeur du **Q factor** estimée à **12.48** ainsi que celle du **BER** estimée $4.27 * 10^{-36}$ du premier utilisateur, on obtenu des résultats presque identiques pour les 15 autres utilisateurs.

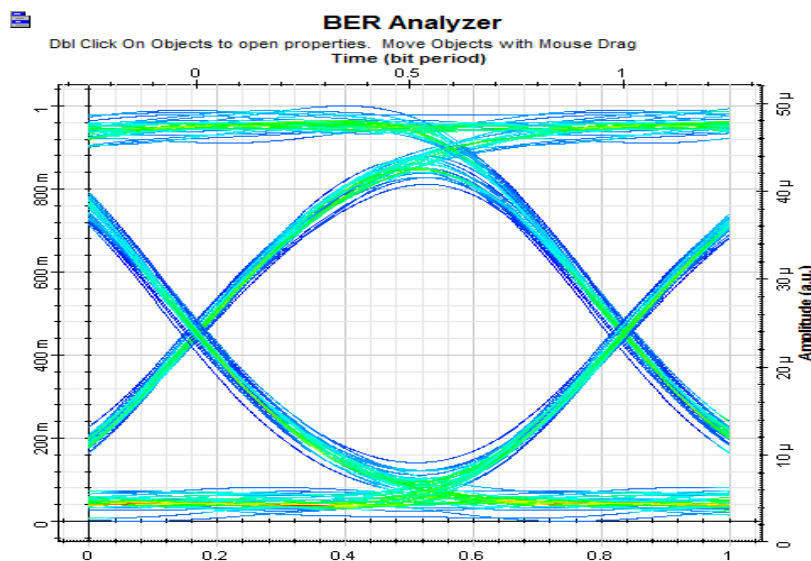


Figure III.13 Diagramme de l'œil du premier canal

Scénario2 : Générateur de séquence=1

Durant ce scénario, on a opté pour la configuration du réseau illustré dans la figure 12 afin de mettre le dispositif OLP actif sous le test tout en mettant la valeur 1 dans le générateur de séquence pour que la transmission de données se fait par la fibre secondaire car la fibre primaire est désormais endommagée à cause de l'atténuateur. En lançant la simulation, on remarque que l'on obtient Exactly les mêmes valeurs du Q factor et du BER ainsi que la même ouverture du diagramme de l'œil que celles obtenues dans le premier scénario.

3.4.3 Simulation du nouveau système OLP passif

La figure ci-dessous (Figure III.14) montre notre réseau simulé muni d'un système de protection passif. Cette figure illustre en détail l'étage de la liaison descendante avec dans le bloc d'émission l'implémentation du diviseur de puissance 1*2 et dans le coté réception, l'implémentation, cette fois ci, d'un dispositif optique passif, c'est le coupleur optique de rapport 99.9/0.1 qui n'a besoin d'aucun mécanisme de contrôle (par exemple : le générateur de séquence comme dans le cas précédant).

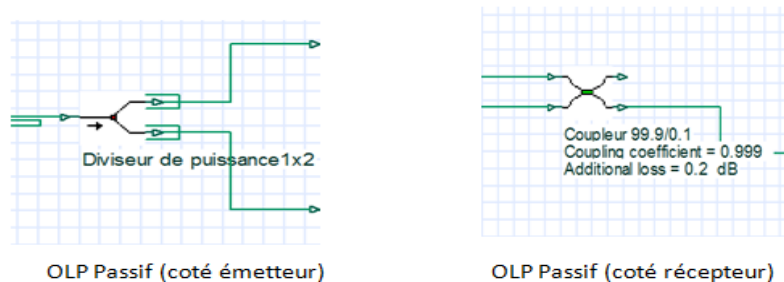


Figure III.14 Implémentation du dispositif OLP passif dans le réseau simulé

3.4.3.1 Résultats de simulation

Ci-dessous seront dressés tous les résultats obtenus lors de la simulation décrite précédemment via le logiciel optisystem afin de juger les performances du dispositif proposé.

Scénario1 :

Durant ce scénario, on a reproduit un réseau de liaison optique multiplexée qui ne rencontre aucun problème au niveau de la ligne de transmission, ce qui veut dire que les deux fibres principale et secondaire marchent simultanément. En lançant la simulation, on a obtenu les résultats affichés sur le tableau III.3, ces résultats, et d'ailleurs comme dans la rubrique du OLP actif, nous permettent

d'estimer les pertes d'insertion d'un tel dispositif sur le réseau dans lequel il est implémenté comme suit :

$$\text{Les pertes d'insertion du diviseur de puissance} = 6.336 - 3.325 = \mathbf{3.011 \text{ dBm}}$$

A cette valeur, on ajoutera la valeur des pertes d'insertion causé par l'implémentation du coupleur, ce qui fait :

$$\text{Les pertes d'insertion du coupleur (dBm)}$$

- = la puissance mesurée à la sortie du diviseur de puissance
- (les pertes de la fibre optique)
- la puissance mesurée à la sortie du coupleur

$$\begin{aligned} \text{Les pertes d'insertion du coupleur} &= 3.325 - (50 * 0.2) - (-6.875) \\ &= \mathbf{0.2 \text{ dBm}} \end{aligned}$$

Tableau III.3. Puissances mesurées dans le scénario 1

	Puissance en (W)	Puissance en (dBm)
Puissance mesurée à l'entrée du diviseur de puissance	4.301×10^{-3}	6.336
Puissance mesurée à la sortie du diviseur de puissance	2.150×10^{-3}	3.325
Puissance mesurée à la sortie du coupleur 99.9/0.1	205.36×10^{-6}	-6.875

Ce qui nous donne au final un total de pertes d'insertion du mécanisme de protection passif, et comme on l'a expliqué dans l'explication théorique, de l'ordre de **3.211 dBm** . À l'aide du BER analyzer, on a on a pu dresser un diagramme de l'œil (voir Figure III.15) ainsi que de quantifier la valeur du **Q factor** estimée à **13.22** ainsi que celle du **BER** estimée **13.15×10^{-40}** du premier utilisateur, on obtenu des résultats presque identiques pour les 15 autres canaux.

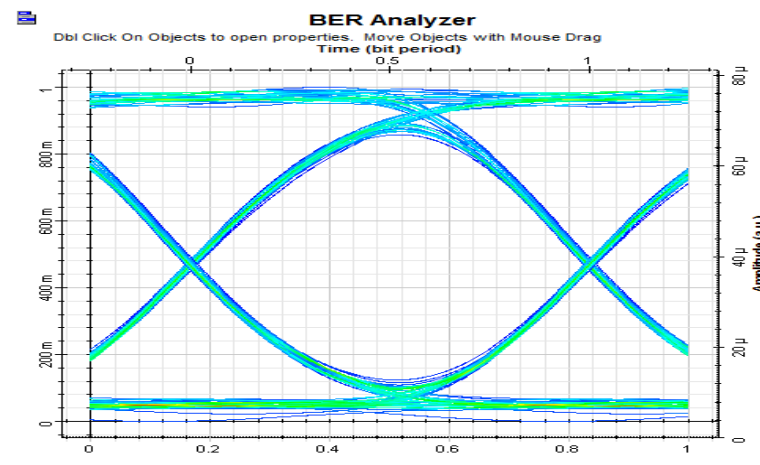


Figure III.15 Diagramme de l'œil du premier canal

Scénario2 :

C'est dans ce scénario que le dispositif OLP passif proposé sera réellement mis à l'épreuve. En installant un atténuateur, comme indiqué dans la Figure III.12, son impact sur le bilan de puissance peut être observé dans le tableau III.4 .L'atténuateur entraîne une extinction complète du signal délivré par la fibre principale, simulant ainsi une défaillance totale de celle-ci. Cependant, la puissance du signal à la sortie du coupleur reste inchangée, seul l'effet des pertes d'insertion du mécanisme OLP passif a été ressenti.

Tableau III.4. Puissances mesurées dans le scénario 2

	Puissance en (W)	Puissance en (dBm)
Puissance mesurée à l'entrée du coupleur (fibre principale)	0	-100
Puissance mesurée à l'entrée du coupleur (fibre secondaire)	2.150×10^{-6}	-6.675
Puissance mesurée à la sortie du coupleur 99.9/0.1	205.20×10^{-6}	-6.878

Au niveau du bloc récepteur, on ne constate aucun changement des performances du réseau au niveau des 16 canaux ce qui indique la continuité des services tout au long des deux scénarios malgré que seule la fibre secondaire assurée la transmission des données.

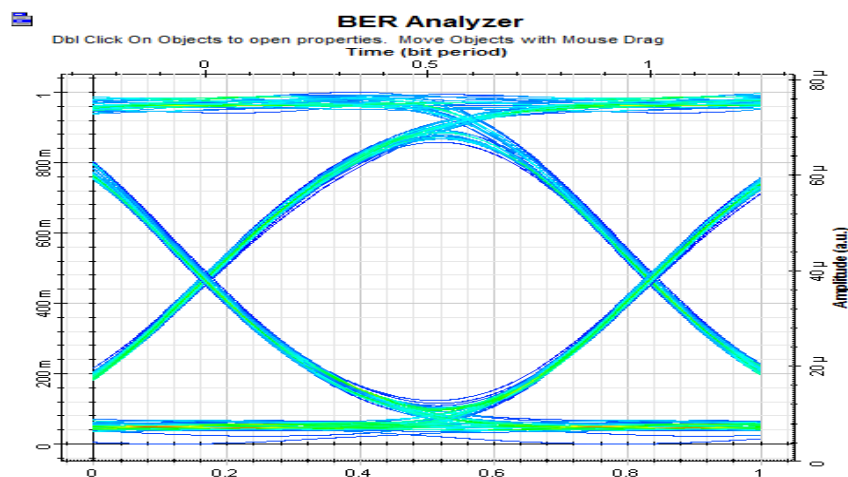


Figure III.16 Diagramme de l'œil du premier canal

3.4.4 Performances de l'OLP passif en fonction de la longueur de la ligne optique

On veut désormais constater l'impact de la longueur de la ligne optique protégée sur les performances du réseau FTTH-GPON muni de l'OLP passif nouvellement conçu, pour cela, on fait

varier la longueur des deux fibres (de 5 à 50 Km) et on a noté les valeurs du BER et du facteur de qualité ainsi que la forme du diagramme de l'œil pour le premier canal.

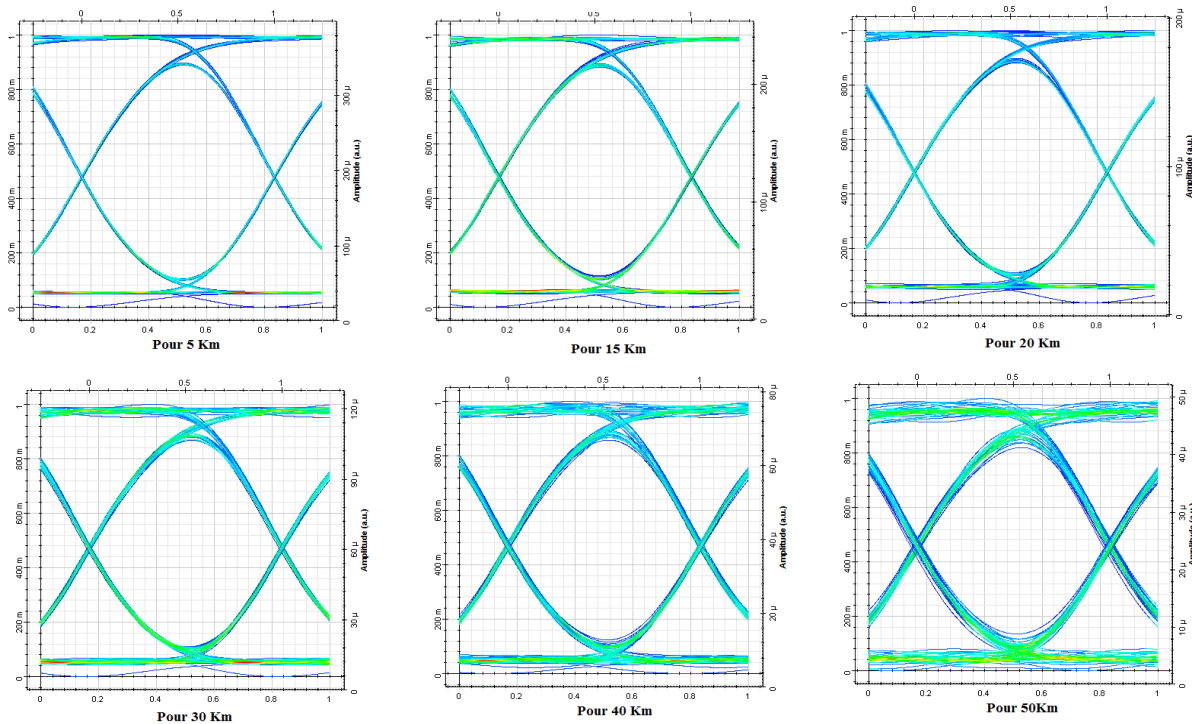


Figure III.17 L'impact de la variation de la longueur de la ligne optique sur le diagramme de l'œil

La figure III.17 présente une série de diagrammes de l'œil obtenus pour différentes distances de transmission (5 km, 15 km, 20 km, 30 km, 40 km et 50 km). Ces diagrammes sont un outil clé pour évaluer la qualité du signal optique en transmission dans un réseau FTTH. On constate que pour les courtes distances (5 km et 15 km), l'ouverture de l'œil est bien définie, indiquant un signal avec un bon rapport signal/bruit et une faible dégradation. À mesure que la distance augmente (20 km, 30 km, 40 km), l'œil commence à se refermer légèrement, illustrant une atténuation progressive et une montée du bruit. Pour 50 km, l'ouverture de l'œil est significativement réduite, suggérant une potentielle augmentation du taux d'erreurs.

Ces deux graphiques (Figure III.18 et Figure III.19) illustrent l'évolution des performances d'une ligne optique dotée d'un **mécanisme OLP passif** en fonction de la longueur de la fibre optique. Les deux métriques clés étudiées sont le **facteur de qualité (Q factor)** et le **taux d'erreur binaire (BER)**.

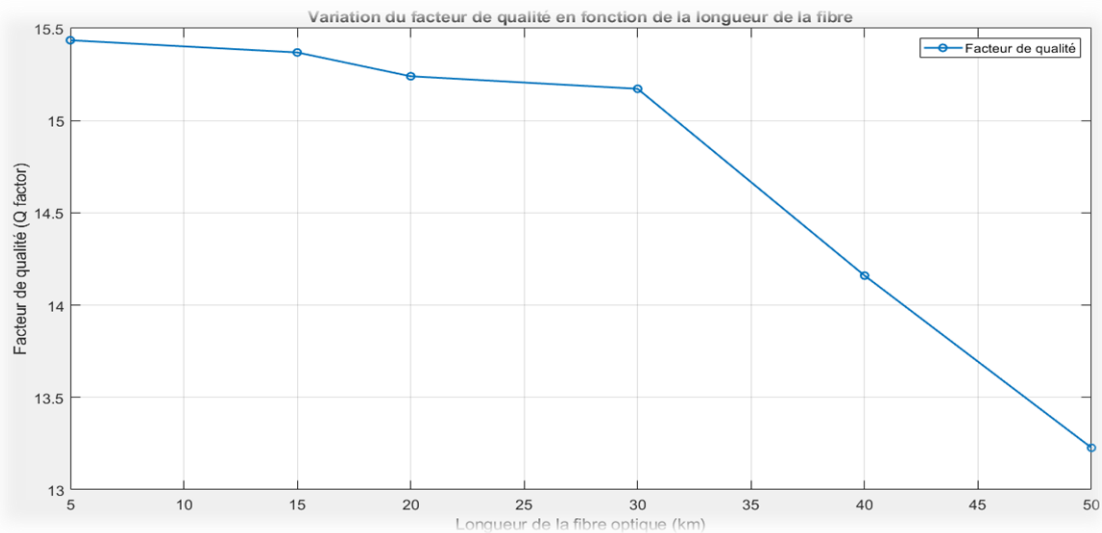


Figure III.18 Variation du facteur de qualité en fonction de la longueur de la fibre

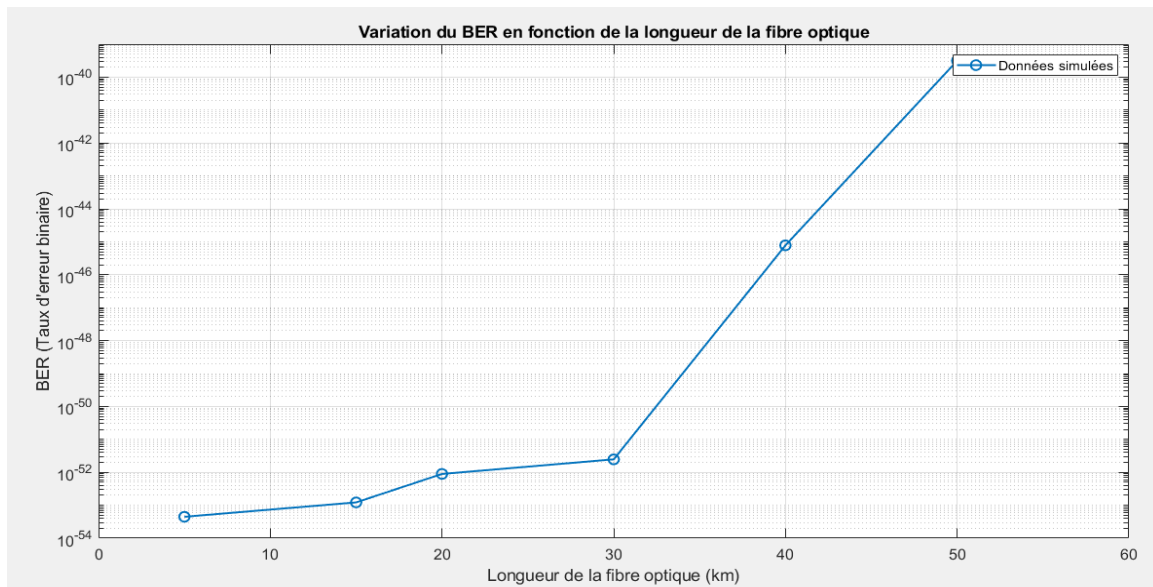


Figure III.19 Variation du BER en fonction de la longueur de la fibre

- **Analyse du facteur de qualité (Q factor) :**

Observation :

Le facteur de qualité commence à une valeur élevée (≈ 15.5) pour une courte distance (5 km).

Il diminue progressivement entre 5 km et 30 km, avec une baisse relativement modérée.

À partir de 30 km, la dégradation du facteur de qualité s'accélère nettement.

À 50 km, la valeur du Q factor chute en dessous de 13.5, indiquant une forte détérioration du signal par rapport à des distances inférieures.

Interprétation :

La baisse du Q factor est une conséquence directe des pertes de propagation et des effets de dispersion dans la fibre optique.

Jusqu'à 30 km, le système reste stable avec une qualité de transmission acceptable.

Au-delà de 30 km, l'atténuation et la dispersion chromatique impactent fortement le signal, réduisant sa qualité.

- **Analyse du BER (Bit Error Rate) :**

Observation :

Le BER est extrêmement faible ($\approx 10^{-54}$ à 10^{-52}) pour des distances inférieures à 30 km, indiquant une transmission quasi-parfaite.

Une augmentation progressive du BER est observée entre 30 km et 40 km.

Après 40 km, le BER augmente de manière exponentielle, atteignant 10^{-40} à 50 km, ce qui montre une dégradation de la transmission.

Interprétation :

Jusqu'à 30 km, le système fonctionne de manière optimale avec des erreurs négligeables.

Entre 30 et 40 km, une détérioration commence à apparaître, ce qui indique que l'atténuation et la dispersion commencent à affecter sérieusement la transmission.

Au-delà de 40 km, l'effet du BER est ressenti.

3.4.5 Discussion des résultats de simulation

Afin d'établir une analyse claire et approfondie des performances du réseau simulé, un tableau récapitulatif des résultats les plus significatifs est présenté ci-dessous. Ce tableau (Tableau III.5) met en évidence les principales métriques obtenues lors des simulations du réseau intégrant les mécanismes de protection OLP, aussi bien en mode actif que passif, pour un total de 16 canaux. Il permet ainsi de comparer l'efficacité des deux approches et d'en tirer des conclusions objectives sur leur impact respectif en termes de performances et de continuité du service.

Tableau III.5. Récapitulatif des résultats de simulation des deux mécanismes OLP passif conçu et actif

Canal	Longueurs d'onde (nm)	OLP Passif		OLP Actif	
		Q factor	BER	Q factor	BER
1	1530	13.2227	3.14977e-040	12.4875	4.2749e-036
2	1530.4	13.6675	7.56523e-043	12.9664	9.1383e-039
3	1530.8	14.0259	5.06023e-045	13.2686	1.65736e-040
4	1531.2	13.7302	3.19389e-043	12.9714	8.54396e-039
5	1531.6	13.4227	2.11209e-041	12.714	2.35893e-037
6	1532	14.3136	8.52598e-047	13.6531	9.2402e-043
7	1532.4	13.7254	3.34152e-043	13.0081	5.17308e-039
8	1532.8	14.432	1.54791e-047	13.7069	4.4247e-043
9	1533.2	14.3895	2.88056e-047	13.8087	1.08872e-043
10	1533.6	14.012	6.41107e-045	13.2407	2.50506e-040
11	1534	14.0561	3.31188e-045	13.3961	3.0103e-041
12	1534.4	13.5431	4.13657e-042	12.8098	6.90584e-038
13	1534.8	14.1368	1.09162e-045	13.4176	2.32911e-041
14	1535.2	13.5514	3.7892e-042	12.8158	6.56403e-038
15	1535.6	14.1531	8.58405e-046	13.5228	5.54496e-042
16	1536	14.5705	2.08445e-048	13.868	4.80596e-044

Ce tableau (Tableau III.5) présente une comparaison des performances de deux mécanismes d'Optical Line Protection (OLP) dans un réseau FTTH, à savoir l'OLP passif et l'OLP actif. Les performances sont évaluées à travers deux paramètres clés : le facteur de qualité (Q factor) et le taux d'erreur binaire (BER - Bit Error Rate) pour différentes longueurs d'onde.

- **Analyse des performances de l'OLP passif :**

Le facteur Q varie entre 13.22 et 14.57, ce qui indique une bonne qualité de signal sur l'ensemble des longueurs d'onde testées.

Le BER est globalement très faible, atteignant des ordres de grandeur aussi bas que 10^{-48} , ce qui témoigne d'un excellent niveau de transmission avec très peu d'erreurs.

On note que les meilleures performances (Q factor le plus élevé et BER le plus faible) se situent aux longueurs d'onde les plus élevées (1534 - 1536 nm).

- **Analyse des performances de l'OLP actif :**

Le facteur Q est légèrement inférieur à celui de l'OLP passif, variant entre 12.48 et 13.86.

Le BER est plus élevé que pour l'OLP passif, bien que restant dans des ordres de grandeur très bas, ce qui indique que la qualité du signal demeure excellente.

Une tendance générale montre que l'OLP actif offre des performances légèrement inférieures à celles de l'OLP passif en termes de qualité de signal et de taux d'erreur.

- Comparaison et interprétation globale :

Avantage de l'OLP passif : Il présente une meilleure qualité de signal (facteur Q plus élevé) et un taux d'erreur plus faible, ce qui suggère qu'il est moins sujet aux dégradations optiques.

OLP actif vs passif : Bien que l'OLP actif soit légèrement inférieure en termes de performances, il pourrait offrir d'autres avantages en matière de flexibilité, de gestion dynamique du réseau et de capacité d'adaptation aux pannes. Pour la robustesse aux variations de longueur d'onde : L'OLP passif semble plus stable et performant, notamment aux longueurs d'onde élevées.

3.5 Validation expérimentale du dispositif OLP passif

Après avoir présenté la **démarche de simulation** et analysé ses résultats, il est nécessaire de faire **test expérimental** afin de confirmer la faisabilité et la robustesse du système dans des conditions réelles. De ce fait, on a implémenté le dispositif OLP passif (mais cette fois avec un coupleur 50/50) dans un setup assez simple au niveau du laboratoire LTT de Tlemcen.

3.5.1 Mise en place du banc d'essai

La figure III.20 montre le schéma bloc du setup doté d'un OLP passif avec un coupleur de rapport de couplage 50/50, on a voulu tester un coupleur avec un rapport de couplage différent pour voir quel effet a le ratio sur le rendement du réseau optique.

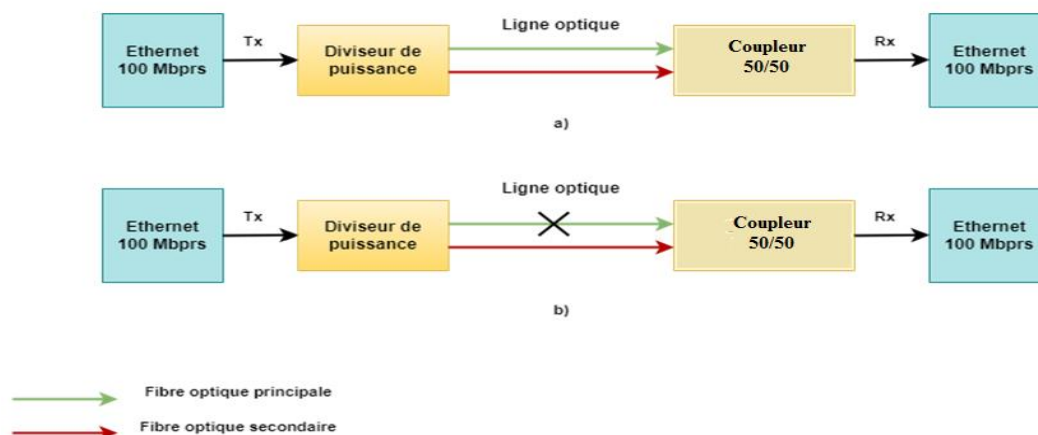


Figure III.20 Schéma bloc du test expérimental de l'OLP dans un setup optique : a) lorsque les 2 fibres fonctionnent, b) lorsque la fibre principale est endommagée

Au niveau du laboratoire LTT, on a implémenté le schéma bloc en réalité avec les dispositifs disponible au labo (Voir Figure III.21). Ce setup présente un système de protection de ligne optique passive avec les composants suivants :

- Les convertisseurs de média (situés aux extrémités) qui assurent la conversion entre les signaux électriques et optiques.
- Un diviseur de puissance qui permet de répartir le signal optique.
- Deux chemins de fibre optique distincts : une ligne principale et une ligne secondaire.
- Un coupleur 50/50 qui assure : la distribution équitable de la puissance optique entre les deux chemins et une commutation automatique en cas de défaillance d'une des lignes

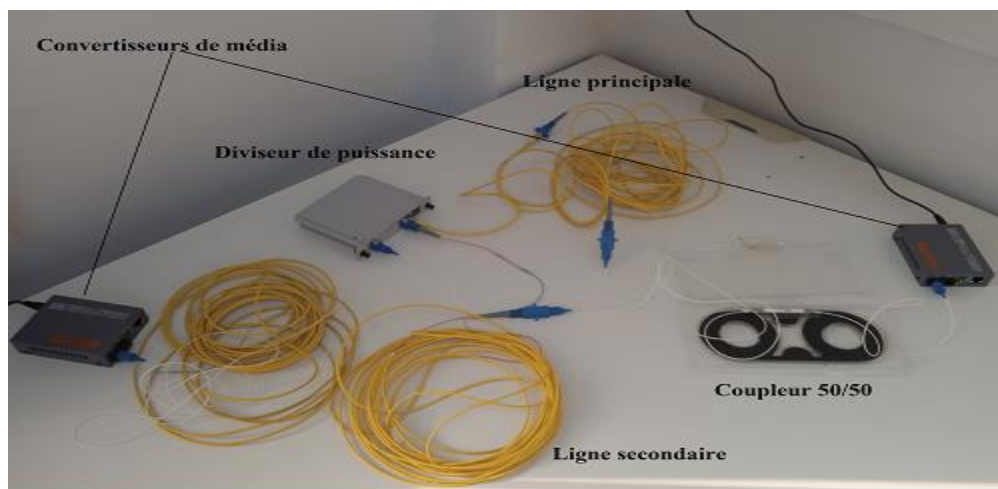


Figure III.21 Le setup optique réel doté d'un OLP passif

3.5.2 Présentation et analyse des résultats expérimentaux

Comme dans la section de simulation précédente, deux scénarios ont été mis en place pour tester l'OLP passif.

Scénario1 : Dans ce cas les deux lignes optiques marchent parfaitement, voici les mesures de puissances qu'on a noté :

Tableau III.6. Mesures de puissance du scénario 1

Mesure	Puissance (dBm)
Puissance à la sortie de la fibre principale	-9.14
Puissance à la sortie de la fibre secondaire	-10.18
Puissance à la sortie du coupleur (50/50)	-12.79

D'après les résultats du Tableau III.6, on remarque qu'au niveau de la réception on a une puissance de -12.79 dBm (qui est plutôt acceptable) mais en revanche, les voyants d'état du mode Full-duplex des deux convertisseurs de média sont éteints (Voir Figure III.22). Ceci est dû à l'effet du crosstalk car on a une symétrie au niveau des puissances à l'entrée du coupleur ($9.14 \approx -10.18 \text{ dBm}$) ce qui a créé une confusion lors de la réception dans le convertisseur de média.



Convertisseur de média(côté émetteur)



Convertisseur de média(côté récepteur)

Figure III.22 Voyants d'état des deux convertisseurs de média

Il est connu que le mode full-duplex est crucial pour les réseaux FTTH, c'est pour cette raison qu'il a fallu trouver une solution pour remédier à ce problème. On a pensé à installer un atténuateur de 8 dBm à l'entrée de la fibre principale pour créer l'asymétrie au niveau des puissances délivrées par les lignes optiques (voir figure III.23).

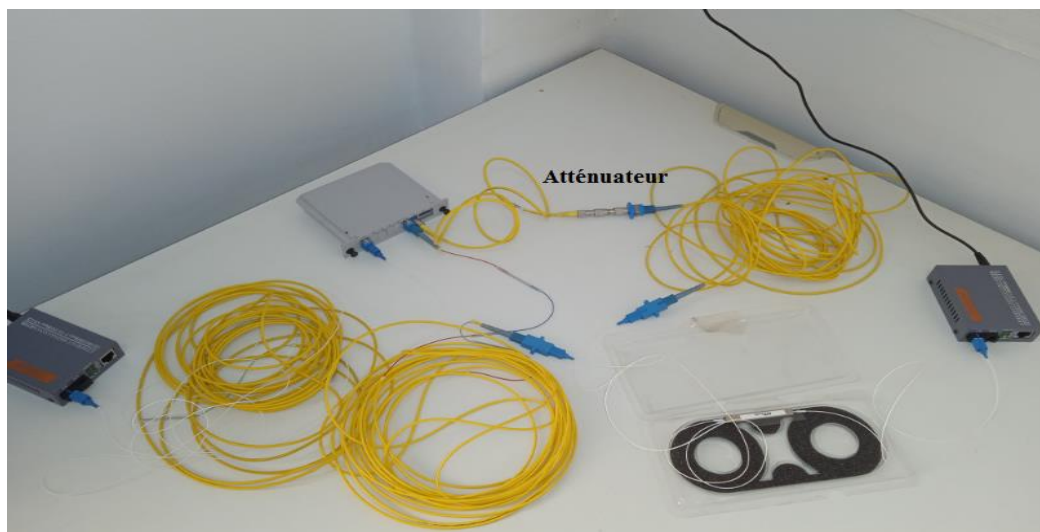


Figure III.23 Implémentation d'un atténuateur au setup

Chapitre 3 Conception d'une ligne de protection passive à base de coupleurs optiques

Cette technique, et comme le montre la figure III.24, à éliminer l'effet du crosstalk et par conséquent on a pu récupérer le mode full-duplex. Et au niveau des puissances, l'implémentation d'un atténuateur au setup n'a pas eu un impact dévastateur car (comme le montre le Tableau III.7.) on quand même eu une puissance acceptable de l'ordre de -13.43 dBm .

Tableau III.7. Mesures de puissance du scénario 1 après l'implémentation de l'atténuateur

Mesure	Puissance (dBm)
Puissance à la sortie de la fibre principale	-22.59
Puissance à la sortie de la fibre secondaire	-10.61
Puissance à la sortie du coupleur (50/50)	-13.43



Convertisseur de média(coté émetteur)



Convertisseur de média(coté récepteur)

Figure III.24 Voyants d'état des deux convertisseurs de média après l'élimination de l'effet du crosstalk

Scénario2 : Dans ce cas la fibre principale ne fonctionne pas (aucune puissance n'est délivré par la fibre principale), voici les mesures de puissances qu'on a noté :

Tableau III.8. Mesures de puissance du scénario 2

Mesure	Puissance (dBm)
Puissance à la sortie de la fibre principale	Aucune puissance
Puissance à la sortie de la fibre secondaire	-10.18
Puissance à la sortie du coupleur (50/50)	-13.70

Le tableau III.8 montre que malgré que le coupleur ne reçoit aucune puissance de la part de la fibre principale il arrive tout de même à délivrer une puissance acceptable (de l'ordre de -13.70 dBm) au convertisseur de média coté récepteur. Ce qui implique une continuité des services même dans le cas le plus extrême.

Ces mesures de puissance montrent que l'OLP passif doté d'un coupleur 50/50 peut assurer la protection du setup lorsqu'il y'a une coupure dans la ligne principale.

Distance maximale assurée par l'OLP passif :

Cet OLP est efficace pour la protection de la ligne optique jusqu'à une certaine longueur appelée **distance maximale** au delà de cette distance il va falloir penser à implémenter un amplificateur optique pour assurer le bon fonctionnement du réseau optique.

Sachant que la puissance mesurée à la sortie du convertisseur de média coté émetteur = -1.51 dBm et que la sensibilité du convertisseur de média coté récepteur = -27 dBm , le budget optique sera de l'ordre de 25.49 dBm . Puis il va falloir soustraire les pertes des composants (2 dBm des pertes des connecteurs + 6 dBm de perte du diviseur et du coupleur, le tout fois 2), on aura donc le budget optique disponible des 2 fibres de l'ordre de 17.49 dBm .

La distance maximale peut être calculée ainsi :

$$\text{Distance max} = (\text{le budget optique disponible des 2 fibres} - \text{marge de sécurité}) / \text{Coefficient linéaire de la fibre optique}$$

$$\text{Distance max} = \frac{17.49-6}{0.18} = 27\text{ Km}$$

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le processus de conception du dispositif de protection passive à base de coupleur pour les réseaux FTTH-GPON, les deux démarches faites pour valider l'OLP passif ont été décrites en détail. Les mesures de puissance à différents blocs du réseau ainsi que le taux d'erreur et le facteur de qualité ont confirmé que notre dispositif est nettement plus performant que le dispositif qui est actuellement adopté par les opérateurs sur tout les niveaux, en commençant par les pertes d'insertion de l'ordre de 3.2 dB au lieu de 4.2 dB puis le taux d'erreur binaire qui a été estimé à $3.15 * 10^{-40}$ au lieu de $4.27 * 10^{-36}$ et le facteur de qualité qui est de l'ordre de 13.22 au lieu de 12.48 . Sans oublier que l'OLP passif ne nécessite aucun contrôle externe ce qui va nous donné l'avantage de garder l'aspect passif du réseau. La deuxième démarche nous a permis de tester l'OLP passif avec un coupleur de ratio différent (50/50) sur un setup réel et de le valider sur une distance maximale de 27 Km tout en assurant l'asymétrie du niveau de puissance des

deux lignes optiques. Tous ces facteurs nous permettent d'avoir un réseau de transmission optique plus fiable, flexible et hautement sécurisé.

Conclusion générale

Les réseaux FTTH représentent une avancée très importante dans les infrastructures de télécommunication, offrant des vitesses de connexion jamais atteints, une fiabilité durable et une capacité d'évolution pour répondre aux besoins futurs en bande passante. Leur déploiement stimule forcément le développement économique et améliore la qualité de vie en facilitant l'accès aux services numériques avancés. Cependant, la mise en place de ces réseaux se heurte à des défis considérables, notamment des coûts d'installation élevés, une complexité de déploiement, le risque d'accentuation de la fracture numérique, et des enjeux de formation, de réglementation et de sécurité. Ces challenges nous ont poussé à proposer un tel thème qui propose la conception et réalisation des nouveaux dispositifs qui ne peuvent qu'améliorer le rendement de ces réseaux.

L'investissement dans les réseaux FTTH est crucial pour préparer les sociétés aux exigences de l'ère actuelle, tout en veillant à une mise en œuvre équitable et durable.

Afin de préciser le contexte dans lequel ces travaux ont été réalisés, nous avons commencé par une étude de la propagation de la lumière dans le support optique tout en détaillant les types de fibres leurs caractéristiques, leurs avantages et inconvénients. On a également fait l'état de l'art des composantes principales d'un système de transmission à fibre optique à savoir ceux du bloc émetteur et du bloc récepteur. De plus, une description sur les effets linéaires de la fibre optique limitant à la fois les distances de propagation et les débits de transmission a été présentée.

En second lieu on s'est basé sur l'étude des réseaux FTTx ainsi qu'aux différents composants, qu'ils soient actifs ou passifs, qui les constituent.

Ces ainsi qu'on a pu définir la problématique de notre thème et par la suite apporté une contribution à ce sujet.

Les travaux menés dans ce manuscrit sont penché principalement sur un des onglets de la thématique de la thèse à savoir le routage ce qui a amené à voir comme principal objectif, De prime abord, l'étude des techniques de protection de ligne optique actives pour les communications optiques hauts débits qui existent déjà (OLP 1+1 et OLP 1:1), et par la suite, de proposer notre contribution qui consiste à remplacer l'aspect actif de ces techniques par un coupleur optique de rapport de couplage 99.9/0.1 ce qui amène à avoir des OLPs plus performants et une implémentation moins complexes au sein du réseau simulé. La validation expérimentale du dispositif

OLP passif a montré l'effet du changement du rapport de couplage sur le fonctionnement du setup ainsi que la distance maximale que pourra protéger l'OLP conçu.

Comme perspectives, on prévoit d'explorer les autres aspects de la thématique de notre thèse, à savoir amélioré le rendement des dispositifs de division et de multiplexage.

Ces travaux ont été réalisés au sein du Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT) à l'Université d'Aboubakr Belkaid de Tlemcen.

Cette thèse a donné lieu à une publication et une communication scientifique :

- Hacene, I. Karim, F. Design of a novel passive optical line protection for fiber to the home networks Opto-Electronics Review 29 (2021) 33-38, DOI: 10.24425/opelre.2021.135826
- Hacene.I,Karim.F, An overview of different optical line protection technologies for fiber to the home networks, Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications (CNTA'21), Ain-Témouchent, Algérie (Conférence virtuelle), 20-21 December 2021.

Annexe

Annexe A : Le logiciel de simulation Optisystem

1. Présentation du logiciel Optisystem

Avant d'installer tout un système de communication optique complexe sur le terrain, il est quasiment primordial de le concevoir et l'analyser à l'aide d'un outil informatique qui permet de faciliter ces tâches.

Le logiciel optisystem, développé par une société canadienne Optiwave, fait partie de ces outils, en présentant virtuellement des options de conceptions, il offre la possibilité aux chercheurs, ingénieurs et étudiants de [61] :

- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation du système ;
- Obtenir un aperçu des performances de n'importe quel système optique.

1.1 Démarrer OptiSystem

Pour lancer OptiSystem, l'action suivante doit être établie : Dans le menu Démarrer, sélectionnez Programs > Optiwave Software > OptiSystem 7 >

C'est ainsi qu'une fenêtre principale, appelée interface graphique, réparti en plusieurs parties apparaît [61].

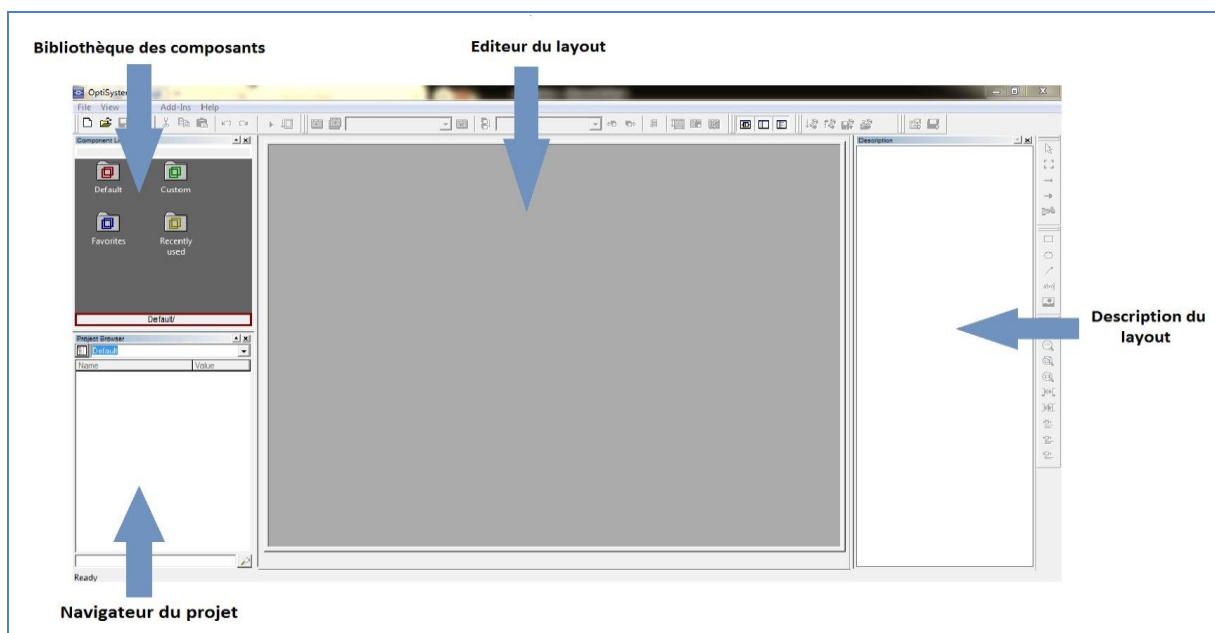


Figure A.1 Interface graphique du logiciel OptiSystem.

1.1 Principales parties de l'interface graphique

Comme il est bien indiqué dans la figure 1, L'interface graphique OptiSystem contient principalement les fenêtres suivantes [62]:

A. Editeur du projet

C'est la première fenêtre qu'on aperçoit lorsqu'on démarre optisystem, elle est le lieu dans lequel le projet est créé en insérant les composants qui le constitue. Cette fenêtre permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception, elle permet également de modifier les composants et créer des connexions entre eux.

B. Bibliothèque de composants

Ce logiciel est muni d'une bibliothèque comportant des dispositifs les plus élémentaires ainsi que des modules de traitement du signal. Elle offre donc un vaste choix de composants électriques et optiques aux utilisateurs.

C. Navigateur de projet

Lorsqu'on crée un projet assez compliqué dans optisystem, il est simple et facile d'accéder rapidement aux différents composants grâce au navigateur de projet.

D. Description du projet

Cette fenêtre permet de visualiser et d'afficher les divers fichiers et composants correspondants au projet en cours.

1.2 Créer et simuler un projet dans optisystem

La démarche à suivre pour simuler un système optique se décompose en deux étapes [63] :

- Construire le schéma bloc en faisant glisser les composants qu'on souhaite introduire dans notre système de la bibliothèque vers l'éditeur du layout à l'aide de la souris.
- Changer ou introduire des paramètres tel que le débit, la fréquence, la longueur de la liaison optique...etc. afin d'obtenir le système voulu.
- Analyser le schéma en démarrant la simulation, pour cela, il va falloir cliquer sur calculate qui se trouve dans la barre de menu (voir figure 8). Cette étape a pour but de calculer le projet tout entier ainsi que de signaler en cas d'erreur et enfin indiquer la fin de la simulation.

Références

- [1] Gerd Keiser, Fiber Optic Communications, Springer Singapore, edition 1, 639 pages, (2021),doi : <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4665-9>
- [2] Nejmeddine Frigui. Autonomic maintenance of high programmable optical access network. Networking and Internet Architecture. Thèse de Doctorat-Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2019.
- [3] Z. Abdellaoui, Y. Dieudonne, A.Aleya, Design, implementation and evaluation of a Fiber To The Home (FTTH) access network based on a Giga Passive Optical Network GPON, Array, Volume 10, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.array.2021.100058>.
- [4] R. Hui. Introduction to Fiber-Optic Communications. Pays-Bas: Elsevier Science. (2019). Doi : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805345-4.00002-0>
- [5] R. Ramaswami, K. Sivarajan & G. H. Sasaki. Propagation of Signals in Optical Fiber. Optical Networks, 47–112. (2010). doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374092-2.50010-2>
- [6] P. Schott. L. Beaudoin. Different approximations to the computation of reflected and refracted angles thanks to snell-descartes laws and fresnel coefficients. Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. doi: <https://doi.org/10.1109/igarss.2005.1526518>
- [7] Bernard C. Kress; Patrick Meyrueis. Applied Digital Optics: From Micro-optics to Nanophotonics, pp 638, (2009), <https://doi.org/10.1002/9780470022658.ch3>
- [8] Ibrahim EL MANSOURI- Sources impulsionsnelles picosecondes tout optique à très haut débit. Thèse de Doctorat- Université de Bourgogne- 2013
- [9] W. BERROUANE. Etude de conception d'une chaîne de transmission optique à très haut débit à base de semi-conducteur du type III-Nitrides. Thèse de Doctorat- Université de Djillali Liabes- 2018
- [10] Nathan Blaunstein; Shlomo Engelberg; Evgenii Krouk; Mikhail Sergeev, Light Waves in Fiber Optic Guiding Structures. Fiber Optic and Atmospheric Optical Communication, 133–140. (2019). doi: <https://doi.org/10.1002/9781119602019.ch9>
- [11] S. Addanki, I. S Amiri, & P. Yupapin. Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers. Results in Physics, 10, 743–750.(2018).

- doi:10.1016/j.rinp.2018.07.028
- [12] Sarah BENAMEUR. La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable. Thèse de Doctorat- Université de Djillali Liabes- 2015
- [13] David Massoubre. Composant Passif à Absorbants Saturables sur InP pour le Régénération Tout-Optique de Signaux à Très Hauts-Débits. Thèse de Doctorat- Physique. Université Paris Sud – Paris XI, 2006.
- [14] Weifeng Rong. Contrôle de polarisation pour la compensation de la dispersion modale de polarisation dans les transmissions optiques. Thèse de Doctorat- Télécom ParisTech, 2006.
- [15] Max Fréjus O. SANYA. Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans les métropoles de pays en développement : proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM. Thèse de Doctorat- UNIVERSITÉ DE LIMOGES, 2015.
- [16] Habeb RZAIGU, « Systèmes hybrides opto/sans fil pour les réseaux multi gigabits aux fréquences millimétriques », Thèse de doctorat-Université GRENOBLE ALPES, 2016.
- [17] Narimane HADJADJI. Contribution à l'étude des techniques et dispositifs dédiés aux réseaux de télécommunications optiques reconfigurables. Thèse de Doctorat- Université 8 Mai 1945 Guelma, 2021.
- [18] Ray Tricker. Optoelectronics and Fiber Optic Technology, newnes, 2002
- [19] W. Jiang, M. S. Lebbby. Optical Sources. Handbook of Fiber Optic Data Communication, 91–131. (2008). doi:10.1016/b978-012374216-2.50007-7.
- [20] "Sources For Fiber Optic Transmitters - LEDs And Lasers". FOA : The Fiber Optic Association, Inc. Accessed 25 February 2024. <https://www.thefoa.org/tech/ref/appln/LEDs-lasers.html>
- [21] Thi Nhung Vu. Composants optoélectroniques à faible consommation en III-V sur silicium. Thèse de Doctorat- Université Paris Saclay (COMUE), 2017.
- [22] Aida SECK. Contribution à l'optimisation des systèmes de transmission optiques cohérents ($N \times 100$ Gbit/s) utilisant le multiplexage en polarisation par des formats de modulation en phase et une conception de ligne limitant l'impact des effets non-linéaires. Thèse de Doctorat- TELECOM SUDPARIS et L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, 2014.

- [23] Hamidreza KHALEGHI. Influence des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sur la transmission cohérente de signaux optiques à format de modulation multi-porteuses (CO-OFDM). Thèse de Doctorat- UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE, 2012.
- [24] H. M. El-Hageen, P. G. Kuppusamy, A. M. Alatwi, M. Sivaram, Z. A Yasar, & A. N. Zaki Rashed. Different modulation schemes for direct and external modulators based on various laser sources. Journal of Optical Communications. (2020). doi:10.1515/joc-2020-0029.
- [25] Victor Girondin. Etude et modélisation d'un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio sur fibre de signaux ULB aux fréquences centimétriques - Simulation système et caractérisation d'une liaison radio sur fibre à modulation externe. Thèse de doctorat-Paris : L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, 2016.
- [26] Rajbir Singh, Deepak Sharma and Anjali. Radio over Fiber Performance Analysis using Mach Zehnder Modulator. International Journal of Enhanced Research in Management & Computer Applications, 2017, Vol. 6, n° 6, p. 16-25.
- [27] Hugues LE BRAS. Étude des réseaux radio sur fibre dans le contexte des réseaux d'accès et privés. Thèse de doctorat-Paris : L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, 2008.
- [28] John M. Senior, M. Yousif Jamro. Optical fiber communications : principles and practice, Pearson Education Limited, 2009.
- [29] A. Beling, & J. C. Campbell. Advances in Photodetectors and Optical Receivers. Optical Fiber Telecommunications, 99–154. (2013). doi:10.1016/b978-0-12-396958-3.00003-2
- [30] Benjamin Vest. Absorption à deux photons pour la détection infrarouge : Une alternative aux schémas classiques de détection quantique. Thèse de doctorat- Ecole Polytechnique, 2015.
- [31] B. Wang, J. Mu. High-speed Si-Ge avalanche photodiodes. Photonix 3, 8 (2022). <https://doi.org/10.1186/s43074-022-00052-6>
- [32] "Reference Guide To Fiber Optics". FOA : The Fiber Optic Association, Inc. Accessed 25 February 2024. <https://www.thefoa.org/FR/Chapitre%204>.

- [33] Jérémy Potet. Contribution à l'évolution des interfaces optiques des réseaux d'accès vers les très hauts débits. Thèse de doctorat- L'UNIVERSITÉ DE RENNES, 2023.
- [34] Simon, Jean-Claude & Joindot, Michel. (2019). Amplificateur optique à semi-conducteur. Optique Photonique. Doi :10.51257/a-v1-e7007.
- [35] Yusuf, Mohammad & Bhandari, Vijaya. (2019). Enhancement In The Gain Of EDFA In Fibre Optic Communication. 10.13140/RG.2.2.20869.50402.
- [36] MICHAEL S. BORELLA. Et al. Optical Components for WDM Lightwave Networks. PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 85, NO. 8, AUGUST 1997
- [37] C. Tsai, & J. Tsai. MEMS optical switches and interconnects. Displays, 37, 33–40. (2015). doi:10.1016/j.displa.2014.11.007
- [38] J. Farmer, B. Lane, K. Bourg, W. Wang. FTTx Networks: Technology Implementation and Operation. (2017).
- [39] Byeong-Ha Lee, Joo-Beom Eom, Kwan-Seob Park, Seong-Jun Park, and Myeong-Jin Ju, "Specialty Fiber Coupler: Fabrications and Applications," J. Opt. Soc. Korea 14, 326-332 (2010) Journal of the Optical Society of Korea Vol. 14, No. 4, December 2010, pp. 326-332 Invited Paper - 326 - DOI: 10.3807/JOSK.2010.14.4.326
- [40] Maxime Duris. Conception et réalisation de filtre optique multicouche à grand nombre de couches minces dans le domaine spectral de 0,3 à 15 μm . Matériaux. Université de Rennes, 2020. Français. ffNNT : 2020REN1S109ff. fftel-03881832f
- [41] Sébastien BIGO. Communications optiques haut débit - Conception et validation. Techniques de l'ingénieur. 2017 [doi:10.51257/a-v1-e7081](https://doi.org/10.51257/a-v1-e7081)
- [42] Samir Abbas. Dispositifs optiques passifs et actifs à base de matériaux anisotropes. Optique / photonique. Télécom Bretagne; Université de Bretagne Occidentale, 2015.
- [43] K. Dutta. Achyut. WDM Technologies. - Passive Optical Components. ACADEMIC PRESS volume.II. 2003.
- [44] Yogesh Gianchandani. Osamu Tabata. Hans Zappe. Comprehensive microsystems. Elsevier Science. 2008
- [45] C. Marxer, P. Griss, & N.F. de Rooij. A variable optical attenuator based on silicon micromechanics. IEEE Photonics Technology Letters, 11(2), 233–235. (1999). doi:10.1109/68.740714
- [46] S. Nilsson-Gustvik. Optical Fiber Theory for Communication Networks. Ericsson

- Network Technologies AB Hudiksvall Sweden. 2002.
- [47] C. F. Lam. PON Architectures Review. *Passive Optical Networks*, 19–86. (2007). doi:10.1016/b978-012373853-0.50008-x
- [48] K. Grobe. Passive Optical Networks (PONs). *Handbook of Fiber Optic Data Communication*, 131–147. (2013)doi:10.1016/b978-0-12-401673-6.00006-4
- [49] Abdulhakim Zentani, Nadiatulhuda Zulkifli, Arnidza Ramli, Network resiliency and fiber usage of Tree, Star, ring and wheel based wavelength division multiplexed passive optical network Topologies: A comparative review, *Optical Fiber Technology*, Volume 73, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103038>.
- [50] Broadband Passive Optical Networks (BPON), ITU-T Standard G.983
- [51] Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON), ITU-T Standard G.984
- [52] 10-Gigabit-Capable Passive Optical Networks (XG-PON), ITU-T Standard G.987
- [53] Jani Saheb Shaik, N R Patil. FTTH deployment options for telecom operators. Sterlite technologies.
- [54] Fabienne Saliou. Etude des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée. *Optique / photonique*. Thèse de doctorat. Télécom ParisTech, 2010
- [55] Introduction to Broadband Access Networks and Technologies. (2014). *Broadband Access*, 1–13. doi:10.1002/9781118878774.ch01
- [56] I. Hacene, F. Karim, An overview of different optical line protection technologies for fiber to the home networks, *Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications (CNTA'21)*, Ain-Témouchent, Algérie (Conférence virtuelle), 20-21 December 2021.
- [57] B. H. Lee, J. B. Eom, et al. Specialty Fiber Coupler: Fabrications and Applications. *Journal of the Optical Society of Korea*, 14(4), 326–332. (2010). doi:10.3807/josk.2010.14.4.326
- [58] I. Hacene, F. Karim. Design of a novel passive optical line protection for fiber to the home networks *Opto-Electronics Review* 29 (2021) 33-38, DOI: 10.24425/opelre.2021.135826
- [59] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (2008) Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics

- (G.984.1) , Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1>
- [60] J. P. Turkiewicz. Cost-effective $n \times 25$ Gbit/s DWDM transmission in the 1310nm wavelength domain. Optical Fiber Technology. 1 mai 2011;17(3):179-84. DOI : 10.1016/j.yofte.2011.01.010
- [61] OptiSystem Component Library, "Optical Communication System Design Software Version 9.0.0.623," Copyright © 2010 Optiwave.
- [62] OptiSystem Visual Basic Script Reference, «Optical Communication System Design Software Version 15.1.1.1155,» Copyright © 2017 Optiwave
- [63] OptiSystem Global parameters Reference Guide , "Optical Communication System Design Software Version 15.1.1.1155," Copyright © 2017 Optiwave.