الجـــــــــــــــــــــمـهـوريـــــة الجـــــــــــــزائـريـة الديمـــــــقـراطيـة الـشـــــــــعبيـة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــــــــــعـليـم العـــــــالي و البـــــــــــحث العـــــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــــامعة أبي بكـــر بـلـقـايد– تـلمســـــــــــــــان –

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Professionnalisant**
En : Télécommunications
Spécialité : Télécommunications Optiques

Par :
ABDOULAYE ABDRAMAN ADOUM
NOUALI SADIA

Sujet

DESIGN ET REALISATION D'UN NOUVEAU SYSTEME DE PROTECTION OPTIQUE À BASE D'ATTENUATEURS ET COUPLEURS

Soutenu publiquement, le 11 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

Mr. CHIKH-BLED Mohammed El-Kebir	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme. DJELTI Hamida	Maître C.A	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mr. KARIM Fethallah	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2023 / 2024

Résumé

Ce mémoire présente un travail pratique effectué au sein de l'Université de Tlemcen dans le cadre d'un projet de fin d'étude PFE. Nous avons expérimenté la conception d'un système OLP qui développe deux types de systèmes de protection optiques, un système passif et le deuxième actif. Le système passif présente une solution adéquate sans consommation d'énergie. Ce système utilise des atténuateurs pour varier le niveau de puissance entre les deux lignes pour éliminer le phénomène de Crosstalk. Dans notre cas où les émetteurs employés ont une sensibilité de -28 dBm, une atténuation de 8dB nous permis d'avoir une bonne puissance à la réception de -13,7dBm et -24,5dBm. D'autre part, l'alimentation de l'OLP active par une source externe garantit une élimination quasi parfaite du Crosstalk. Cette performance est réalisée par un switch VOA qui introduit une isolation de 41,7dB. Ces systèmes présentent de part et d'autres d'avantages et d'inconvénients.

Mots clés **: Système de protection, OLP, actif, passif, Crosstalk.**

Abstract

This dissertation presents practical work carried out at the University of Tlemcen as part of a PFE end-of-study project. We have experimented with the design of an OLP system that develops two types of optical protection systems, a passive system and the second an active system. The passive system presents an adequate solution without energy consumption. This system uses attenuators to vary the power level between the two lines to eliminate the Crosstalk phenomenon. In our case where the transmitters used have a sensitivity of -28 dBm, an attenuation of 8dB allowed us to have good reception power of -13.7dBm and -24.5dBm. On the other hand, powering the active OLP from an external source guarantees almost perfect elimination of Crosstalk. This performance is achieved by a VOA switch which introduces an isolation of 41.7dB. These systems have advantages and disadvantages on both sides.

Key words: Protection system, OLP, passive, active, Crosstalk.

ملخص

تعرض هذه المذكرة العمل التطبيقي الذي تم تنفيذه في جامعة تلمسان في إطار مشروع نهاية الدراسة . لقد قمنا بتجربة تصميم نظام حماية الخط البصري الذي يقوم بتطوير نوعين من أنظمة الحماية البصرية، النظام السلبي والثاني النشط . يقدم النظام السلبي حلاً مناسبًا دون استهلاك الطاقة . يستخدم هذا النظام المخففات لتغيير مستوى الطاقة بين الخطين للقضاء على ظاهرة التداخل . في حالتنا حيث تكون أجهزة الإرسال المستخدمة لديها حساسية 28- ديسيبل ميلي واط، أتاح لنا التخفيف بمقدار 8 ديسيبل الحصول على قوة استقبال جيدة تبلغ 13.7- ديسيبل ميلي واط و 24.5- ديسيبل ميلي واط. من ناحية أخرى، فإن تشغيل حماية الخط البصري النشط من مصدر خارجي يضمن التخلص التام تقريبًا من التداخلات . يتم تحقيق هذا الأداء من خلال مفتاح المخفف البصري المتغير الذي يقدم عز لًاقدره 41.7 ديسيبل. هذه الأنظمة لها مزايا وعيوب على كلا الجانبين.

الكلمات المفتا حية : نظام الحماية، حماية الخط البصري، النشط، السلبي، التداخل.

Remerciements

Louange à Allah le Tout puissant, qui nous a permis de réaliser ce travail.

Tout d'abord, mon sincère respect et ma gratitude vont à l'université Abou Bekr Belkhaid de Tlemcen, qui a été un cadre propice à l'épanouissement de mes aspirations académiques. Merci de m'avoir accueilli et offert l'opportunité de contribuer, à mon niveau, au rayonnement de cette institution. Votre engagement envers l'excellence et votre soutien sans faille aux étudiants ont rendu cette réalisation possible.

Nous tenons à exprimer notre plus profond remerciement au Pr. FETHALLAH KARIM, dont les conseils éclairés et le soutien constant ont été des piliers essentiels de cette aventure. Votre expertise et votre bienveillance ont non seulement guidé nos recherches, mais ont aussi inspiré notre développement intellectuel. Vous avez su nous guider avec sagesse et nous pousser à donner le meilleur de nous-mêmes. Merci pour votre encadrement exceptionnel tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont aussi aux membres de jury, le président Pr. CHIKH-BLED Mohammed El-Kebir et l'examinatrice Mme. DJELTI Hamida (Maître de Conférence A), d'avoir accepté d'examiner et de corriger ce travail.

Nous voudrions également remercier chaleureusement l'ensemble des enseignants qui ont croisé notre chemin au sein de cette université, dont l'enseignement rigoureux et la passion pour leur discipline ont nourri nos esprits critiques et notre curiosité académique. Chacun d'entre vous a apporté une pierre à l'édifice de notre formation. Merci pour les heures passées à partager avec nous vos connaissances, pour vos encouragements et pour les précieuses discussions qui ont enrichi ce parcours.

Nos remerciements vont aussi à toutes les personnes, amis, collègues, et membres de la famille qui ont contribué, de près ou de loin, que ce soit par leur soutien moral, leurs conseils avisés ou simplement par leur présence réconfortante, à l'achèvement de ce mémoire de master. Chaque geste de soutien, chaque mot d'encouragement a été une source de motivation précieuse.

Nous sommes reconnaissants envers tous ceux qui ont participé à la réussite de ce projet.

Dédicace 1

J'ai l'immense honneur de dédier ce projet de fin d'études :

A mes chers parents, en témoignage de ma gratitude, si grande qu'elle puisse être, pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon bien être et le soutien qu'ils m'ont prodigué tout le long de mon éducation.

Que Dieu, le tout puissant, les préserve et les procure santé et longue vie.

A mon grand-père, ma grand-mère, ma sœur et mes frères,

Pour leur encouragement et leur bonté qu'ils m'ont accordé, j'exprime ma profonde reconnaissance et mon grand respect.

A mon binôme Abdoulaye Abdraman.

A tous les professeurs qui m'ont enseigne tout au long de mon parcours.

À toute la promotion M2 : Télécommunications optique.

A tous ceux qui m'aiment, A tous ceux que j'aime.

Nouali Sadia

Dédicaces 2

À ma mère HADJE ZENABA MAHAMAT et mon père ABDRAMAN ADOUM GARBA.

Mes chers parents, permettez-moi de vous exprimer par ces mots ma gratitude, mon admiration et la fierté que je ressens envers vous. Votre amour, votre sagesse et vos sacrifices ont tracé le chemin que je suis aujourd'hui. Votre héritage de courage et de détermination m'a inspiré chaque jour à persévérer et à viser l'excellence. Vous m'avez montré la valeur du travail acharné, de la persévérance et de l'intégrité. Maman, Papa, quoi que je dise ne suffira jamais pour exprimer ce que vous nous avez accompli. Qu'Allah nous donne la grâce et la force de prendre soin de vous comme vous l'avez fait pour nous. Vous restez à jamais dans mon cœur et vos enseignements me guident à chaque étape de ma vie.

À mes grands-parents, bien que vous ne soyez plus parmi nous, votre héritage de courage et de résilience continue de m'inspirer chaque jour. Je vous porte tous dans mon cœur et vos esprits éclairent mon chemin.

À mes frères ADOUM, ABOUBAKAR, MAHAMAT et à mes sœurs MARIAM, SALMA, SALIMA et FATIME.

Vous êtes mes confidents, mes compagnons et mes plus grands soutiens. Votre soutien indéfectible et votre encouragement constant ont été mes piliers de force. Ensemble, nous avons partagé des moments de joie, surmonté des défis et construit des souvenirs inestimables. Chacun de vous a laissé une empreinte indélébile dans mon cœur et mon esprit. Je vous suis infiniment reconnaissant pour votre présence et votre amour.

À mon binôme NOUALI SDIA.

Ta collaboration et ton soutien inestimable ont été une source constante d'inspiration. Ensemble, nous avons surmonté de nombreux défis et célébré de grandes victoires.

À vous tous, aujourd'hui, je vous dédie ce travail, fruit de notre collaboration et de notre persévérance, avec toute ma gratitude et mon affection. Chaque étape, chaque défi relevé, a été rendu possible grâce à notre engagement mutuel et à notre soutien réciproque.

Mais le meilleur reste à venir. Je suis convaincu que nous avons encore de nombreuses réussites à célébrer ensemble et que nos efforts continueront à porter leurs fruits.

Avec toute mon estime et ma considération :

ABDOULAYE ABRAMAN GARBA

Table des matières

Résumé……...……i
Remerciement……..……..ii
Dédicaces……...…...……iii
Table des matières…….....…v
Liste des figures……..……viii
Introduction générale ……x
Chapitre I 1
I.1 Introduction 1
I.2 Notion fondamentale de l'optique 1
I.2.1 Les ondes électromagnétiques 1
I.2.2 La lumière 2
I.2.1 Lois fondamentales de l'optique 3
I.3 Fibre optique 5
I.3.1 Définition 5
I.3.2 Bref Historique 5
I.3.3 Structure de la fibre optique 5
I.3.4 Bande de transmission 6
I.3.5 Fenêtre optique 6
I.3.6 Caractéristiques géométriques de la fibre 6
I.3.7 Catégories de fibres optiques 8
I.3.8 Caractéristiques optiques d'une fibre 9
I.4 Avantages et inconvénients de la fibre 18
I.4.1 Avantage de la fibre 18
I.4.2 Inconvénients de la fibre optique 19
I.5 Quelques fibres optiques d'application 19
I.6 Conclusion 19
Chapitre II 20
II.1 Introduction 20
II.2 Système de transmission optique 20
II.2.1 Définition 20
II.2.2 Architecture d'une ligne de transmission optique 20
II.3 Emetteurs optiques 21

II.3.1 Concept de semi-conducteurs 21
II.3.2 Principe d'émission de la lumière 22
II.3.3 Diode électroluminescente LED 23
II.3.4 Diode Laser 25
II.4 Photodétecteur 27
II.4.1 Structure de Photodiodes 27
II.4.2 Efficacité quantique 28
II.4.3 Sensibilité 28
II.4.4 Condition de détection 28
II.5 Small Factor Form Pluggable (SFP) 28
II.5.1 Types de SFP 29
II.5.2 Longueurs d'ondes de fonctionnement 29
II.5.3 SFP et leurs applications 29
II.6 Amplificateurs optiques 30
II.6.1 Amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA) 30
II.6.2 Amplificateurs optiques à semi-conducteurs 31
II.6.3 Amplificateur de Raman 31
II.6.4 Comparaison de différents amplificateurs 32
II.7 Multiplexage optique 32
II.7.1 Wavelength Division Multiple Access WDMA 33
II.7.2 Time Division Multiple Access TDMA 33
II.7.3 Multiplexeur OADM 34
II.8 Modulation numérique 36
II.8.1 Modulation d'amplitude ASK 36
II.8.2 Modulation de phase QPSK 37
II.8.3 Modulation d'amplitude a Quadrature 38
II.9 Filtres Optiques 40
II.9.1 Filtre de Bragg à trois ports 40
II.9.2 Filtre FWDM 41
II.10 Routage optique 42
II.11 Conclusion 43
Chapitre III 44
III.1 Introduction 44

III.2 Présentation des systèmes des protections optiques 44
III.2.1 Architectures des réseaux PON sécurisées par un système OLP 44
III.2.2 Protection des réseaux PON 45
III.2.3 Système de protection par SFO 49
III.2.4 Protection par satellite 49
III.2.5 Protection par multi-trajets 52
III.3 Design d'un nouveau système de protection OLP 52
III.3.1 Prise en main de logiciels d'analyse 53
III.3.2 Design d'un système de protection active 54
III.3.3 Design d'un système de protection passif 61
III.3.4 Synthèse d'analyse 66
III.4 Conclusion 66
Conclusion générale 67
Liste d'abréviations 69
Références 69

Liste des figures

Figure I.1 : Répartition du rayonnement électromagnétique par λ, ν et E [2]. 2
Figure I.2 : Déplacement d'un rayon lumineux d'un milieu a un autre 4
Figure I.3 : Structure de la fibre optique 5
Figure I.4 : Fenêtres optiques de transmission 6
Figure I.5 : Propagation de la lumière dans la fibre 7
Figure I.6 : Structure d'une fibre monomode 8
Figure I.7 : Structure d'une fibre a sut d'indice 8
Figure I.8 : Propagation de la lumières sur la fibre à saut d'indice 9
Figure I.9 : Représentation des 4 premiers modes de propagation [7] 9
Figure I.10 : L'évolution de l'intensité lumineuse par rapport au diamètre du cœur 10
Figure I.11 : Diagramme d'une ligne optique 11
Figure I.12 : Connexion différent polissage de férule 11
Figure I.13 : Alignement par différent diamètre du cœur 11
Figure I.14 : Désalignement longitudinal 12
Figure I.15: Désalignement par MFD 12
Figure I.16 : Désalignement axial 13
Figure I.17 : Désalignement angulaire 13
Figure I.18 : Schéma de Macro courbure 14
Figure I.19 : Pertes due à la réflexion de Fresnel 14
Figure I.20 : Alignement d'un laser en espace libre 15
Figure I.21 : Effet de la dispersion sur d'un signal optique 15
Figure I.22 : Variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde 16
Figure I.23 : Dispersion modale 17
Figure I.24 : Schéma d'une liaison optique avec DCF 18
Figure II.1 : Schéma d'une ligne de transmission optique 21
Figure II.2 : Phénomènes a) d'absorption; b) d'émission spontanée c) émission stimulée 22
Figure II.3 : a) Structure d'une jonction P-N ; b) Structure d'une LED 23
Figure II.4 : Spectre d'émission d'une LED fonctionnant sur 520nm [13] 24
Figure II.5 : Fonctionnement d'un Laser 25
Figure II.6 : Evolution du courant en fonction de la puissance 26
Figure II.7 : Structure d'un laser à arséniure de gallium [16] 26
Figure II.8 : Schéma d'une photodiode a) structure interne b) structure externe 27
Figure II.9 : Schéma représentatif d'une SFP 29
Figure II.10 : Effet d'amplification sur un signal 30
Figure II.11 : Structure d'EDFA 30
Figure II.12 : Schéma d'un SOA a)structure interne ; b) structure externe 31
Figure II.13 : Structure d'amplificateur de Raman Discret 31
Figure II.14 : Technique de multiplexage 32
Figure II.15 : Multiplexage WDM 33
Figure II.16 : a) TDMA à assignement fixe, b) TDMA à commutation de paquets 34
Figure II.17 : Circulateurs optiques a insertion extraction 35

Figure II.18 : a) Concept d'un simple OADM, b) OADM passive modulaire extensible 36
Figure II.19 : Principe de génération de signal ASK b) Signal information c) Signal modulé ASK 37
Figure II.20 : Digramme de constellation 37
Figure II.21 : a) Modulateur QPSK ; a)Signal modulé QPSK 38
Figure II.22 : Schéma de modulateur QAM 38
Figure II.23 : a) Diagramme de Constellation; b) Signal modulé 8-QAM 39
Figure II.24 : Structure d'un réseau de Bragg FBG 40
Figure II.25 : Filtre FBG à trois ports 41
Figure II.26 : Schéma de FWDM a) Structure interne b) Structure externe 41
Figure II.27 : Architecture WRON [23] 42
Figure III.1 : Architecture de base d'un réseau PON, a) avec un seul niveau de division, b) avec plusieurs niveau de division [23] 45
Figure III.2 : a) Protection de type A, b) Diagramme de blocs de fiabilité [26] 46
Figure III.3 : a) Schéma Protection 1+1, b) Diagramme de blocs de fiabilité [24] 47
Figure III.4 : a) code réseau statique contre une panne de lien unique b) model XOR 48
Figure III.5 : Architecture d'un système de protection en anneau [26] 48
Figure III.6 : Architecture d'un système de protection par FSO [27] 49
Figure III.7 : Architecture de protection basée sur GEO ; a) Communication sans assistance de protection b) Communication spatial laser de protection [28] 50
Figure III.8 : Architecture de protection multi-chemin a) sans compression b) avec compression [29] 52
Figure III.9 : Architecture proposée 53
Figure III.10 : Interface Roadkil's. a) connexion a l'appareil distance ; b) Echange de donnés 53
Figure III.11 : Interface du logiciel Dukto 54
Figure III.12 : Architecture d'OLP actif 55
Figure III.13 : a) Structure du VOA [Thorlabs], b) schéma du Switch VOA 56
Figure III.14 : Media converter 57
Figure III.15 : SFP à port a) Dual b) Bidi 57
Figure III.16 : Schéma synoptique de système simulé 58
Figure III.17 : a) Données en cours d'envoie, b) Débit Ethernet de la liaison 60
Figure III.18 : Architecture du système de protection passif à base des splitter 99/1 62
Figure III.19 : Schéma du système de protection passif à base des atténuateurs 63
.....
Figure III.20 : Schéma synoptique d'OLP passif simulé 63
Figure III.21 : Liaison avec ligne de secours déconnectée 65

Introduction générale

Les systèmes de télécommunications optiques mettent en jeu un ensemble d'éléments, à commencer par les composants d'émission/réception de la lumière, le support de propagation qu'est la fibre optique, les amplificateurs optiques, ainsi que les composants spécifiques de multiplexage. À ces fonctions purement optiques et/ou optoélectroniques s'ajoutent des circuits électroniques rapides permettant de moduler et d'amplifier les signaux émis et recueillis, de récupérer les signaux de référence, ainsi que des organes de haut niveau de gestion du réseau [1]. Cependant, en assurant la protection de ces systèmes avec des mécanismes sophistiqués, ces technologies permettent aux réseaux de rester opérationnels même dans des conditions adverses, assurant ainsi une connectivité continue et sécurisée pour une gamme diversifiée d'applications, allant des communications commerciales aux opérations critiques des infrastructures essentielles.

Le système de protection optique (OLP) est une ligne de protection ou de secours dédiée à un réseau de télécommunication optique pour assurer la redondance et la continuité de service en cas de défaillance d'une ligne principale. Ainsi, il garanti une connectivité robuste et sécurisée du réseau. Il peut être caractérisé par sa redondance du chemin, gestion de surveillance, la détection de la défaillance et commutation automatique (ou manuelle), et une compatibilité et flexibilité aux divers types de réseaux.

Ce mémoire est divisé en trois(3) chapitres. Le premier chapitre porte sur les généralités sur la fibre optique. Dans ce chapitre, nous dégageons les caractéristiques fondamentales de la fibre ainsi que le principe de propagation de la lumière dans la fibre. Le deuxième chapitre énumère les dispositifs optiques qui sont indispensables dans une chaine de transmission optique. En fin dans le troisième chapitre nous nous allons dans un premier temps énoncé les architectures de protection OLP existantes et en suite concevoir un nouveau système de protection qui se subdivise en deux sous système : OLP actif et OLP passif.

Chapitre I

Généralités sur la fibre optique

I.1 Introduction

Indispensables depuis leur apparition aux années 70, la fibre optique joue un rôle crucial dans les fonctionnements des réseaux de télécommunications modernes. Depuis l'avènement de la fibre optique, ces systèmes ont révolutionné la manière dont les données sont transmises sur de longues distances avec une rapidité et une fiabilité sans précédent. Ainsi, pour comprendre la notion de transfert des données dans ce domaine, il est primordial de comprendre les phénomènes de la lumière établis par l'optique. Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps établir les connaissances préalables de phénomènes lumineux, ensuite dégager une généralité sur la fibre optique.

I.2 Notion fondamentale de l'optique

L'optique est une branche de la physique qui étudie le comportement et les propriétés de la lumière ainsi que ses interactions avec la matière. Elle se divise en deux grandes catégories : l'optique géométrique et l'optique physique.

L'optique physique, également appelée optique ondulatoire, explore les propriétés ondulatoires de la lumière, telles que les phénomènes de diffraction, d'interférence et de polarisation. Elle étudie également les interactions entre la lumière et la matière à l'échelle atomique et moléculaire.

Quant à l'optique géométrique, elle se concentre sur la description du comportement de la lumière en utilisant des modèles simplifiés basés sur des rayons lumineux et des lois telles que la loi de Snell-Descartes.

I.2.1 Les ondes électromagnétiques

Le rayonnement électromagnétique peut se décrire comme une onde électromagnétique s'étendant sur plusieurs longueurs d'ondes allant des ondes radio (très longue longueur d'onde) aux rayons gamma (très courte longueur d'onde). Elles correspondent à des fréquences et d'énergies de propagation des corps corpusculaires tels que les photons, voir figure I.1.

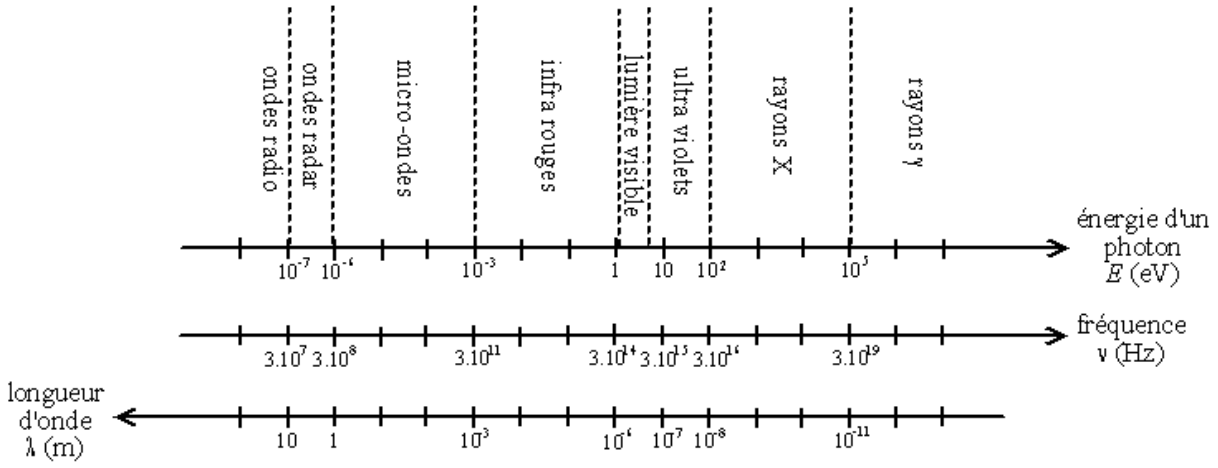


Figure I.1 : Répartition du rayonnement électromagnétique par λ, ν et E [2].

I.2.2 La lumière

Présentant à la fois des caractéristiques ondulatoires et corpusculaires, la lumière est une forme d'énergie électromagnétique visible par l'œil humain. Elle peut être décrite par ses propriétés telles que la longueur d'onde, la fréquence, l'intensité et la polarisation.

I.2.2.1 L'indice de réfraction

La lumière se comporte différemment lorsqu'elle interagit avec la matière. Elle peut être réfléchie, réfractée, absorbée ou diffusée en fonction des propriétés optiques du matériau rencontré. L'un de ces acteurs majeurs est l'indice de réfraction noté *n*. Constante sans unité et propre à chaque corps ou milieu, l'indice de réfraction dans le vide a une valeur notée n_0 et est égale à un (n_0=1).

I.2.2.2 La vitesse de la lumière

La lumière se propage sous forme de particules élémentaires appelées photons, qui sont dépourvus de masse et se déplacent par une vitesse maximum dans le vide notée C ou C_0 et est égale à 299 792 458 mètres par seconde, soit approximativement 3.10^8 m/s.

La vitesse de la lumière est proportionnelle à l'indice de réfraction du milieu qu'elle traverse. Elle est définie par le rapport de sa valeur dans le vide et l'indice du milieu par l'équation :

$$V = {}^{C}/_{n} \qquad \textbf{Eq : I.1}$$

I.2.2.3 Théorème ondulatoire de la lumière

Les phénomènes d'interférences et de diffractions explorés par l'optique physique montrent que la lumière est une onde électromagnétique qui correspond à des longueurs d'ondes dans le vide comprises entre 0,39µm et 0,78µm. Chaque longueur d'onde correspond à une couleur spécifique. Cette correspondance affectera par conséquent une fréquence typique notée ν et propre à chaque onde monochromatique.

Ces fréquences sont reliées aux longueurs d'ondes et à la vitesse de la lumière par la formule :

$$\lambda = {}^{C}/_{\nu} \qquad \textbf{Eq : I.2}$$

I.2.2.4 La Polarisation lumineuses

Le vecteur électrique de la lumière vibre dans une direction privilégiée lorsque celle-ci est polarisée. On dit que la lumière oscille de manière transversale correspondant à un vecteur cité dans un plan au rayon lumineux. Ce phénomène est crucial dans le domaine de la télécommunication optique, notamment pour la conception de dispositifs optiques tels que les faisceaux laser, les filtres.

I.2.1 Lois fondamentales de l'optique

La propagation de la lumière dans un corps ou guide d'onde optique (tel que la fibre optique dans notre cas), suit les lois fondamentales de l'optique géométrique qui est fondée en effet sur la considération des faisceaux, et par suite, implicitement du moins, sur l'hypothèse de la matérialité de l'agent lumineux. Il importe donc de savoir jusqu'à quel point l'expérience justifie les lois ainsi établies [3].

Les lois fondamentales de l'optique géométrique sont au nombre de quatre :

- La loi de la propagation rectiligne ou principe des ombres : qui implicite la propagation de la lumière en une ligne droite dans un corps homogène;
- La loi de la réfraction, établie par Descartes ;
- La loi de la réflexion régulière ;
- La loi du carré des distances.

I.2.1.1 La réflexion et la réfraction

Lorsque la lumière entre dans un milieu avec un indice de réfraction différent de celui du milieu auquel elle se déplace, une partie sera réfléchie tandis que l'autre partie peut être réfractée.

On définit la réflexion par le fait qu'un faisceau lumineux en contact avec la surface de séparation entre deux milieux, il rebours chemin sans se pénétrer dans le matériau. Par contre, la réfraction se produit lorsque celui-ci passe d'un milieu à l'autre en changeant des caractéristiques telles que la direction, la vitesse et parfois la polarisation.

I.2.1.2 Loi de Snell-Descartes

La loi définie par Snell-Descartes décrit la relation entre l'angle d'incidence auquel se propage un rayon lumineux par rapport à la normale et les déviations angulaires produites par la surface séparant les deux milieux, et la différence d'indice. Pour comprendre ce phénomène, considérons un faisceau lumineux se déplaçant dans un milieu 1 d'indice de réfraction n1 et passant à un deuxième milieu 2 d'indice de réfraction n2. Le faisceau arrive sur la surface de séparation Σ avec un angle d'incidence i_1 formé par le faisceau et la normale perpendiculaire à Σ. Le rayon réfracté forme un angle i_2 avec la normale dans le milieu 2.

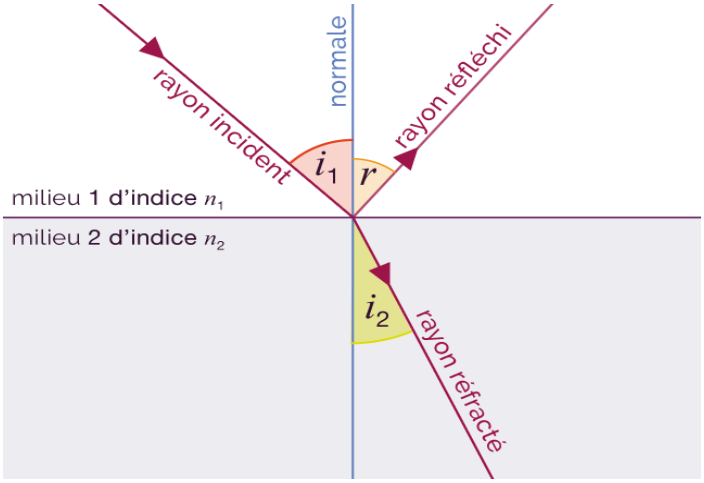


Figure I.2 : Déplacement d'un rayon lumineux d'un milieu a un autre

La loi de Snell-Descartes établie les relations existante entre les différents angles de la figure par les formules :

$$i_1 = r$$

$$n_1 * \sin(i_1) = n_2 * \sin(i_2) \qquad \textbf{Eq : I.3}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\sin(i_1)}{\sin(i_2)} = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textbf{Eq : I.4}$$

I.2.1.3 Réflexion totale

La lumière se déplace plus lentement dans un milieu optiquement dense que dans un milieu moins dense. Cet effet est mesuré par la valeur de l'indice de réfraction [4], c'est-à-dire, un milieu plus dense a un indice plus élevé qu'un milieu moins dense. Nous pouvons observer sur la figure I.2 que dans le cas où le rayon passe d'un milieu plus réfrigérant a un milieu moins réfrigérant (n1 est supérieur à n2) ce implique que l'angle d'incidence i_1 est supérieur à l'angle de réfraction i_2. Quant l'angle de réfraction atteint 90°, ce qui donne un rayon réfracté parallèle au plan de séparation, l'angle d'incidence atteint sa valeur limite, et il est logiquement moins que 90° : on dit que i_1 est l'angle d'incidence limite. Il ressort de cette condition et de l'équation **I.3** :

$$i_2 = 90° \quad \Rightarrow \quad \sin(i_2) = 1$$

$$\Rightarrow \quad \sin(i_c) = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textbf{Eq : I.5}$$

$$\textbf{D'où} \quad i_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \qquad \textbf{Eq : I.6}$$

$\mathbf{i_c}$: c'est l'angle critique.

Nous tirons de cela que tout rayon lumineux se déplaçant avec un angle d'incidence plus grand que l'angle critique, il sera totalement réfléchi : C'est la réflexion totale, et le principe de la propagation de la lumière dans une guide d'ondes optique.

I.3 Fibre optique

I.3.1 Définition

Les fibres optiques sont des fils cylindriques minces et flexibles composés de verre ou de plastique, permettant de transmettre des informations sous forme de la lumière sur de longues distances. Elles sont utilisées pour la transmission de données de grandes tailles à haute vitesse, telles que la communication vidéo et la visioconférence.

I.3.2 Bref Historique

C'est en 1966 que la fibre optique a été suggérée comme support potentiellement approprié pour le transport d'information sur de longues distances, mais les niveaux d'atténuation étaient alors trop élevés (de l'ordre de 100 dB/km) pour envisager ce type d'application. La démonstration en 1970 de la première fibre optique présentant une atténuation de moins de 20 dB/km (autrement dit préservant au moins 1% de la puissance émise au bout d'un km) a été la première étape fondatrice [5], de cette avancée majeure qui a ouvert la voie au développement des systèmes de télécommunication et de la transmission de données par cette technologie.

I.3.3 Structure de la fibre optique

La fibre optique est composée d'une guide d'onde optique centrale (le cœur) d'indice n_c, qui est entouré par une gaine optique d'indice n_g. L'ensemble est enveloppé par plusieurs couches de revêtements (gaines de protection) selon les besoins et le domaine d'utilisation (terrestre ou maritime). Ces couches supérieures ont pour rôle d'assurer la protection de la fibre contre les menaces extérieures. La structure la plus simple peut être représentée comme suit :

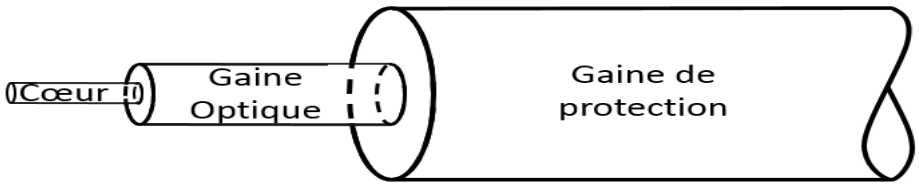


Figure I.3 : Structure de la fibre optique

La lumière se propage à l'intérieur de la fibre grâce au phénomène de la réflexion totale en séries sur l'interface cœur-gaine, dû à la différence d'indice entre le cœur et la gaine, dont celle de la gaine est légèrement inferieure à celle du cœur ($n_c > n_g$). Cet aspect permet à la lumière de voyager dans la fibre sur de très longues distances.

I.3.4 Bande de transmission

La fibre optique utilise les bandes de transmissions dans la gamme d'infra Rouge (IR) variant dans l'intervalle approximativement de 1260nm à 1675nm. Elles sont reparties en six catégories [6] :

- Bande O : 1260 - 1360 nm (Dispersion minimale) ;
- Bande E : 1360 - 1460 nm ;
- Bande S : 1460 - 1530 nm (application PON- FTTH);
- Bande C : 1530-1565 nm (pour des liaisons longues distances, DWDM, possibilité d'utiliser l'amplificateur EDFA) ;
- Bande L : 1565 nm – 1625 nm (augmenter le débit si la bande passante C n'est pas suffisante) ;
- Bande U : 1625 – 1675 nm.

I.3.5 Fenêtres optiques

Il y a trois fenêtres optiques dans lesquelles le transfert de données est effectué dans le système de transmission optique. Elles utilisent les gammes de longueurs d'onde aux alentours de 850nm, 1300nm et 1550nm avec des coefficients d'atténuation différents. Le coefficient d'atténuation des fibres actuelles varie généralement entre 0,2 et 0,3dB/km ce qui correspond à celui de la fenêtre 3 de 1550nm.

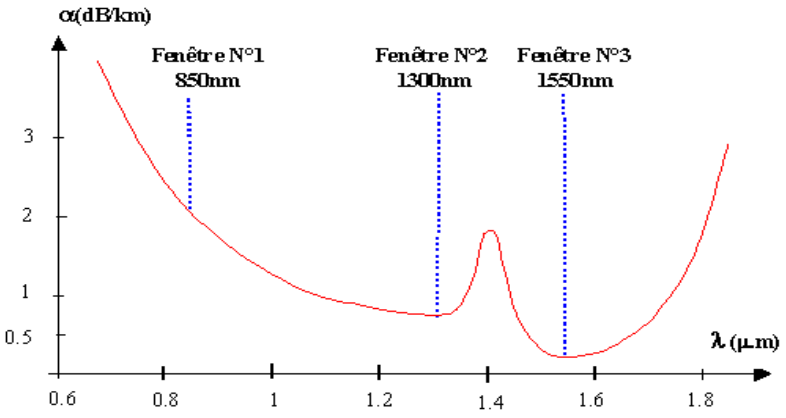


Figure I.4 : Fenêtres optiques de transmission

I.3.6 Caractéristiques géométriques de la fibre

I.3.6.1 Angle d'acceptance

L'angle d'acceptance d'une fibre représente l'angle d'incidence maximum (θmax) qui permet à la lumière une propagation par réflexions successives dans la fibre. Pour tout angle d'incidence supérieur à l'angle d'acceptance, une partie de la lumière sera transmise du cœur dans la gaine, ce qui se traduit par une perte d'énergie du signal. L'information alors

transportée (ou une partie) par la lumière est perdue, car non propagée jusqu'à la sortie de la fibre et ne sera pas reçue par le destinataire.

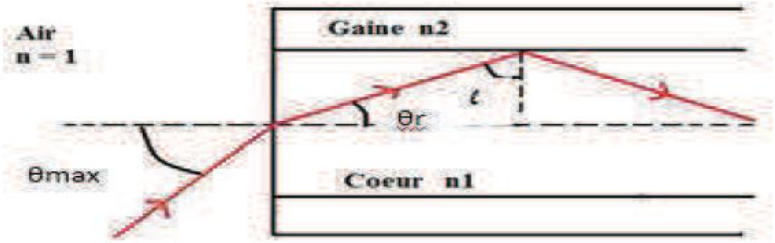


Figure I.5 : Propagation de la lumière dans la fibre

Où : θmax : Angle d'acceptance ; θr : Angle de réfracté ; l : Angle limite ou angle critique

La propriété des angles démontré par d'Euclide nous donne la valeur des deux angles (l'angle limite et l'angle de réfraction) par l'expression :

$$\boldsymbol{\theta_r + l = 90°} \qquad \textbf{Eq : I.7}$$

Cette relation permet de déterminer la valeur de l'angle critique en connaissant celle de l'angle d'acceptance et vis-vers sa. Cela nous mène à la deuxième loi de Snell-Descartes appliquée sur le dioptre d'entrée d'une fibre par l'expression :

$$\boldsymbol{n * sin(\theta max) = n1 * sin(\theta r) = n1 * sin(90° - l)}$$

$$\textbf{Avec n=1} \Rightarrow \quad \boldsymbol{sin(\theta max) = n1 * cos(l)} \qquad \textbf{Eq : I.8}$$

I.3.6.2 Ouverture numérique

L'ouverture numérique est une mesure de la capacité de la fibre à collecter la lumière et un paramètre important dans la détermination de la bande passante et de l'atténuation de la fibre. Elle est définie comme le sinus de l'angle maximum sous lequel le système peut accepter la lumière.

Sachant que $\sin^2(l) + \cos^2(l)=1$, l'équation (6) devient :

$$\boldsymbol{sin^2(\theta max) = n1^2 * cos^2(l)}$$

$$\boldsymbol{\sin^2(\theta max) = n1^2 * (1 - \sin^2(l)) \Rightarrow sin(\theta max) = \sqrt{1 - sin^2(l)}}$$

D'où $\boldsymbol{ON = sin(\theta max) = n1 * \sqrt{1 - sin^2(l)}}$

$$\textbf{Ou } \boldsymbol{ON = \sqrt{n_1{}^2 - n_2{}^2}} \qquad \textbf{Eq : I.9}$$

I.3.7 Catégories de fibres optiques

Il existe principalement deux types de fibres optiques qui sont : la fibre monomode et la fibre multimode.

I.3.7.1 Fibre monomode

Avec un diamètre du cœur très petit et compris entre 9µm et 10µm, la fibre monomode est conçue pour le passage d'un seul mode de la lumière à travers le cœur. Elle est utilisée pour des longues distances, offrant une transmission de données à haut débit avec une faible atténuation. Les applications typiques incluent les réseaux de télécommunications à longue portée et les liaisons par câble sous-marin. Le diamètre de la gaine est de 125µm.

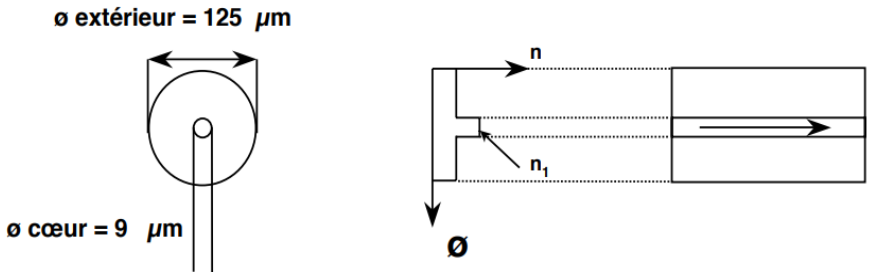


Figure I.6 : Structure d'une fibre monomode

I.3.7.2 Fibre multimode

Contrairement à la fibre monomode, dans une fibre multimode, plusieurs modes se propagent à travers le cœur. Elle est utilisée pour des applications à courtes distances, les réseaux locaux LAN (Local Area Network) et dans les bâtiments. Bien qu'elle offre une bande passante plus limitée et une atténuation plus élevée que la fibre monomode, la fibre multimode est moins coûteuse et convient parfaitement à de nombreuses applications. Les fibres multimodes se subdivisent en deux types : les fibres à saut d'indice et les fibres à gradient d'indice.

- **Fibre à saut d'indice** : Dans une fibre à saut d'indice, les indices du cœur et de la gaine sont constants. Cela induit une propagation de façon triangulaire et une variation de vitesses des différents rayons tout au long de la fibre. Le diamètre du cœur est de 100µm et celui de la gaine de 140µm.

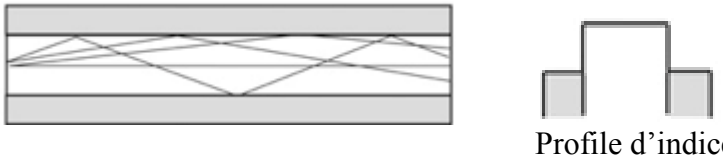


Figure I.7 : Structure d'une fibre multimode à saut d'indice

➢ **Fibre à gradient d'indice** : Dans ces types de fibres, l'indice du cœur diminue de façon exponentielle entre nc et ng (du centre de la fibre vers l'extrémité cœur-gaine). Le profil d'indice variant du cœur est représenté par l'équation :

$$\boldsymbol{n(r) = n1 * [1 - 2\Delta(\frac{r}{a})^{\alpha}]^{1/2}} \quad ; \qquad 0<r<a \text{ et } -a<r<0 \text{ ; dans le cœur} \qquad \textbf{Eq : I.10}$$

$$\textbf{n(r)=n2} \text{ ;} \qquad r \geqslant a \text{ et } r \leqslant -a \quad \text{dans la gaine ;}$$

Où a : rayon du cœur ;

α : exposant du profile d'indice ;

Δ : différence relative d'indice tel que :

$$\Delta = \frac{n1^2 - n2^2}{2 * n1^2} \qquad \textbf{Eq : I.11}$$

Cette variation de l'indice modifie la propagation de faisceaux qui deviennent sous forment des signaux sinusoïdaux.
Les fibres à gradient d'indices ont pour diamètre du cœur compris entre 50 et 62,5µm celui de la gaine est de 125µm.

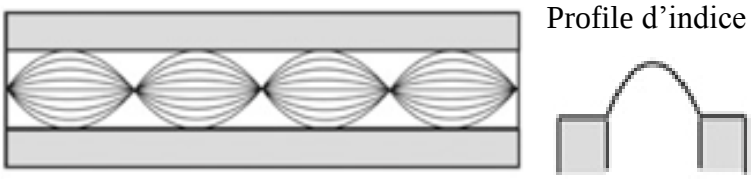


Figure I.8 : Propagation de la lumières sur une fibre multimode à gradient d'indice

I.3.8 Caractéristiques optiques d'une fibre

I.3.8.1 Notion de mode

L'apparition des modes dans une fibre dépend du diamètre (ou rayon) du cœur et de l'angle limite ''l'' ou de l'angle d'acceptance θ_{max}. Plus le diamètre est grand, plus les modes apparaissent. La figure I.9 montre les premiers modes des propagations dans une guide d'onde optique. Le mode fondamental correspond au LP01.

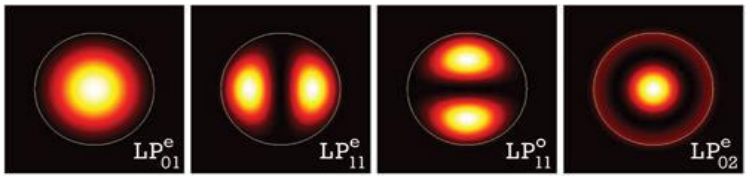


Figure I.9 : Représentation des 4 premiers modes de propagation **[7]**

I.3.8.2 Fréquence normalisé

La fréquence normalisée permet de prédire le nombre de modes (chemins possibles) qui conduiront la lumière à l'intérieur de la fibre. Elle est exprimée en fonction de l'ouverture numérique, du rayon et de la longueur d'onde de propagation par l'expression :

$$V = \frac{2\pi * a * ON}{\lambda_0} \qquad \textbf{Eq : I.12}$$

Avec a : rayon du cœur de la fibre ;

ON : ouverture numérique de la fibre ;

λ0 : longueur d'onde (dans le vide) de l'onde se propageant dans la fibre ;

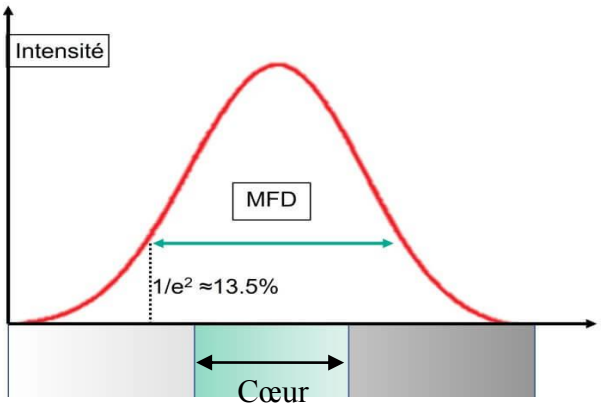
La valeur typique de la fréquence normalisée pour une propagation monomodale doit être inférieure ou égale à 2.40. Dans ce cas, un seul mode circule dans la fibre : il s'agit du mode fondamental, on dit que la fibre est monomode (SM : single mode).

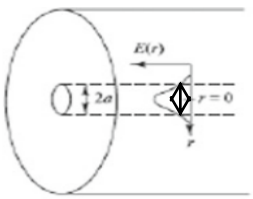
I.3.8.3 Diamètre du champ de mode

Le diamètre du champ de mode est défini comme le diamètre qu'occupe l'énergie lumineuse transmise dans une fibre monomodale. Il est généralement mesuré en fonction de l'angle de champ lointain à une longueur d'onde donnée (λ) [1]. Le MFD est calculé à 13,5 % (0,135) par rapport à l'intensité maximale du faisceau lumineux. On définit la valeur du MFD par la relation du MARCUSE :

$$MFD = 2a(0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6}) \qquad \textbf{Eq : I.13}$$

Avec a : rayon du cœur ; V : fréquence normalisé





Distribution de la lumière à l'intérieur de la fibre

Figure I.10 : L'évolution de l'intensité lumineuse par rapport au diamètre du cœur

I.3.8.4 Atténuation optique

L'atténuation optique est une perte ou diminution de puissance de la lumière lors de sa propagation dans la fibre. Elle peut être due à plusieurs facteurs de la ligne :

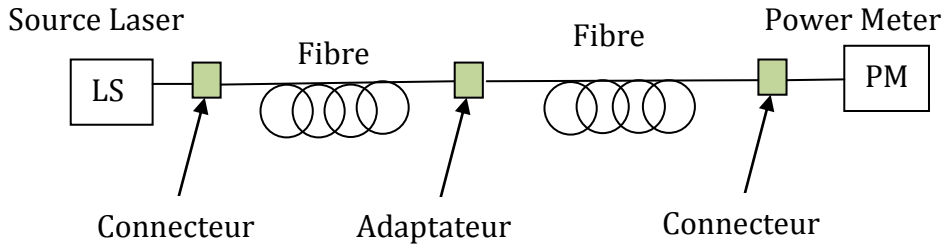


Figure I.11 : Diagramme d'une ligne optique

- **Perte linéique :** les puissances lumineuses injectées dans une fibre subissent des affaiblissements lorsqu'elles parcourent plusieurs kilomètres. Cette perte s'exprime en dB/km et est de l'ordre de 0,2 dB/Km pour les fibres standards.
- **Perte de connexion (Mating Sleeve) :** elle est de l'ordre de 0,3dB et due à la connexion de la fibre avec l'adaptateur.
- **Pertes dues aux connecteurs et adaptateurs :** elles sont respectivement de 0,15dB et 0,3dB.
- **Pertes dues au différent polissage de férule :** elle est estimée à 3dB

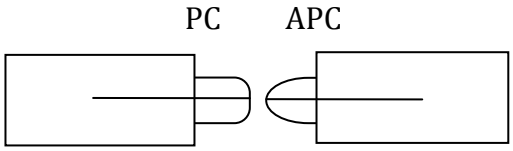


Figure I.12 : Connexion différent polissage de férule

- **Pertes dues aux différents diamètres des cœurs :**

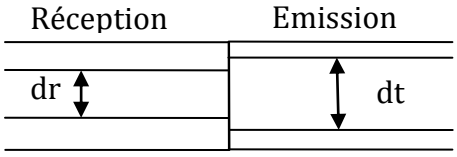


Figure I.13 : Alignement par différent diamètre du cœur

Où dr : diamètre du récepteur ; dt : diamètre d'émetteur

L'atténuation due à la différence des diamètres se calcul par la formule :

$$A = 10 * log_{10}(\frac{dt^2 - dr^2}{dt^2}) \qquad \textbf{Eq : I.14}$$

$$\Rightarrow \quad A = 10 * log_{10}(\frac{dr^2}{dt^2}) \quad \text{Avec dt > dr} \qquad \textbf{Eq : I.15}$$

- **Pertes dues à différentes ouvertures numériques :** l'atténuation produit dans ce cas est de :

$$A = 10 * log_{10}(\frac{NAr}{NAt})^2 \quad \textbf{NAt > NAr} \qquad \textbf{Eq : I.16}$$

NAt : Ouverture numérique de la fibre coté transmission

NAr : Ouverture numérique de la fibre coté réception

- **Pertes dues au désalignement longitudinal :**

$$A = 10 * log_{10}[\frac{\frac{d}{2}}{\frac{d}{2} + S * \tan\left(\arcsin\left(\frac{NA}{n_0}\right)\right)}]$$

Ou $A = -10 * log_{10}[\frac{1}{1+Z^2}]$ avec $Z = \frac{S^{\lambda}}{2\pi n_0 w_0}$ **Eq : I.17**

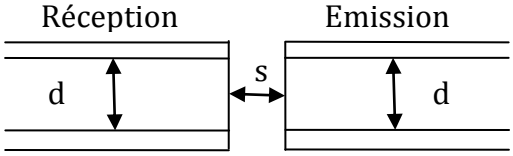


Figure I.14 : Désalignement longitudinal

d : diamètres du cœur ; s : séparation ; n_0 : indice du milieu séparant les deux fibres ;

w_0: rayon de la fibre

- **Pertes dues aux différents MFD :**

$$A_{dB} = -10 \log[\frac{4}{[\frac{W2}{W1} + \frac{W1}{W2}]^2}] \; ; \qquad \textbf{Eq : I.18}$$

$$W2 = \frac{MFD2}{2} \; ; \quad W1 = \frac{MFD1}{2} \qquad \text{Avec MFD1>MFD2}$$

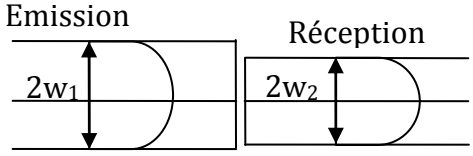


Figure I.15: Désalignement par MFD

- **Pertes dues au désalignement axial :**

$$\boldsymbol{A = -10log_{10}\ [e^{-u^2}]\ ;} \qquad \textbf{Eq : I.19}$$

On pose : $U = \frac{x}{W_0}$; $a = 2W_0$

W_0 : Rayon du cœur ; x : translation axiale ;

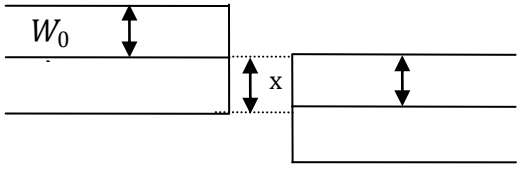


Figure I.16 : Désalignement axial

- **Pertes dues au désalignement angulaire :**

$$\mathbf{A = -10\ log\ [e^{-T^2}]} \quad ; \quad \boldsymbol{T = \frac{n_0\ \pi\ w_0\ sin\theta}{\lambda}} \qquad \textbf{Eq : I.20}$$

W_0 : Rayon ; n_0: indice de réfraction du milieu retraçant ;

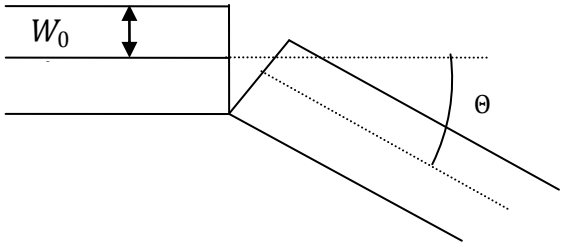


Figure I.17 : Désalignement angulaire

- **Pertes dues à la macro courbure de la fibre :** La perte due à la macro-courbure est :

$$\boldsymbol{A_t(dB) = 4,34(\frac{r_d}{w_0})^2\ ;} \qquad \textbf{Eq : I.21}$$

Avec: $\boldsymbol{r_d = \frac{\beta^2\ w_0^4}{2R_c}}$; $\boldsymbol{\beta \approx \frac{2\pi}{\lambda_0}(\frac{n_1+n_2}{2})}$; $\boldsymbol{w_0 = a(0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6})}$

r_d : Distance de décalage du faisceau ;
β : Constante de propagation ;
w_0 : Diamètre de champ de mode ;
R_c : Rayon de courbure (Bending radius) ;

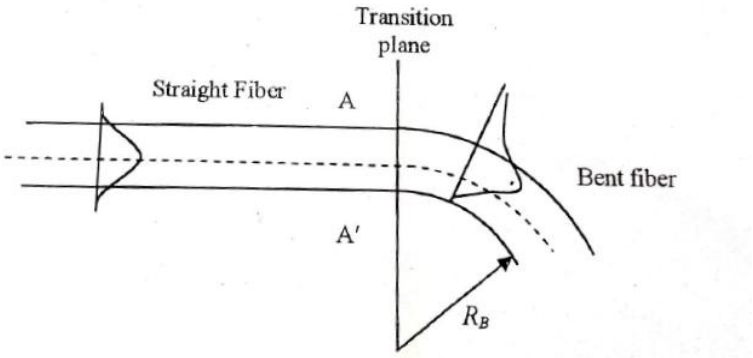


Figure I.18 : Schéma de Macro courbure

- **Pertes dues à la réflexion de Fresnel :**

$$A_{dB} = -10 * \log(T) \; ; \qquad \textbf{Eq : I.22}$$

Avec T=1-R et $R_I = (\frac{n_c - 1}{n_c + 1})^2$

T : Coefficient de transmission en intensité
R : Coefficient de réflexion en intensité

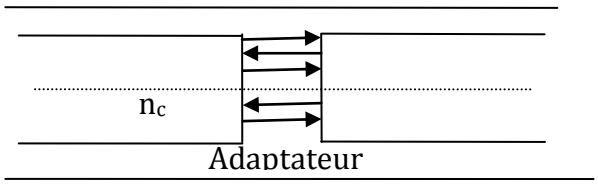


Figure I.19 : Pertes due à la réflexion de Fresnel

I.3.8.5 Alignement d'un laser

L'alignement d'un laser consiste à ajuster les composants optiques à l'entrée d'une fibre pour que le faisceau laser se propage dans sa quasi-totalité dans une direction spécifique et atteigne son objectif avec précision. L'alignement du laser entre deux récepteurs (fibres par exemple) se fait par deux méthodes : alignement fibré et alignement en espace libre. La première technique permet de connecter directement l'émetteur et le récepteur en ajustant et positionnant précisément les fibres afin d'avoir un transfert efficace de la lumière à travers les fibres. La seconde utilise des composants optiques tels que les lentilles, les miroirs, diaphragme à Iris, etc. pour focaliser le spot lumineux à son objectif et assurer une meilleure connectivité. Le spot est défini en fonction de la fréquence du MFD et de la longueur d'onde par :

$$\Phi_{spot} \approx 4 * \lambda * (\frac{f}{\pi[MFD]}) \; ; \qquad \textbf{Eq : I.23.1}$$

$$\boldsymbol{\theta} \approx \left(\frac{[\boldsymbol{MFD}]}{\boldsymbol{f}}\right)\left(\frac{\mathbf{180}}{\boldsymbol{\pi}}\right) ; \qquad \textbf{Eq: 23.2}$$

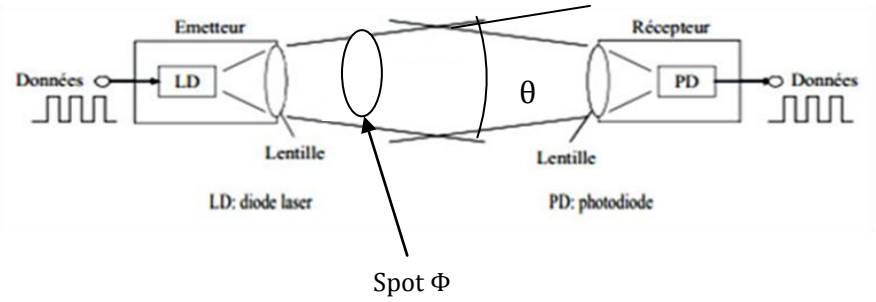


Figure I.20 : Alignement d'un laser en espace libre

I.3.8.6 La dispersion

La dispersion d'un signal optique se traduit par la déformation du signal, entraînant un élargissement temporaire des impulsions pendant leur propagation à travers la fibre optique. Elle dépend de plusieurs facteurs tels que la longueur de transmission, le débit, la largeur de bande de la source laser et le diamètre du cœur.

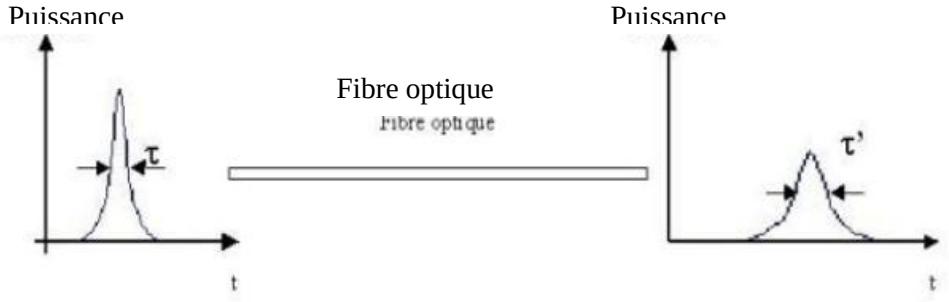


Figure I.21 : Effet de la dispersion sur d'un signal optique

I.3.8.6.1 Origines de la dispersion

Les principales origines de la dispersion sont entre autres :

- **Effet du débit sur la dispersion :** Lorsque le débit de la transmission devient plus grand, les impulsions se rapprochent et l'espacement entre eux devient de plus en plus petit, ce qui produira un chevauchement appelé Interférence Inter Symbole (IIS).
- **Effet de la longueur sur la dispersion :** La distance de transmission influe sur la qualité du signal et se manifeste par une dispersion. Par convention, une source laser de largeur spectrale de 1nm introduit sur une longueur de 1km un élargissement de 17ps. Cela se traduit par une dispersion estimée à 17ps/nm/km.

I.3.8.6.2 Types de dispersions

La dispersion peut prendre plusieurs formes selon les paramètres agissant sur son existence. Elle peut être matérielle, provenant du guide, modale ou encore causée par la polarisation.

❖ **Dispersion matérielle :** La dispersion matérielle se produit lorsque l'indice de réfraction du matériau varie en fonction de la longueur d'onde de la lumière et que les sources lumineuses utilisées ne sont pas monochromatiques. Cette forme de la dispersion est également connue sous le nom de la "**dispersion chromatique**". En utilisant la relation de Sellmeier, il est possible de tracer la dépendance de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde, voir figure I.22 (cas du dioxyde de silicium (SiO2)). Sa formule est donnée par :

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^{3} \frac{A_i * \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}\ ; \qquad \textbf{Eq : I.24}$$

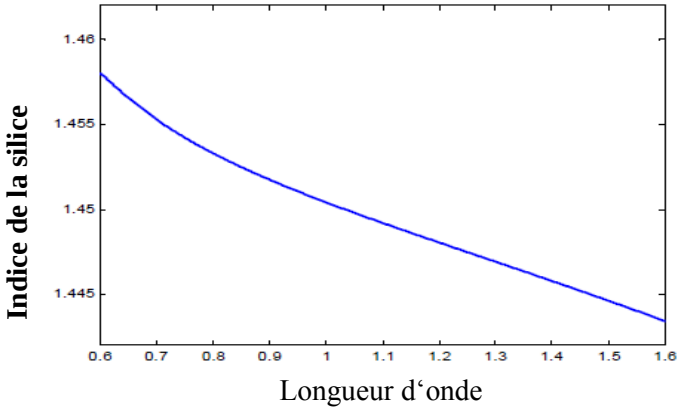


Figure I.22 : Variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde

On observe dans cette figure que la diminution de l'indice de réfraction est proportionnelle à λ. La longueur d'onde varie entre 0,6 µm et 1,6 µm. Cette variation d'indice n du milieu définit un indice de groupe noté Ng et donné par la relation :

$$N_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \qquad \textbf{Eq : I.25.1}$$

Ce implique : $Vg = \frac{C}{ng}$ et L=Vg*t

$$\Rightarrow t = \frac{L}{C}\left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}\right)$$

D'où la dispersion $\Delta t = \frac{L}{C}\left(-\lambda \frac{d^2n}{d\lambda^2}\right)\Delta\lambda$ Eq : 24

Δλ : Largeur spectral de la source : $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{C}\Delta\nu$ **Eq : 25 .2**

On pose le coefficient de dispersion matérielle : $\gamma_m = \left| -\frac{\lambda}{C}\frac{d^2n}{d\lambda^2} \right|$ **Eq : 25.3**

$$\Rightarrow \Delta t(ps) = \gamma_m * \Delta\lambda * L$$

Δν : largeur fréquentielle ; L : longueur de la fibre en km

❖ **Dispersion modale :** La dispersion modale découle de la variation des vitesses des différents modes à l'intérieur de la fibre au cours de leurs propagations. Elle entraînant un décalage progressif entre ces modes au fil du temps. Ce phénomène élargit l'impulsion à la sortie de la fibre optique. Elle se présente très souvent dans les fibres multimodes par le fait que le diamètre du cœur est grand.

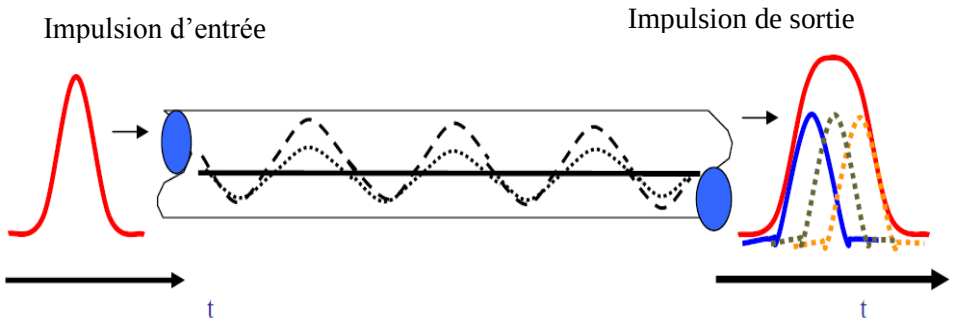


Figure I.23 : Dispersion modale

La dispersion modale est beaucoup plus fréquente dans les fibres multimodes à sauts d'indices que les fibres à gradients d'indices. Sa valeur est déterminée par la formule :

$$D_m = \frac{n_C}{C} * \Delta\ (ps/km) \qquad \textbf{Eq : I.26.1}$$

n1 : indice de réfraction du cœur ; **C** : vitesse de la lumière.

$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$ Différence d'indice **Eq : 26.2.2**

Le taux d'élargissement d'une impulsion dispersée est égal à :

$$\delta t = D_m x \Delta L(ns) \qquad \textbf{Eq : 26.3}$$

L'équation de dispersion modale pour les fibres multimodes à gradients d'indices s'écrit :

$$D_m = \frac{n_C}{8C}\Delta^2 \qquad \textbf{Eq : 26.4}$$

I.3.8.6.3 Compensation de la dispersion

Pour minimiser la dispersion modale lors des transmissions, on utilise souvent les fibres à gradients d'indices, dans le but d'éviter les trajets triangulaires et réduire le retard entre les modes. Autre technique est d'utiliser des fibres compensatrices appelées DCF (Fibre Compensatrice de la Dispersion).

Pour compenser une dispersion produite par une fibre SMF, il faut que la DCF produise une dispersion de signe opposée de telle sorte que la somme de toutes dispersions sera nulle :

$$D_{résiduelle} = D_{SMF} * L_{SMF} + D_{DCF} * L_{DCF} = 0\ (ps) \quad \textbf{Cas idéal} \qquad \textbf{Eq : I.27}$$

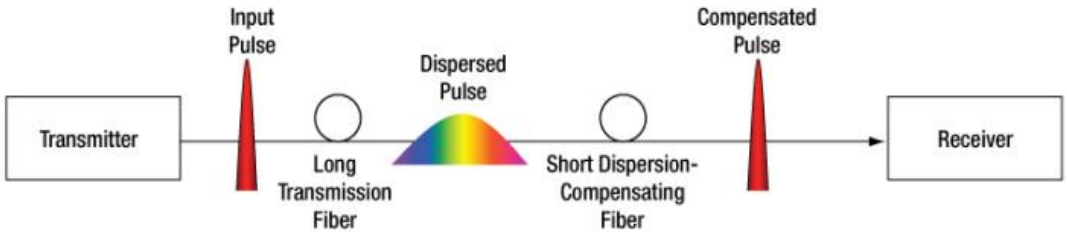


Figure I.24 : Schéma d'une liaison optique avec DCF

I.3.8.6.4 Caractéristiques techniques d'un DCF

Les caractéristiques techniques de DCF dépendent de nombreux facteurs constituant la fibre, et du fabricant. Considérons l'exemple suivant de la fibre compensatrice DCF38 de THORLABS.

- Intervalle de fonctionnement : 1520-1625nm
- Perte due à la connexion : 1 dB
- Dispersion négative : -49 à -30ps/nm/km (typique : -38ps/nm/km)
- Pente de dispersion : -0,155 à -0,075ps/nm^2/km
- Indice de réfraction : 1,474 sur 1550nm et 1,476 sur 1310nm
- MFD : 6,01 µm $\pm 0{,}29 m$
- Ouverture numérique : NA= 0,14
- Cladding/Coating : 125 µm/250 µm
- Atténuation linéique : 0,265 dB/Km

I.4 Avantages et inconvénients de la fibre

I.4.1 Avantage de la fibre

La fibre optique offre plusieurs avantages en termes de vitesse de connexion, de capacité de charge et de transport d'informations, de légèreté et de finesse, d'émission d'interférences magnétiques et de dégradation du signal, de durée de vie, de bande passante, de latence et de fiabilité [8].

- Bande passante infinie (Débit très élevé: 19,2Tbps sur 400 Km/ 9,6Tbps sur 1200Km en multiplexage et 100G/200G/400G entre 40 et 60Km sans multiplexage).
- Atténuation optique très faible : 0,2-0,3 dB/Km
- Coût de la fibre est faible.

- La fibre est très bien protégée par des gaines. Elle est installée en sous-terrain, contrairement aux réseaux sans fils.
- Elle est aussi utilisée pour interconnecter des équipements électroniques comme les Switchs, les hubs, les stations de bases pour garantir un très haut débit et une stabilité permanente.
- Autres applications de la fibre : capteur (Sensor).

I.4.2 Inconvénients de la fibre optique

Les inconvénients de la fibre optique incluent sa sensibilité aux perturbations, nécessitant une installation dans un environnement propre et calme, une maintenance régulière et coûteuse, une incompatibilité avec certains équipements existants, des coûts initiaux d'installation élevés, une fragilité accrue par rapport aux câbles en cuivre, et une difficulté d'installation et d'entretien. A cela s'ajoute le cout élevé des émetteurs et récepteurs, des amplificateurs et les modulateurs optiques.

I.5 Quelques fibres optiques d'application

Plusieurs standards de fibres optiques ont été définies par l'union Internationale de Télécommunication (ITU) pour les applications de communication optique [6]:

- G.651 : Fibre multimode utilisée sur 850nm dans les réseaux LAN ;
- G.652A/B : Fibre monomode SMF (1310nm) ;
- G.652C/D : FSF full-spectrum Fiber pour les FTTH, FTTP, FTTX
- Non Dispersion Shifted Fiber (SSMF) : D=17ps/nm/Km sur 1550nm (application 10Gbps, petite et moyenne distance).
- G653 : Dispersion Shifted Fiber (DSF) D=0ps/nm/Km (n'est pas adaptée au WDM).
- G655A-E Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZ-DSF) : 1530-1625nm, D=$\pm$2,5 ps/nm/Km (application : 10G/40G/100G, DWDM, longue distance).

I.6 Conclusion

En somme, la fibre optique est un composant central des réseaux de communication modernes. Elle présente des performances élevées et un transfert de données efficace grâce à ses propriétés optiques exceptionnelles. Dans ce chapitre nous avons présenté les généralités sur la fibre et ses caractéristiques. Dans le prochaine chapitre, nous examinons afin d'approfondir notre compréhension sur le transfert des données et l'expansion des réseaux de communication à haut débit par la spécificité de la transmission d'un signal à travers la fibre optique. Ce qui nous conduit à l'étude des composants optiques, voire optoélectroniques, permettant de convertir et de traiter les signaux à transmettre.

Chapitre II

Dispositifs optiques

II.1 Introduction

La conception de systèmes de transmission par fibres optiques nécessite de connaitre les fonctionnements et les caractéristiques des sous-ensembles impliqués [9]. Elle prend en considération des combinaisons variées de composants optoélectroniques et de techniques de modulation afin d'obtenir les performances souhaitées pour la liaison [9]. On dénomme généralement par le terme composant optique, tout dispositif optique assurant un fonctionnement dans une liaison par fibre optique. Ces dispositifs sont classés en deux catégories : les dispositifs optiques actifs et les dispositifs optiques passifs. Un dispositif passif se définit comme un composant optique permettant le traitement du signal optique sans faire recours à une conversion optique-électronique, ni nécessitant un signal de commande extérieur ni une alimentation par une source externe. Alors qu'un dispositif actif nécessite soit un signal de commande extérieur, soit une alimentation externe. Dans la section suivante, nous allons examiner de près les composants nécessaires constituant une ligne optique.

II.2 Système de transmission optique

II.2.1 Définition

Un système de transmission optique est un ensemble de composants conçu pour acheminer un signal optique sur une distance donnée, tout en minimisant les divers effets qui peuvent dégrader le signal pendant le trajet. Ces effets sont la dispersion, la diffusion, l'atténuation et d'autres caractéristiques éventuelles affectant la qualité et l'intégrité du signal optique. En prenant en considération ces effets, une ligne optique est optimisée pour fournir les conditions favorables à un transfert efficace et fiable du signal sur des longues distances.

II.2.2 Architecture d'une ligne de transmission optique

Une chaine de transmission optique implique de nombreuses variables interdépendantes de la fibre. La conception et l'analyse réelles de la liaison peuvent nécessiter plusieurs itérations pour transmettre le signal de manière satisfaisante. Une ligne optique peut être structurée en trois grands blocs : l'émission, le canal et la réception :

❖ **Emission :** Le bloc d'émission d'un système de transmission optique est composé généralement d'une source de signal numérique ou électrique, d'un émetteur optique, d'un codeur source, d'un modulateur et d'une source d'intensité.

❖ **Canal :** C'est le support de transmission sur lequel le signal optique est transmis sur la distance spécifiée. Il s'agit principalement d'une fibre optique. A cela s'ajoutent tout au long du canal pour assurer un transfert efficace et fiable d'un signal optique sur des longues distances, des régénérateurs, amplificateurs, multiplexeurs, connecteurs, etc.

❖ **Réception :** C'est le dispositif qui détecte et inverse le signal optique en signal électrique à l'extrémité de la ligne. Le récepteur peut être une photodiode ou un phototransistor. On y trouve aussi le décodeur et le filtre.

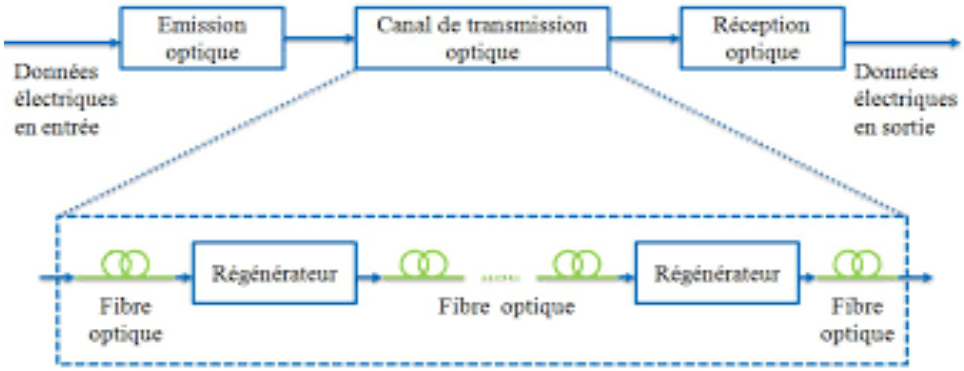


Figure II.1 : Schéma d'une ligne de transmission optique

II.3 Emetteurs optiques

Pour assurer la conversion électronique-optique pour les communications par fibres optiques, deux classes de sources lumineuses à base de semi-conducteurs sont largement utilisées : les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser à structure hétérojonction (également appelées diodes laser à injection ou ILD) [10].

II.3.1 Concept de semi-conducteurs

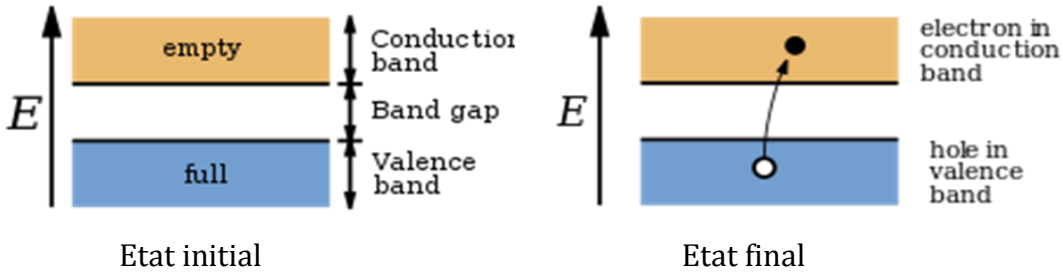
La structure cristalline des semi-conducteurs les conduit à des propriétés physiques particulières par rapport au métal telles que : la conductivité électrique, la propriété optique, photoconductivité, lumière de recombinaison etc. [11]. D'une manière schématique, la structure énergétique d'un semi-conducteur est composée de deux bandes, une bande de valence qui correspond aux états moléculaires liants et une bande de conduction qui regroupe les états moléculaires anti-liants [12]. Ces deux bandes sont séparées par une plage d'énergie appelée « Bande interdite ». L'interaction entre ces deux bandes génère des photons qui sont à l'origine de l'émission de la lumière, ou absorbe des photons pour engendrer un signal électrique, et vise vers sa.

II.3.2 Principe d'émission de la lumière

La transition d'un électron de la couche de valence vers la couche de conduction se traduit par l'apparition d'un « Trou » dans la bande de valence. Elle se produit lors que le semi-conducteur absorbe un photon d'énergie $h\nu = \Delta E = E_2 - E_1$ où h est la constante de Planck et ν la fréquence du rayonnement : **c'est le phénomène d'absorption.**

L'émission d'une radiation optique par un semi-conducteur se manifeste par le déplacement des électrons situés au maximum de la bande de conduction vers le minimum de la bande de valence et la recombinaison électron-trou, qui libère un photon d'énergie hν : **C'est le phénomène d'émission.** Cet effet se produit par deux aspects remarquables, l'émission stimulée et l'émission spontanée. Cette transition radiative a une énergie du gap qui est proportionnelle à la longueur d'onde du photon excitant et a pour valeur :

$$E_g = {}^{12.4}/_{\lambda} \qquad \textbf{Eq : II.1}$$



Etat initial Etat final

Notion de trou

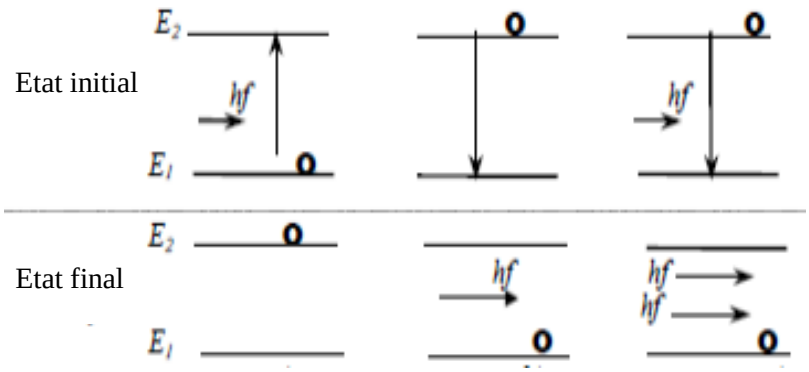


Figure II.2 : Phénomènes a) d'absorption; b) d'émission spontanée c) émission stimulée

L'énergie de gap d'une radiation est non seulement proportionnelle à la longueur, mais aussi dépend du matériau semi-conducteur. Nous récapitulons l'exemple pour quelques semi-conducteurs les plus fréquemment utilisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.1 : Energie de gap des semi-conducteurs **[10]**

Matériau semi-conducteur	Energie de Band gap (eV)
Silicone (Si)	1.12
GaAs	1.43
Germanium (Ge)	0.67
InP	1.35
$Ga_{0.93}Al_{0.07}As$	1.51
$In0.74Ga_{0.26}As_{0.57}P_{0.43}$	0.97

II.3.3 Diode électroluminescente LED

Les diodes électroluminescentes DEL, communément appelées LED de l'anglais Light Emission Diode, sont des composants électro-optiques capables d'émettre de la lumière non cohérente lorsqu'ils sont traversés par un courant électrique. Ces dispositifs fonctionnent selon le principe de l'électroluminescence. Une LED est composée principalement de deux semi-conducteurs à gap direct, d'un matériau dopé p et d'un matériau dopé n, qui forment une jonction P-N. Lorsqu'un courant électrique est appliqué à la jonction P-N, les électrons de la couche n se transitent et se recombinent avec les trous dans la couche p. Cette recombinaison libère de l'énergie sous forme de photons, qui sont des particules de lumière. La lumière ainsi émise correspond à une longueur d'onde spécifique, déterminée par la différence d'énergie entre les bandes.

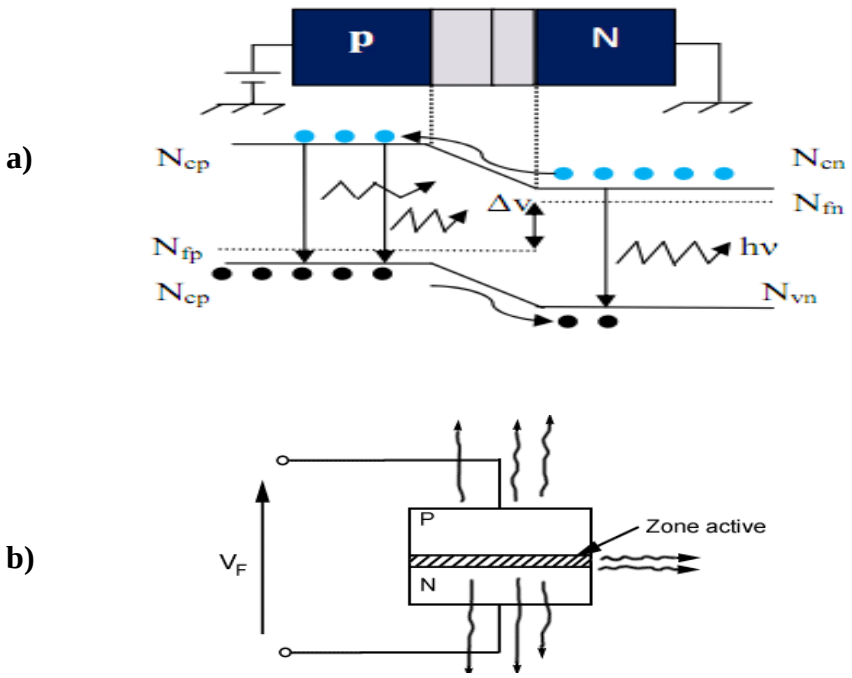


Figure II.3 : a) Structure d'une jonction P-N ; b) Structure d'une LED

II.3.3.1 Spectre d'émission

Le spectre d'émission d'une LED se réfère à la distribution de l'éclairement en fonction de la longueur d'onde de la lumière émise. Selon le matériau semi-conducteur utilisé et la conception, ce spectre varie d'une LED à une autre. Le spectre d'émission d'une LED peut être large ou étroit. La largeur spectrale Δλ d'une LED est déterminée à 50% de l'intensité maximale du signal. Elle est connue sous le nom de « largeur à mi-hauteur » ou encore le FWHM (Full-Width Half-Maximum).

La figure II.4 représente l'exemple d'un spectre d'un signal optique d'une longueur centrée autour de 520nm. La largeur spectrale de ce signal à d´intensité maximale sur 520nm, égale à environ 30nm. Elle est comprise entre 505 nm à 535 nm.

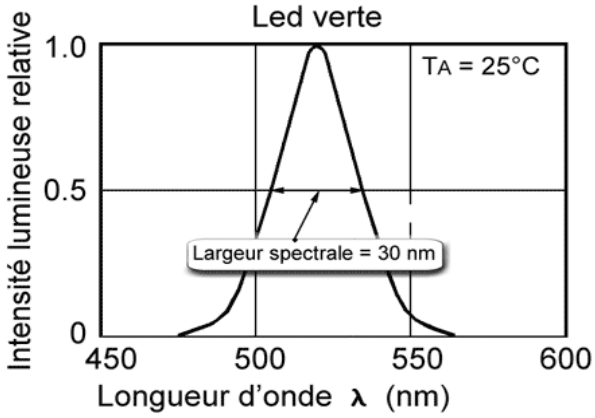


Figure II.4 : Spectre d'émission d'une LED fonctionnant sur 520nm [13]

II.3.3.2 Puissance optique d'émission

La puissance d'émission désigne le flux émis par la diode en termes d'énergie lumineuse. Elle est en fonction de la puissance électrique consommée par la diode et du rendement quantique externe. Sa valeur théorique est exprimée par la relation :

$$\boldsymbol{P_e = \eta_{ext}\, P_{int} = \frac{P_{int}}{n(n+1)^2}} \qquad \textbf{Eq : II.2}$$

n : Indice de réfraction du matériau semi-conducteur

$\boldsymbol{\eta_{ext}}$: Rendement externe $\boldsymbol{\eta_{ext} = 1,3\% n_{int}}$; **Eq : II.2**

$\mathbf{P_{int}}$: Puissance interne : $\boldsymbol{P_{int} = \eta_{int} \frac{I}{q} h\nu = n_{int} \frac{hcI}{q\lambda}}$ **Eq : II.3**

$\boldsymbol{n_{int}}$: Rendement interne ; **c** : célérité ; **q** : charge électrique ;

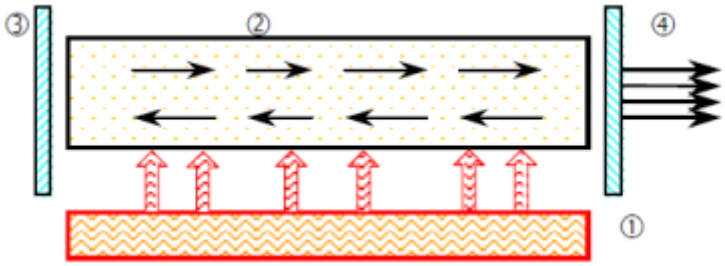
I : intensité du courant ; h : constante de Planck

Le rendement interne η_{int} est le rapport des recombinaisons électron-trou radiatives Rr et non radiatives Rnr dans la zone active entre la jonction P-N de la diode. Il est défini par :

$$\eta_{int} = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} \qquad \textbf{Eq : II.4}$$

II.3.4 Diode Laser

La diode laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) est un type de diode électroluminescente fonctionnant sur le principe de l'émission stimulée par amplification des photons incidents. Elle émet de la lumière monochromatique, cohérente et amplifiée. L'amplification de la lumière se fait par la multiplication par des réflexions en séries des photons excités entre deux miroirs antireflets couvrant la zone active.



1 : Pompe; 2 : Milieux amplificateur ; 3 : Miroirs a 100% réfléchissant ; 4 : miroir de sortie (semi-réfléchissant)

Figure II.5 : Principe de fonctionnement d'un Laser

II.3.4.1 Condition d'amplification

L'amplification de la lumière dans la zone active de la diode laser est conditionnée par la présence des populations situées dans les deux niveaux d'énergie. Cette condition est nécessaire dans le but d'éviter que l'émission stimulée ne puisse pas être atténuée par le phénomène de l'absorption. Einstein a affirmé que « l'absorption et l'émission stimulée se produisent avec des probabilités données par la même expression, la seule différence étant que la première est proportionnelle au nombre d'atomes par unité de volume dans l'état 1 (appelé population de l'état 1), tandis que la seconde l'est à la population de l'état excité ou l'état 2. Pour que l'émission stimulée l'emporte sur l'absorption, il faut donc que l'indice n2 d'état excité soit supérieur à l'indice n1 d'état fondamental (n2>n1) : c'est ce qu'on appelle réaliser une inversion de population » [14]. Il est alors impératif de connaitre au préalable le nombre d'électrons dans la bande de conduction et celui des trous dans la bande de valence, pour déterminer la possibilité pour que la lumière soit amplifiée. Cette statistique régissant les populations est élaborée pour les gaz et les liquides par les propriétés de Boltzmann et par la propriété de Fermi-Dirac dans le cas des semi-conducteurs.

II.3.4.2 Courant de seuil

Le courant de seuil se réfère à l'intensité minimale du courant électrique qui doit traverser la diode pour déclencher la cohérence. Une fois que le courant électrique atteint la limite de seuil, les électrons et les trous se recombinent de manière stimulée, émettant des photons cohérents pour former le faisceau laser. Cependant, en dessous du seuil, le laser émet de la lumière de manière incohérente, faisant de lui une diode LED. Au-dessus du seuil, une augmentation supplémentaire du courant entraîne normalement une augmentation de la puissance du laser jusqu'à ce qu'une certaine valeur plateau soit obtenue où la diode fonctionne à son maximum.

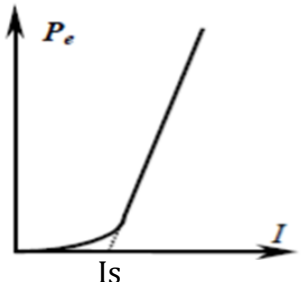


Figure II.6 : Evolution du courant en fonction de la puissance

II.3.4.3 Structure d'un Laser

La plupart des lasers à semi-conducteurs employés dans le domaine de la télécommunication sont à base de phosphure d'indium, car ils produisent des lumières de longueurs d'onde comprises entre 1300 et 1550nm [15]. Ceux fabriqués à base de d'arséniure de gallium de longueurs d'onde entre 660 et 900nm sont aussi fréquents.

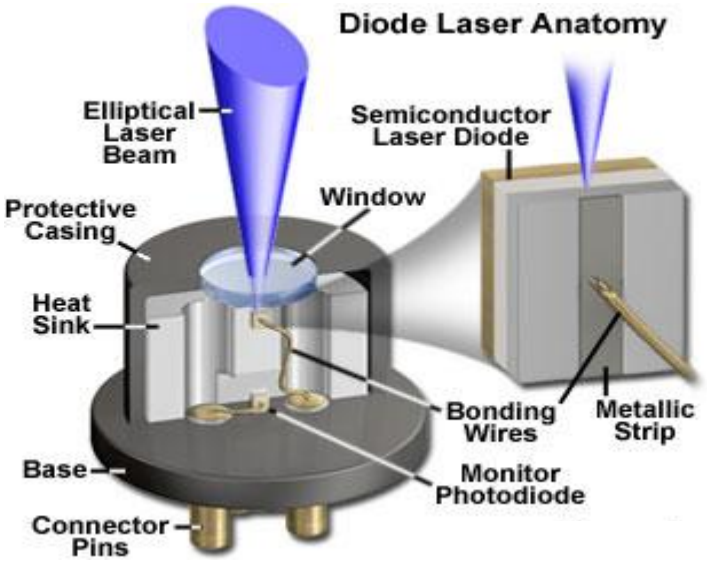


Figure II.7 : Structure d'un laser à arséniure de gallium [16]

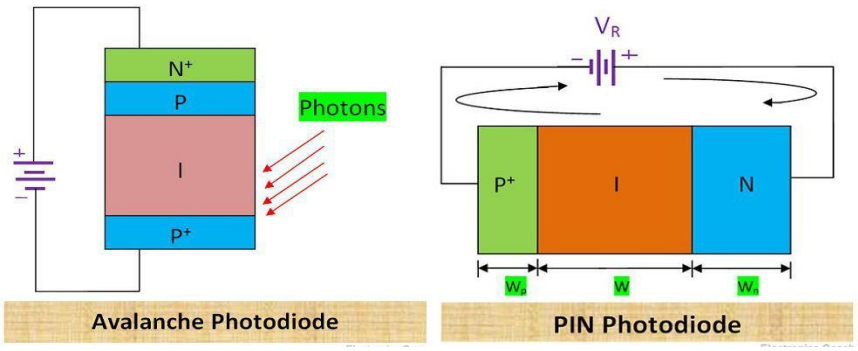
II.4 Photodétecteur

Un détecteur optique est un dispositif optique principalement formé d'une jonction PN de matériaux semi-conducteurs, qui fait la conversion du signal optique en signal électrique par le mécanisme d'absorption. Le signal (tension électrique) de sortie est proportionnel à la puissance optique incidente. Il existe deux types de photodétecteurs qui sont largement utilisés dans la communication optique : la photodiode PIN et la photodiode Avalanche.

II.4.1 Structure de Photodiodes

Les photodiodes à avalanche exploitent le phénomène d'avalanche du matériau semi-conducteur. Elles sont constituées d'une jonction PN dopée entourant une zone active d'une jonction PI qui peut être semi-dopée ou non dopée. Lorsqu'un électron généré par le signal optique est accéléré dans la région à fort champ électrique, il provoque une avalanche de porteurs supplémentaires, augmentant ainsi le courant de détection de manière non linéaire. Ce qui diffère dans le cas des photodiodes PIN qui, lorsqu'elles absorbent des photons de lumière par la région intrinsèque (I), ces derniers génèrent des paires électron-trou, produisant un courant proportionnel à l'intensité lumineuse. La structure d'une photodiode PIN est composée d'une jonction PN dopée entourant une simple zone intrinsèque I.

a)



b)

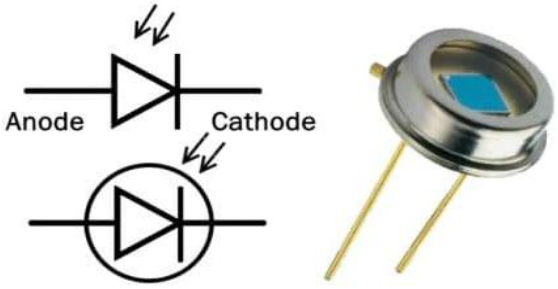


Figure II.8 : Schéma d'une photodiode a) structure interne b) structure externe

II.4.2 Efficacité quantique

L'efficacité quantique d'une photodiode est le rapport de nombres de pairs électron- trous générer sur nombres de photons incidents absorbés. Elle est donnée par la relation :

$$\eta = \frac{N_e}{N_p} = \frac{i_p/q}{P_{in}/h\nu} \qquad \textbf{Eq : II.3}$$

Ip est le photo-courant générer par la puissance optique incidente Pin, Ne nombre d'électrons et Np nombre des photons.

II.4.3 Sensibilité

La sensibilité d'une photodiode est la capacité de la photodiode à détecter un signal optique sur une longueur d'onde spécifique. Elle est définie par le rapport de photo-courant généré, divisé par la puissance optique incidente. La sensibilité varie en fonction de la longueur d'onde et diffère de types photodétecteurs.

$$S = \frac{I_p}{P_{in}} (A/Watt) \qquad \textbf{Eq : II.4}$$

II.4.4 Condition de détection

Pour qu'une photodiode assure une conversion optoélectronique dans des meilleures conditions et fournisse un signal électrique de bonne qualité, elle doit avoir :

- Une grande sensibilité à la longueur d'onde du signal optique incident ;
- Une grande bande passante ;
- Un faible bruit additionnel ;
- Une haute efficacité quantique ;
- Une faible dimension pour l'efficacité de couplage avec la fibre.

II.5 Small Factor Form Pluggable (SFP)

Le module SFP (Small Factor Form Pluggable) est un émetteur/récepteur optoélectronique qui assure la conversion des signaux électriques (souvent codés RZ ou NRZ) en des signaux optiques et vice-versa. Elle repose sur la modulation directe (interne) où le courant des impulsions module le laser dans la partie émission et la photodiode reconvertit la lumière en un courant électrique dans la partie réception. Les SFP sont caractérisés par : le débit de transmission, l'intervalle de fonctionnement en longueur d'onde, la distance permise, type de transmission (Simplex ou Duplex), et l'existence de la fonction DDM (Digital Diagnostics Monitoring).

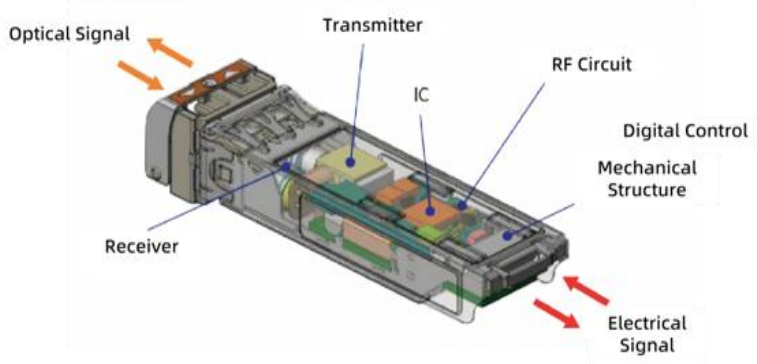


Figure II.9 : Schéma représentatif d'une SFP

II.5.1 Types de SFP

Les SFP existent sous différents types, tels que SFP, SFP+ et SFP28, offrant chacun des débits de données et des capacités différentes.

- SFP : +8Gbps
- SFP+/XSFP : 8Gbps/10Gbps
- QSFP+ (Quad SFP) 4 Canaux SFP+ : 40Gbps
- QSFP28 100G (4*25G = 100G) avec 4 canaux : 100Gbps
- QSFPDD QSFP Double Density : 400Gbps

II.5.2 Longueurs d'ondes de fonctionnement

Les modules SFP fonctionnent sur différentes longueurs d'ondes en fonction de leur type et de leur conception au besoin d'utilisation. Pour les fibres multimodes, ils fonctionnent sur des longueurs d'ondes comprises entre 850 nm – 1300 nm (max 500 m) et pour les fibres SM entre 1310nm-1625nm (2 Km - 120 Km) :

- SR : Short Range : 850nm (max 300 m);
- LR : Long Range: 1310 nm (max 10Km);
- LRM : Long Range Multimode : 850nm ;
- ER : Extended Range: 1550 nm (max 40 Km);
- ZR: Z-Range: 1550nm (80 Km-120 Km).

II.5.3 SFP et leurs applications

Les SFP supportent divers protocoles de communication. Ils sont très utilisés dans des réseaux PON (Passive Optical Network), GPON (Gigabits PON 2.5Gbps/1.25Gbps 1 :128 abonnés) et le EPON (Ethernet PON 1.25/1.25Gbps 1:32 abonnés maximum). Dans les réseaux GPON point à multi points entre l'OLT et la SFP, trois types de SFP sont utilisés : le SFP B+, C+ et C++. Et pour les réseaux EPON on retrouve les SFP PX20+, le PX20++ et PX20+++.

Comme tout photodétecteur, chaque SFP est caractérisée par sa puissance d'émission et la sensibilité à la réception. Voici quelques exemples :

- Les SFP B+ ont une puissance d'émission de 1.5dBm à 5dBm avec une sensibilité en réception de -28dBm ;
- les SFP C++ émettent sur 5.5dBm à 7dBm avec une sensibilité en réception de -32 dBm à -35 dBm ;
- Le PX20+ (3.5dBm à 4.5dBm), PX20++ (5.5dBm à 6dBm) et le PX20+++ (7dBm à 9dBm)

II.6 Amplificateurs optiques

Les amplificateurs optiques sont destinés à amplifier les signaux lumineux sans recourir à des solutions optoélectroniques OEO (Optique-électrique-optique). Il existe plusieurs types d'amplificateurs optiques tels que l'EDFA, le RFA et le SOA. L'effet d'amplification sur un signal optique peut être représenté comme le montre la figure II.10.

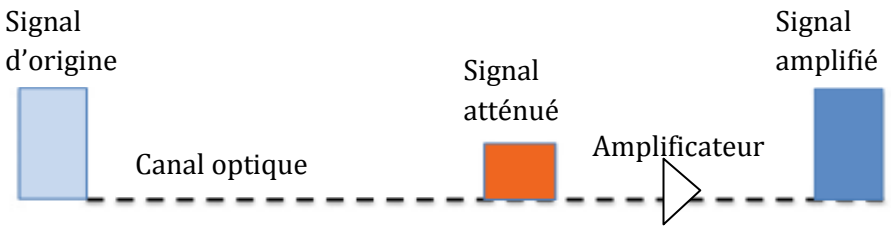


Figure II.10 : Effet d'amplification sur un signal

II.6.1 Amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium (EDFA)

Les EDFA exploitent les propriétés de l'erbium, un élément chimique incorporé sous forme d'ions dans une fibre optique. Lorsqu'un signal optique traverse la structure de la fibre dopée, ils absorbent l'énergie du signal et émettent de la lumière à une longueur d'onde spécifique, amplifiant ainsi le signal optique. Il est commandé par une source externe (pompe laser). Sa structure est la suivante :

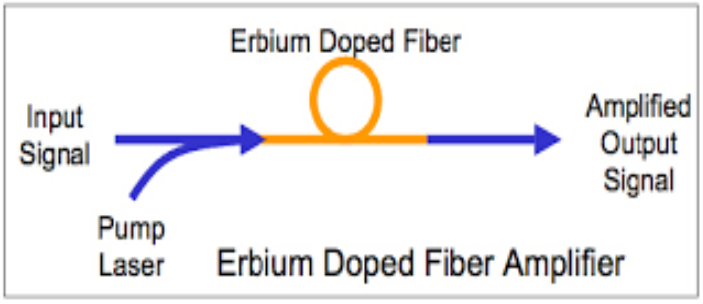
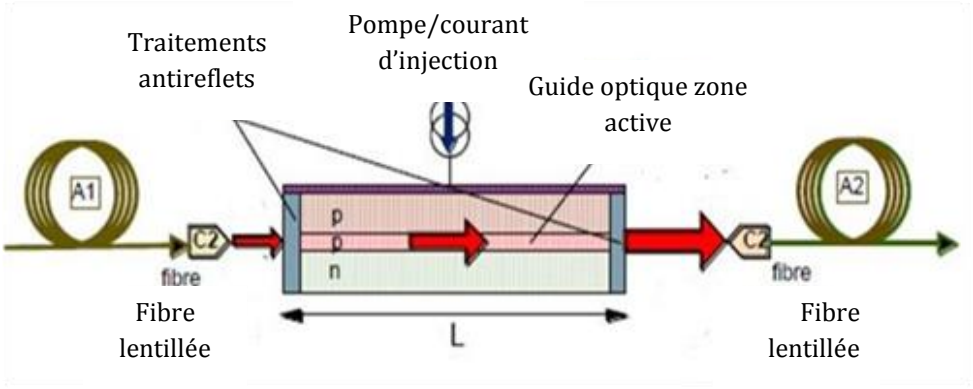


Figure II.11 : Structure d'EDFA

II.6.2 Amplificateurs optiques à semi-conducteurs

La structure de base des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) ressemble à celle d'une diode laser, mais est peu différente. Leur principe physique de fonctionnement est l'électroluminescence par émission stimulée. La réalisation de leur jonction PN du semi-conducteur se fait sur le même substrat.

a



b

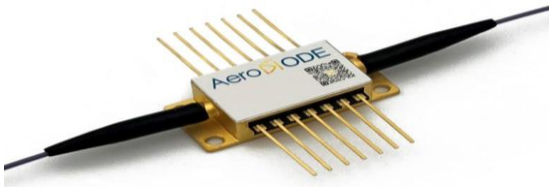


Figure II.12 : Schéma d'un SOA a)structure interne ; b) structure externe

II.6.3 Amplificateur de Raman

Les amplificateurs Raman utilisent le phénomène de « diffusion Raman » dans la fibre optique. Lorsqu'un signal optique traverse la fibre, une petite fraction de la lumière est diffusée de manière inélastique par les molécules de verre, changeant légèrement la fréquence de la lumière. Cela crée des "photons Raman" supplémentaires qui amplifient le signal optique d'origine.

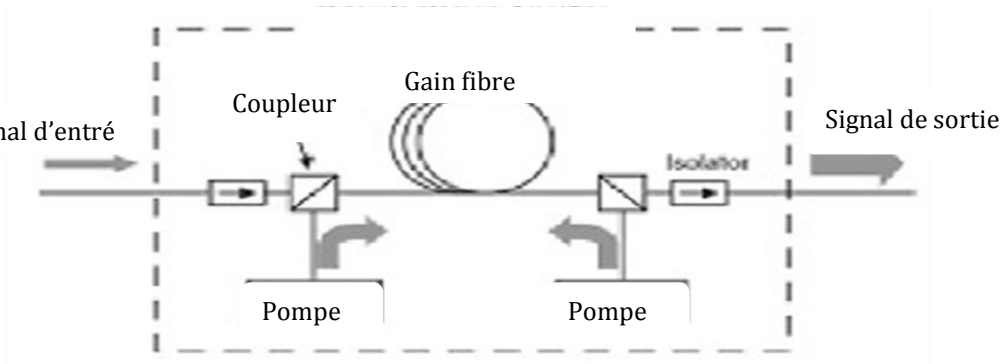


Figure II.13 : Structure d'amplificateur de Raman Discret

II.6.4 Comparaison de différents amplificateurs

Chaque type d'amplificateur présente des avantages et des limitations par rapport aux autres en termes de leur bande passante, de gain, d'applications et de bruit. Le choix d'un amplificateur dépend des exigences de performance et des contraintes dans lesquelles son utilisation est demandée, telles qu'en pré-amplification, amplificateur de ligne ou post-amplification.

Tableau II.2 : Tableau de Comparaison

Propriétés	**SOA**	**EDFA**	**Raman**
Gaine	>30	>25	>40
Longueur d'onde (nm)	1280 1650	1280 1650	1530 1560
Sensibilité	Oui	Non	Non
Bruit (dB)	8	5	5
Puissance de la pompe	<400>dB	>30dB	25mA
Intégration	Oui	/	Non
Coût	Faible	Élevé	Moyen

II.7 Multiplexage optique

Le multiplexage est une technique de transmission qui permet à plusieurs utilisateurs d'utiliser un même canal de transmission. Il consiste à rassembler plusieurs émetteurs sur le même support physique afin d'augmenter la bande passante et l'efficacité de la transmission des données. Il existe trois grandes principales techniques de multiplexage : le WDMA (Wavelength Division Multiple Access ou AMRF, Accès Multiple à Répartition en longueur d'onde), le TDMA (Time Division Multiple Access ou AMRT, Accès Multiple à Répartition en Temps) et le CDMA (Code Division Multiple Access ou AMRC, Accès Multiple à Répartition en Code).

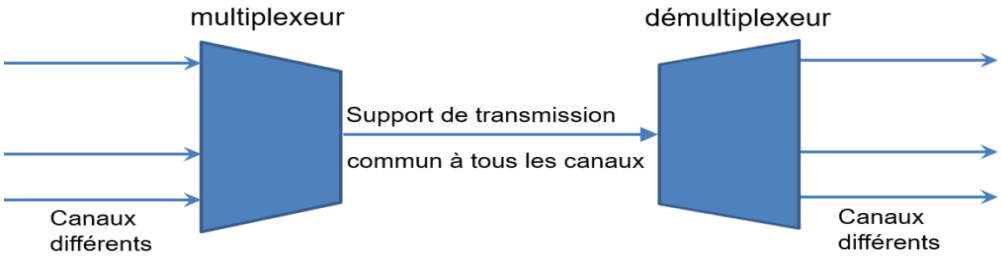


Figure II.14 : Technique de multiplexage

II.7.1 Wavelength Division Multiple Access WDMA

Il est le plus couramment utilisé dans le système de communication optique. Le WDMA partage le canal aux utilisateurs en leur répartissant les longueurs d'ondes (voir figure II.15). Il regroupe deux bandes de longueurs d'ondes, une pour la transmission et l'autre pour la réception. Chaque utilisateur voit s'attribuer deux longueurs d'ondes spécifiques pour les deux sens de communication. Le WDMA est souvent utilisé comme de manière fréquentielle ou il est remplacé par le FDMA (Frequency Division Multiple Access ou Accès Multiple à Répartition en Fréquence) qui dédie aux transmetteurs les fréquences existantes. Cette technique augmente considérablement la capacité du réseau en permettant à plusieurs flux de données d'être transmis simultanément sur la même voie sans s'interférer. Le WDMA peut être classé en trois catégories : CWDMA (Coarse WDMA où l'espacement entre les longueurs d'onde est de 20nm), le DWDMA (Dense WDMA avec un espacement de 0,8nm) et l'UDWDMA (Ultra-WDMA avec un espacement de 0,2nm voire 0,1nm).

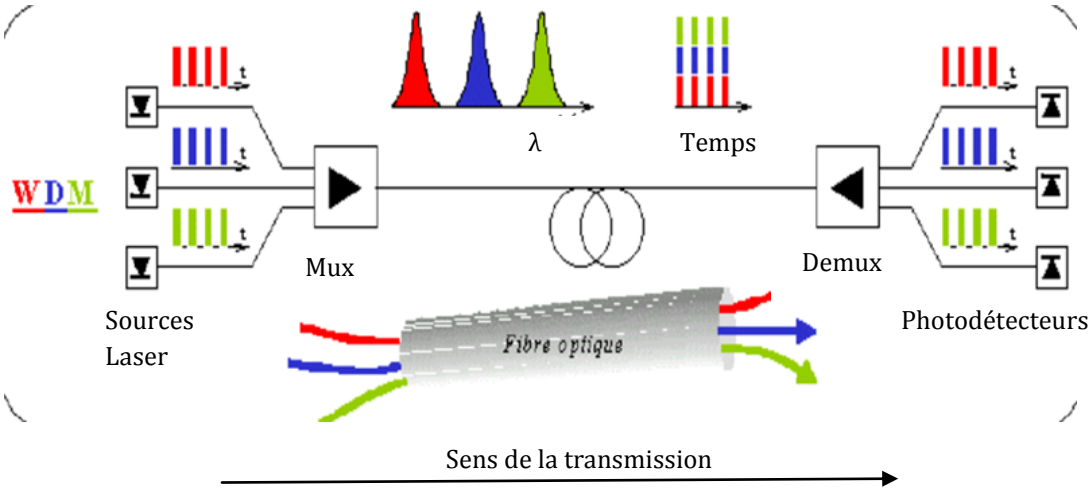
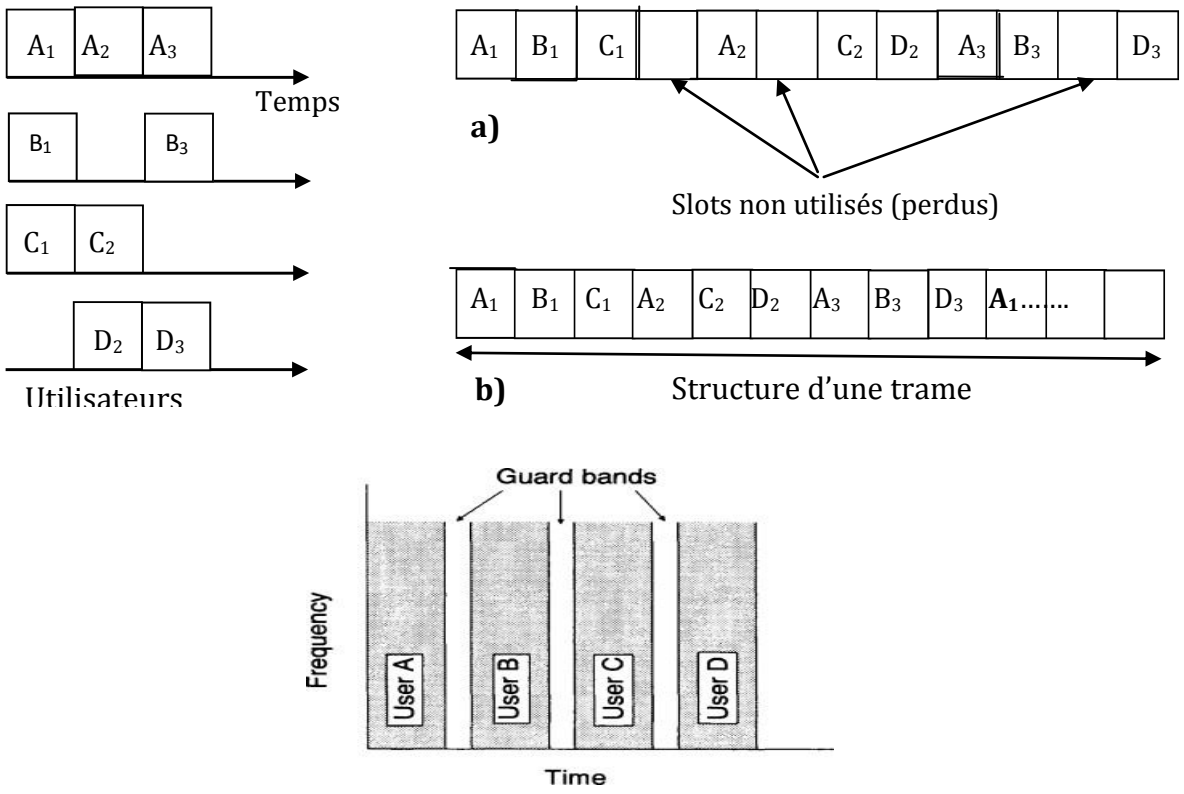


Figure II.15 : Multiplexage WDM

II.7.2 Time Division Multiple Access TDMA

Dans la technique TDMA, la bande passante de la fibre est divisée en créneaux temporels, permettant à plusieurs signaux à faible débit d'être transmis simultanément sur un canal haut débit. Chaque signal utilise à tour de rôle la totalité de la bande du canal. Les communications sont découpées en trames et chacune des trames est subdivisée en N slots temporels. La TDMA utilise deux modes de fonctionnement pour allouer à chaque utilisateur un intervalle de temps : on a le TDMA à assignement fixe et le TDMA à commutation de paquets. Dans le TDMA à assignement fixe, l'intervalle de temps est prédéfini et alloué de manière statique. Chaque source transmet ses données uniquement pendant l'intervalle de temps qui lui est alloué, cela garantit l'absence de collision entre les utilisateurs. Par contre, la méthode commutation de paquets donne accès au canal de manière dynamique en fonction des demandes des utilisateurs. Les données sont découpées en paquets individuels et transmises

de manière asynchrone. L'avantage de ce dernier est l'exploitation de toutes les ressources du réseau en termes d'efficacité et de bande passante, et son adaptation aux variations de trafics. Mais, il y a possibilité de congestion de flux de données. La figure II.16 nous donne un aperçu général des trafics de ces méthodes.



Technique d'accès TDMA

Figure II.16 : a) TDMA à assignement fixe, b) TDMA à commutation de paquets

II.7.3 Multiplexeur OADM

L'OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) est un multiplexeur à insertion/extraction employé dans les systèmes de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) et le routage des canaux lumineux dans ou hors le support de transmission (fibre optique monomode). Il assure l'ajout ou le retrait sélectif d'un ou plusieurs signaux de longueur d'onde différente sans affecter la transmission des autres. En fonction de leurs structures et configurations, on distingue deux types d'OAMD [16] : OADM Fixe (FOADM) et OADM Reconfigurable (ROADM).

Les FOADM ont une structure simple basée sur une configuration statistique où les canaux sont pré-assignés à des nœuds statiques. Contrairement au ROADM qui permet d'ajouter et d'extraire dynamiquement des longueurs d'onde par reconfiguration à distance. Ce dernier offre une flexibilité au routage des flux optiques.

Dans la plupart des cas, la structure interne d'OADM est constituée de multiplexeur, de démultiplexeur et de circulateurs qui assurent, à base de filtre de Bragg FBG (Fiber Bragg Grating), la reconfiguration des chemins des signaux à extraire et/ou à ajouter dans le réseau.

Supposons l'illustration dans la figure II.17 qui montre le principe d'extraction et d'ajout d'un canal. Dans cet exemple, la longueur d'onde " rouge " est réfléchie par le filtre FBG, ensuite réorientée par le premier circulateur, puis injectée dans la ligne par le deuxième circulateur.

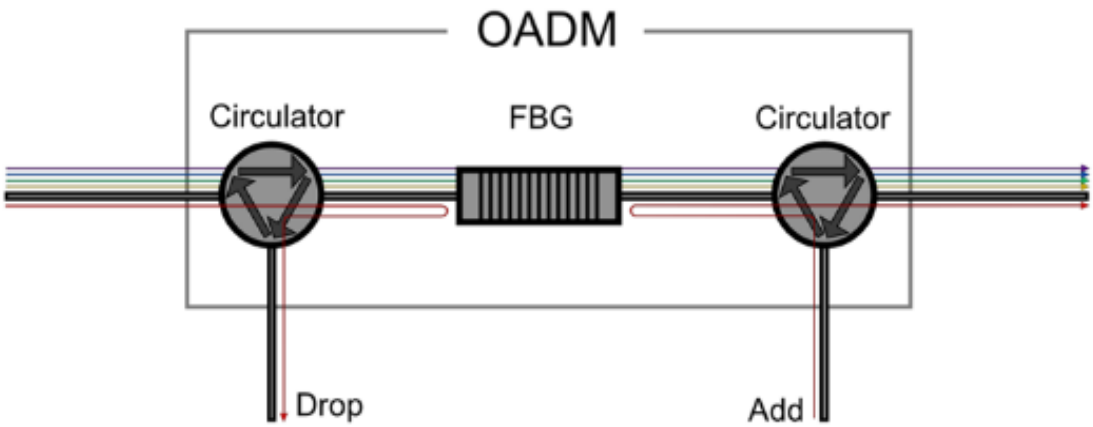
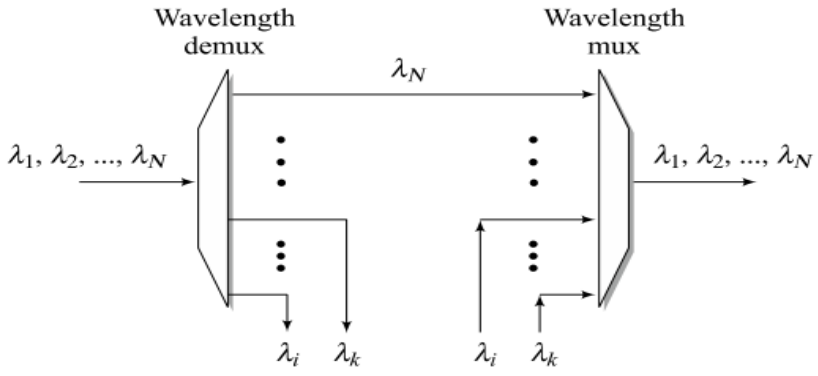


Figure II.17 : Circulateurs optiques a insertion extraction

La configuration d'un OADM peut être implémentée pour sélectionner une seule ou un groupe de longueur d'onde voisin. Dans ce cas, deux architectures sont possibles (voir figure II.18).

Considérons le nombre N des longueurs d'ondes qui sont transmises dans une fibre. La première méthode de configuration consiste à une architecture simple dans laquelle chaque canal passe individuellement l'entrée de par l'OADM. Cela implique que l'extraction de tout canal parmi le N canaux est possible. La seconde architecture consiste à faire passer dans l'OADM une bande de longueur d'onde spécifique. Dans ce cas, les N longueurs d'onde sont regroupés en bandes [10].

a)



b)

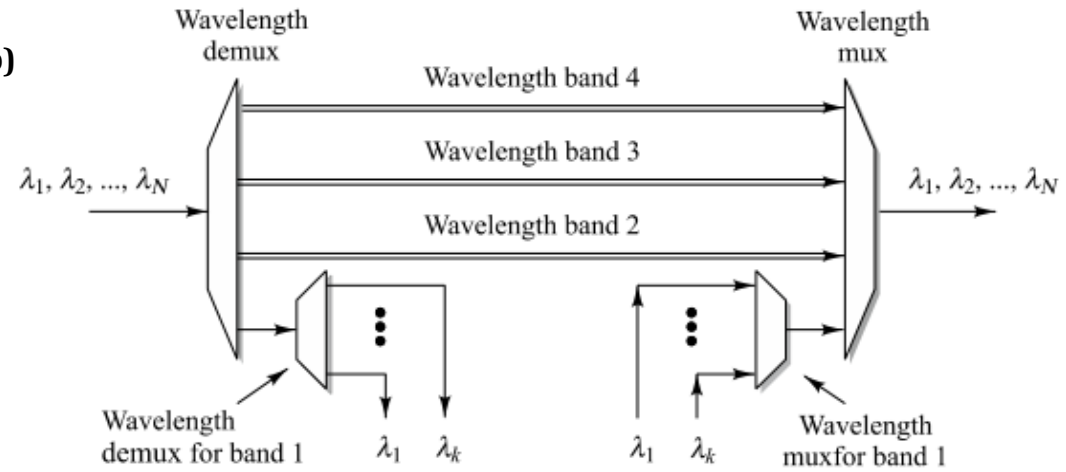


Figure II.18 : a) Concept d'un simple OADM, b) OADM passive modulaire extensible

II.8 Modulateur numérique

La transmission des données par les ondes lumineuses dans le système de la communication optique se réalise par deux types de modulations, la modulation directe (interne) où le signal information module directement l'onde lumineuse et la modulation externe. Or, dans la modulation externe, 'information est portée par une lumière émise indépendamment qui est modifiée (modulée) par un modulateur externe (tel que le modulateur de Mach-Zehnder). La modulation externe est plus couramment utilisée, car elle permet d'augmenter le débit de la transmission et de rendre le système cohérent. Dans cette section, nous allons étudier trois modulateurs numériques comme l'ASK, QPSK et QAM.

II.8.1 Modulation d'amplitude ASK

La modulation d'amplitude ASK (Amplitude Shift Keying) permet de moduler l'amplitude de l'intensité lumineuse. Le signal numérique information module directement l'amplitude du signal porteur. Chaque nouveau d'amplitude est modulé pour représenter les bits d'information. Il est évident de noter que l'ASK prend référence à la modulation OOK (On-Off Keying) où le signal binaire est présenté par deux bits : l'absence du signal est représentée par le bit zéro et le bit est identifié lorsque l'amplitude du signal est au niveau maximum.

Sur le canal, l'information est portée par un signal sinusoïdal d'amplitude et de phase fixes auquel les bits sont représentés par des durées symboles, soit par un ou par groupe selon le degré de la modulation. La figure II.19 nous montre l'exemple d'un signal modulé ASK.

La relation liant le signal information noté m(t) et la porteuse p(t) est donnée par :

$$\boldsymbol{m(t) = \sum_k a_k g(t - kTs)} \qquad \textbf{Eq : II.5}$$

$$\boldsymbol{P(t) = A_p Cos(2\pi f_p t)} \qquad \textbf{Eq : II.6}$$

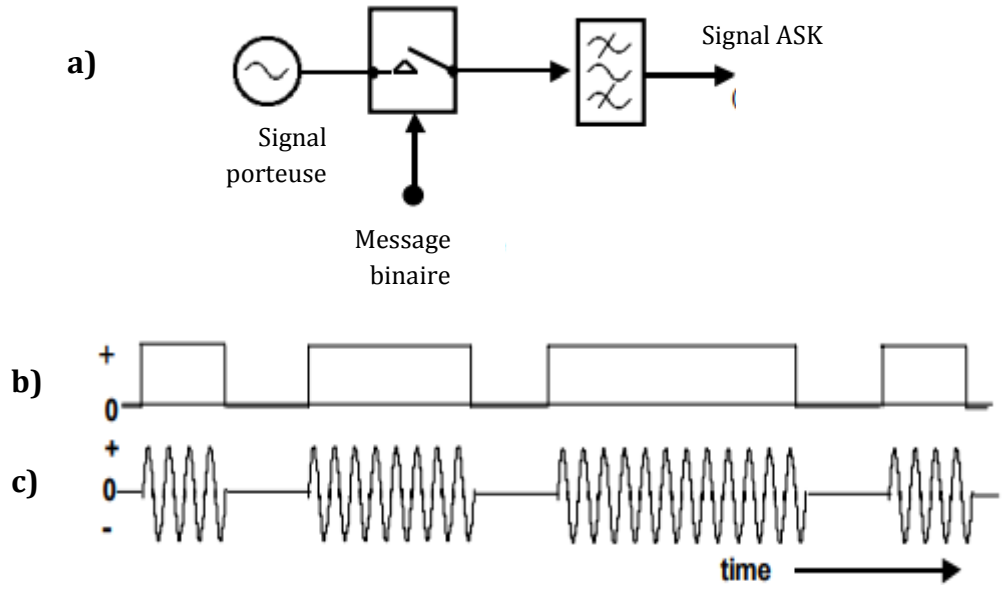


Figure II.19 : Principe de génération de signal ASK b) Signal information c) Signal modulé ASK

II.8.2 Modulation de phase QPSK

La modulation à déglacement de phase QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) est une technique de modulation permettant de transmettre deux bits par symbole. Elle repose sur la modulation de phase PSK où les données modulent la phase du signal porteuse. Le terme Quadrature qualifie le fait que l'information module le signal en phases de 90 degrés de décalage. A chaque phase, on lui associe un symbole, comme on peut l'observer sur le cercle de constellations.

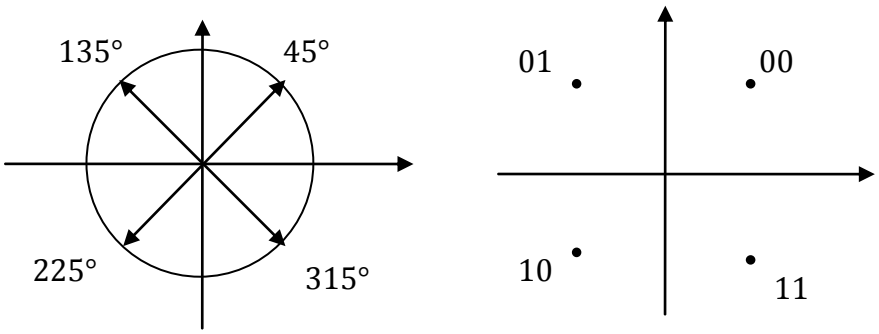
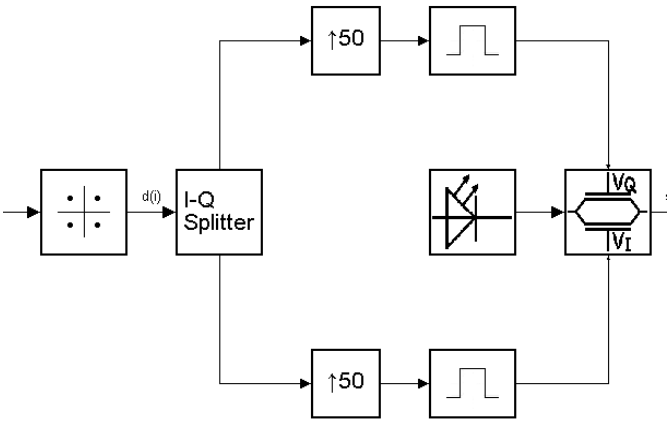


Figure II.20 : Digramme de constellation

Les symboles sont déterminés en utilisant le code de Grey où un seul changement de bit est opéré entre les bits voisins : 00 → π/4; 01→ 3π/4 ; 10 → 5π/4 ; 11 → 7π/4.

La configuration de ce système est basée sur la modulation externe utilisant un modulateur de phase, comme le montre la figure II.21.

a)



b)

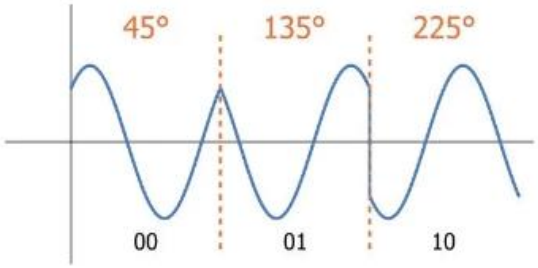


Figure II.21 : a) Modulateur QPSK ; a)Signal modulé QPSK

II.8.3 Modulation d'amplitude a Quadrature

La QAM (Quadrature Amplitude Modulation) résulte de la composition de la modulation d'amplitude et de phase. Elle combine les deux systèmes pour augmenter le nombre d'utilisateurs et la capacité du réseau. Elle utilise deux porteuses sinusoïdales de fréquences différentes déphasées de 90°.

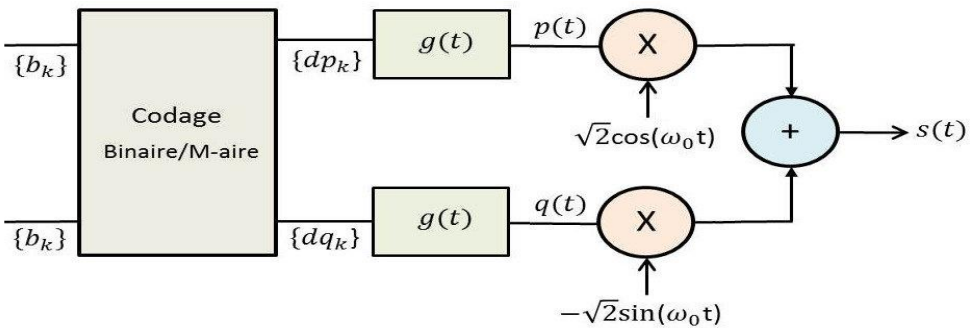


Figure II.22 : Schéma de modulateur QAM

L'expression mathématique du signal de sortie est exprimée par la formule :

$$S(t) = p(t)\sqrt{2} * cos(w_0 t + \Phi) - q(t)\sqrt{2} * sin(w_0 t + \varphi) \qquad \textbf{Eq : II.7}$$

Avec $p(t) = \sum_k \sqrt{2} * d_{pk} g(t - kT_S)$ et $q(t) = \sum_k \sqrt{2} * d_{qk} g(t - kT_S)$

Le coefficient $\sqrt{2}$ est un facteur de normalisation dans les calculs de puissance.

Dans cette technique de modulation, les points de constellations sont disposés sur le diagramme en fonction d'amplitudes et de phases. La modulation QAM supporte une capacité de transmettre m bits à la fois sur M symboles possibles (donné par $m=\log_2 M$). Prenons l'hypothèse d'un formant à trois bits (m=3), ce qui nous donne huit (M=8) symboles. Si nous choisirons l'hypothèse de deux amplitudes différentes A et A/2, nous pouvons avoir les points de constellation comme suit :

Tableau II.3 : Correspondance point de constellation-phase-amplitude

Symboles	Amplitude	Déphasage
000	A/2	2π
001	A	2π
010	A/2	π/2
011	A	π/2
100	A/2	π
101	A	π
110	A/2	3π/2
111	A	3π/2

La répartition de ces points sur le cercle de constellation et le digramme du signal modulé 8QAM sont les suivantes.

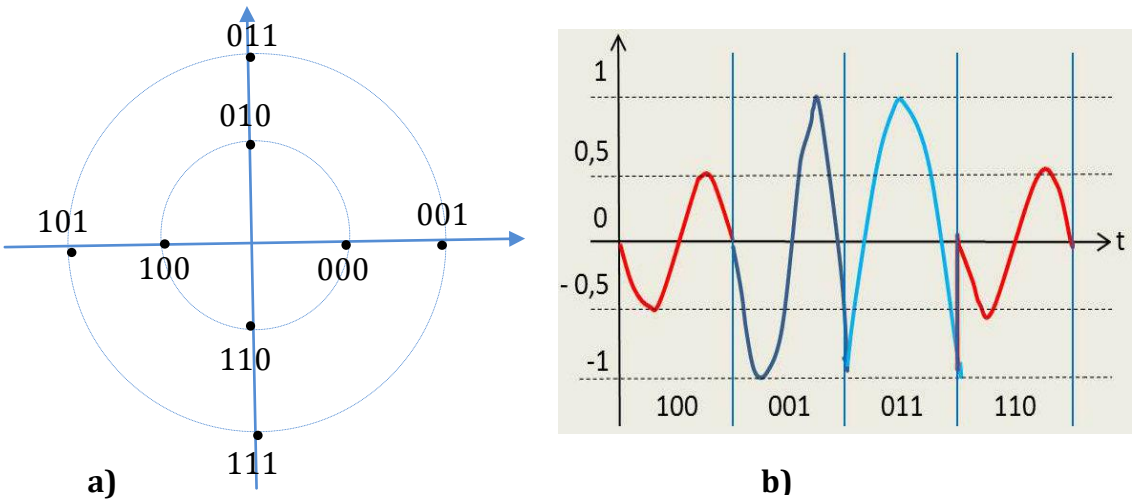


Figure II.23 : a) Diagramme de Constellation; b) Signal modulé 8-QAM

II.9 Filtres Optiques

Transmettre plusieurs signaux sur un même support est avantageux, mais peut créer des confusions aux récepteurs pour déterminer les signaux qui leur sont appropriés. Les filtres permettent ainsi, de bloquer ou de laisser passer sélectivement les différentes longueurs d'ondes transmises. Ils exploitent évidemment les phénomènes optiques tels que la réflexion, l'interférence ou la diffraction pour ajuster les longueurs d'ondes. De nombreuses conceptions ont été réalisées pour atteindre cet objectif. Nous pouvons citer, entre autres, le filtre de Bragg à trois ports et le filtre FWDM (Filter Wavelength Division Multiplexer).

II.9.1 Filtre de Bragg à trois ports

Le filtre de Bragg à trois ports est un filtre optique composé d'un réseau de Bragg FBG (Fiber Bragg Grating) relié entre le port d'entrée et de sortie par un circulateur à trois ports. Un réseau de Bragg est un segment de fibre optique d'une longueur L dans lequel l'indice de réfraction du cœur est modifié de façon périodique ou quasi périodique [17]. Chaque période du réseau assure la réflexion d'une longueur d'onde spécifique appelée longueur d'onde de Bragg λ_B. Ces longueurs d'ondes doivent être en interférence constructive et remplir la condition de Bragg définie par la relation :

$$\boldsymbol{\lambda_B = 2n_{eff} \wedge} \qquad \textbf{Eq : II.8}$$

n_{eff} : l'indice effectif du cœur ; $\wedge$: Pas du réseau ou période

Il y a de nombreuses formes de structure de FBG qui ont été développées, parmi lesquelles on trouve la FBG de structure uniformes. Elle est aussi appelée Réseau de Bragg à petit pas ou simplement FBG, Ces types de réseaux uniforme ont une variation d'indice du cœur période et perpendiculaire tout au long de la structure et de l'axe longitudinal de la fibre [18], comme on le constate sur la figure II.24.

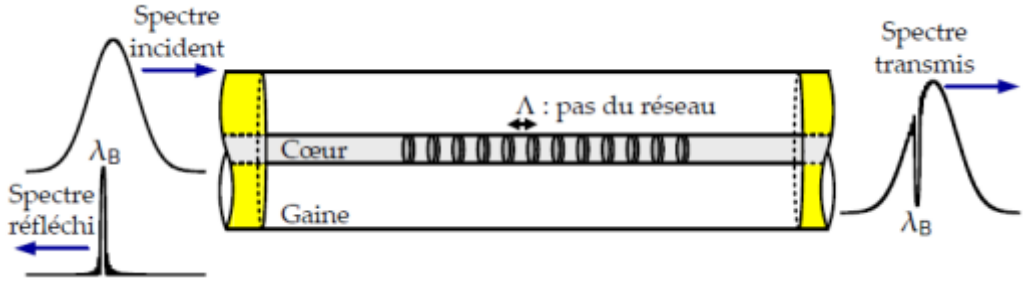


Figure II.24 : Structure d'un réseau de Bragg FBG

Dans un filtre de Bragg à trois ports, le spectre incident suit deux chemins distincts après une interaction avec le réseau de Bragg. Ces deux chemins ont des longueurs de propagation différentes. Les trois ports du dispositif référent aux trois voies optiques empruntées par les spectres (incident, transmis et réfléchi) [19] :

- **Port d'entrée** : c'est le port par lequel la lumière incidente est introduite dans le dispositif.
- **Port de sortie principal** : C'est le port de la sortie de la lumière transmise ou filtrée.
- **Port de réflexion ou de rétroaction** : c'est la sortie de la lumière réfléchie et renvoyée en arrière du dispositif.

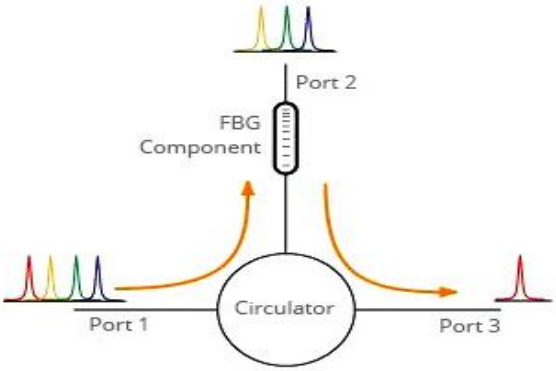


Figure II.25 : Filtre FBG à trois ports

Nous pouvons constater dans cette configuration de figure que le FBG est conçu pour réfléchir la longueur d'onde "rouge". « Les réseaux de Bragg à fibres (FBG) sont des composants optiques passifs clés présentant de nombreux avantages, notamment une géométrie entièrement fibreuse, une petite taille, une faible perte d'insertion, une bonne isolation et une grande flexibilité » [20]. La structure à trois ports permet d'éviter le retour de la lumière réfléchie vers la source et de minimiser l'interférence.

II.9.2 Filtre FWDM

Le FWDM (Filtre Wavelength Division Multiplexe) est un filtre diélectrique à couche mince basé sur le multiplexage WDMA. Il est de la famille TFF (Thin-film filter) d'une structure à "Etalon" ou à résonance "cavité Fabry-Pérot" [21]. Il est utilisé comme un Mux/Demux à division de longueurs d'ondes pour combiner ou séparer de différentes longueurs d'ondes [10]. Les filtres FWDM sont largement appliqués dans les amplificateurs comme l'EDFA, Raman. Ils sont employés dans les réseaux PON, CATV et FTTH pour accroître la capacité et l'efficacité des réseaux en offrant des fonctionnalités comme une faible perte d'insertion, une meilleur stabilité et une moins de dépendance à la polarisation.

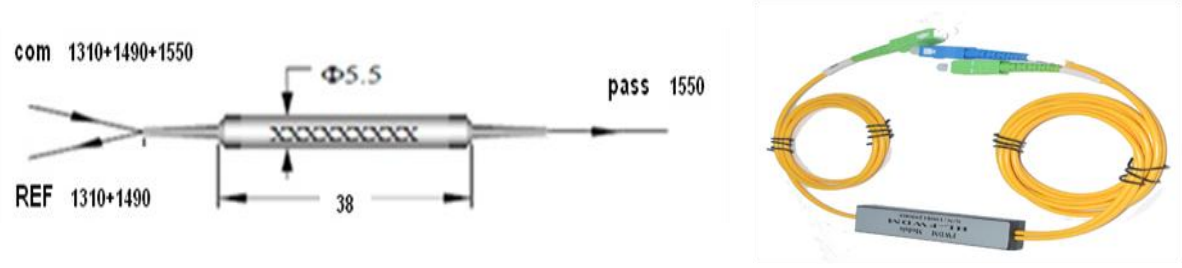


Figure II.26 : Schéma de FWDM a) Structure interne b) Structure externe

La figure II.26 montre la structure d'un filtre FWDM à trois ports qui fonctionne sur les longueurs 1310/1490/1550. Le port Bleu (sortie) comporte tous les trois signaux 1310/1490 (FTTH) et 1550 (CATV), le port vert PASS pour λ=1550 et le port vert REF pour λ=1310/1490.

II.10 Routage optique

Plus tard, en 1996, après le développement et l'application des techniques WDM aux architectures de réseaux optiques, une technique est apparue pour le routage optique : le réseau optique acheminé en longueur d'onde WRON (Wavelength Routed Optical Network) [22]. Son principe se base sur le spécimen de réseaux de commutation de circuits optiques OCS (Optical Circuit Switching). Ces infrastructures utilisent des circuits optiques dédiés durant toute la durée de la communication pour établir les connexions entre les utilisateurs. Et lorsque la transmission de données est complète, la connexion est automatiquement coupée. Il y a deux types de WRON : WRON statique ou semi-statique et WRON dynamique. La différence réside dans la manière dont les chemins lumineux sont attribués [23]. Le WRON statique fournit des liens logiques entre les nœuds pairs lors de la conception du réseau. Par contre, dans le WRON dynamique, les liens logiques sont établis à la demande (lors de besoin de transaction).

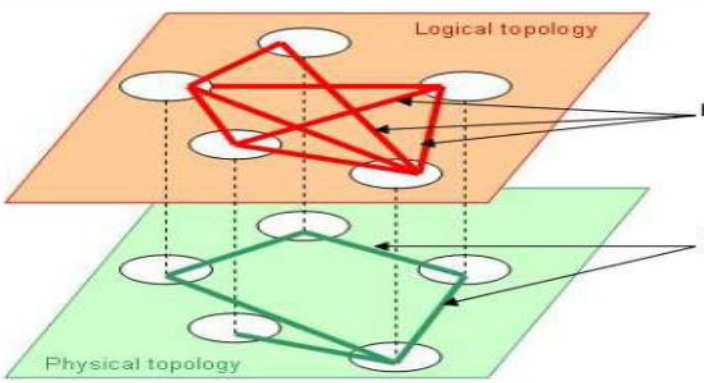


Figure II.27 : Architecture WRON [23]

L'un des inconvénients de ce système est le fait que la connexion reste établie durant toute la durée de la communication. Cela gaspille la bande passante du canal, car dans certaines conditions les utilisateurs envoient des données de différentes longueurs de trames et qu'une large partie de bande passante reste inutilisée par les trafics de petites trames [4]. Cette utilisation inefficace de la bande peut être résolue grâce à la technique de commutation par paquets OPS (Optical Packet Switching). Contrairement à l'OCS, l'OPS utilise la commutation par paquet pour acheminer les données. Un commutateur de paquets optique remplit les quatre fonctions de base de routage, de lecture, d'écriture, de transfert, et de mise en mémoire tampon [4,24].

II.11 Conclusion

Il a été présenté dans ce chapitre, les dispositifs optiques qui sont essentiels pour la transmission des données dans les systèmes de communication optique. Bien qu'une simple liaison optique soit concevable par un minimum de composants tels que (Émetteur + fibre + récepteur), les réseaux métropolitains, régionaux et mondiaux nécessitent une mise en place de certains composants additionnels comme les amplificateurs et les multiplexeurs pour performer dans les niveaux de nos attentes. Ce pendant, les dispositifs employés par cette technologie sont utilisés dans des conditions très exigeantes pour qu'ils soient performants. Pour cela, la protection d'une ligne optique pour assurer la redondance connues par OLP (Optical Line Protection), est cruciale pour bénéficier des l'avance de cette technologie. Ainsi, le chapitre 3 sera consacré à l'étude des architectures et à la conception d'un nouveau système de protection.

Chapitre III

Réalisation et test d'une ligne de protection optique (OLP)

III.1 Introduction

Le système de protection optique OLP (Optical Line Protection) est une technologie qui repose sur des stratégies de redondance et de commutation rapide pour garantir une continuité de service optimale et la disponibilité du réseau, minimisant les risques de pertes de connexion en assurant plusieurs chemins alternatifs entre les points de communication. Cette approche s'applique aux réseaux optiques, où la fiabilité et la performance sont essentielles. Il intègre des mécanismes de surveillance en temps réel pour détecter les défaillances sur les composants du réseau, tels que les fibres optiques, les équipements de transmission et les nœuds de commutation. Ce chapitre sera structuré en deux (2) grandes parties. La première section sera protée sur un aperçu général sur l'architecture de lignes de protection optiques, puis la seconde partie sera réservée à la mise en place et à la conception d'un nouveau système de protection.

III.2 Présentation des systèmes des protections optiques

Pour renforcer la fiabilité et éviter l'interruption du réseau, les liaisons optiques doivent être conçues avec une topologie redondante, comprenant des boucles de communication et /ou des chemins alternatifs pour contourner les points de défaillance potentiels. Plusieurs architectures de redondance et de protection ont été proposées. Parmi lesquels nous pouvons citer : l'architecture de protection standard de PON (Passive Optical Network), la protection par le Réseau Optique Satellitaire SON (Satellite Optical Network), la protection par FSO (Free Espace Optique), la protection point à multipoint, protection par chemin multiple, protection par XOR, protection de bout en bout, la protection sans fil, l'hybride sans fibre optique, l'hybride micro-onde fibre optique.

III.2.1 Architectures des réseaux PON sécurisées par un système OLP

Largement déployée pour fournir des services de communication à haut débit dans les liaisons optiques modernes avec une faible consommation d'énergie et une économie de coûts grâce à l'utilisation d'équipements passifs, la structure de base d'un réseau PON est composée principalement de [25]:

- L'OLT (Optical Line Terminal) : situé au niveau du Central, il est responsable de la gestion et du contrôle du réseau, ainsi que de la transmission des données vers et depuis les abonnés.

- L'ONU (Optical Network Unit) : assure la gestion de l'abonné, l'interconnexion et la conversion du signal.
- Le canal de transmission : c'est la fibre optique.
- ODN (Optical Distribution Network) : assurant la distribution de signaux vers les abonnés finaux, l'ODN est constitué de tels que les coupleurs, diviseurs de paissance, etc.

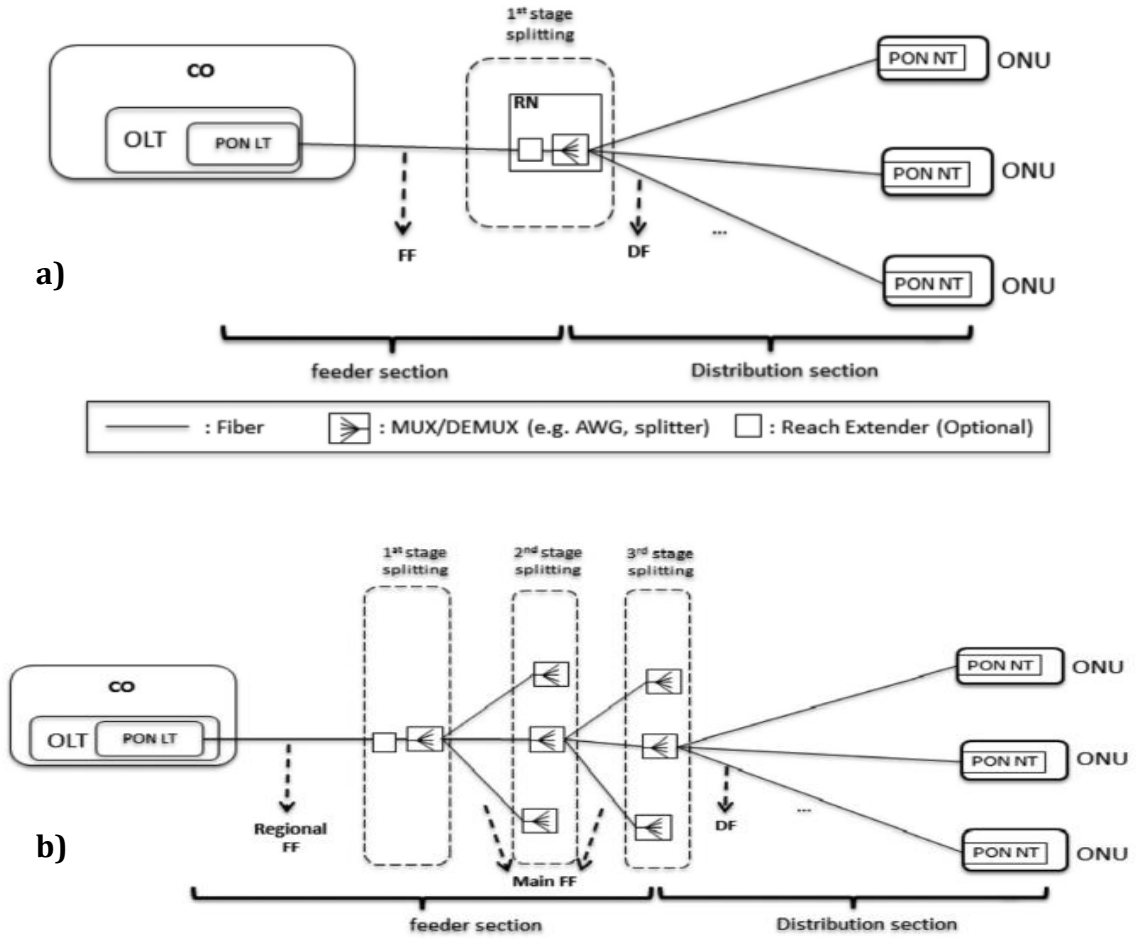


Figure III.1 : Architecture de base d'un réseau PON, a) avec un seul niveau de division, b) avec plusieurs niveau de division [23]

III.2.2 Protection des réseaux PON

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

III.2.2.1 Système de protection de type A

La protection de type A définie par la norme ITU-T G983.1 assure la redondance du canal FF (Feeder Fiber) au niveau de la section d'alimentation (Feeder section). Deux fibres FF et FF' sont déployées, dont l'une principale et l'autre secondaire, auquel les données se basculent grâce à un switch en cas de défaillance de la ligne primaire et vis vers ça.

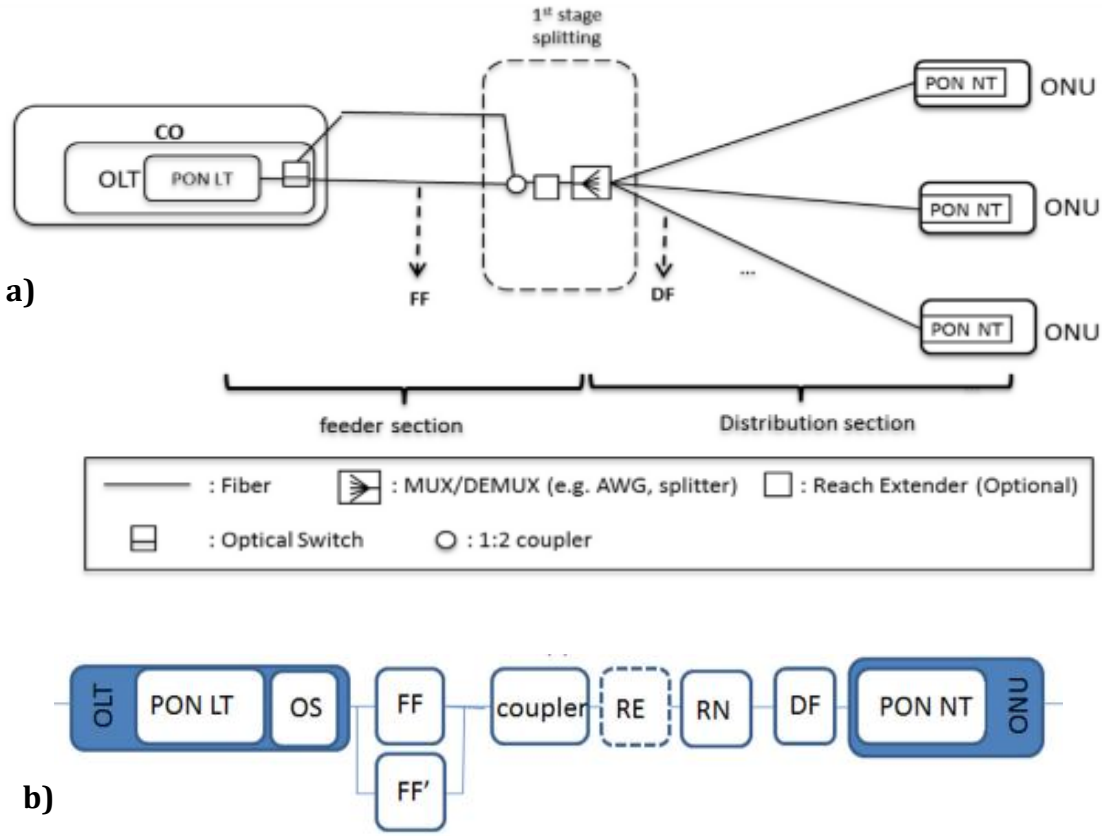


Figure III.2 : a) Protection de type A, b) Diagramme de blocs de fiabilité [26]

III.2.2.2 Système de protection 1+1

L'OLP 1+1 fonctionne en mode full duplex. Ce système est de la famille du standard du type C, et permet le trafic de données en simultané sur les deux lignes, auquel à la réception elles seront choisies en fonction de leur 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.

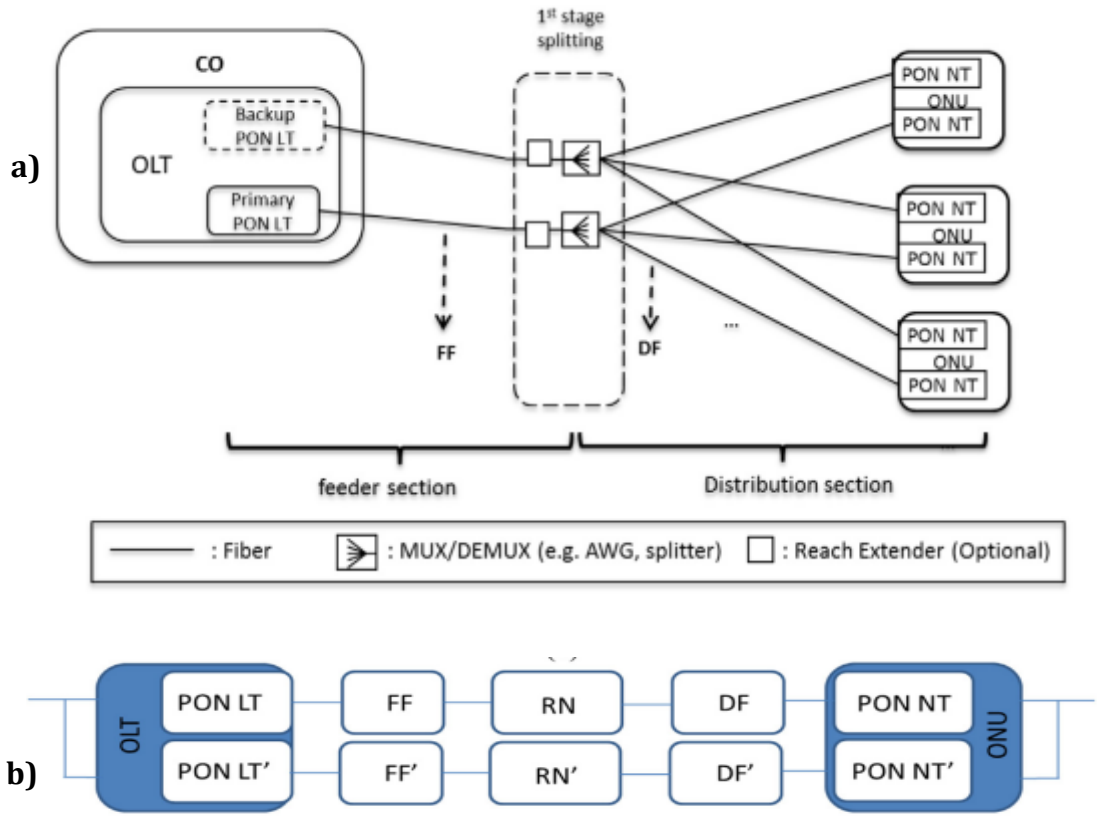


Figure III.3 : a) Schéma Protection 1+1, b) Diagramme de blocs de fiabilité [24]

Dans cette architecture, le récepteur peut se disposer d'un opérateur logique All-Optical XOR permettant de fournir en sortie l'un des signaux reçus, comme illustré dans sa table de vérité (voir tableau III.1).

Tableau III.1 : Table de vérité XOR

A	B	A⊕B	A⊕(A⊕B)=B	B⊕(B⊕A)=A
0	0	0	0	0
0	1	1	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	1	1

Illustrons un exemple d'un réseau à quatre nœuds, avec deux nœuds sources A et B et un nœud de destination D (comme le montre la figure III.4 a). Le nœud A transmet un flux continu de bits ***a,*** tandis que le nœud B envoie le flux ***b***. Si on souhaite établir une connexion robuste à la défaillance d'un seul lien, alors, un seul chemin depuis une source jusqu'au puits n'est pas suffisant. Par conséquent, les deux nœuds sources envoient leurs flux au nœud C et le nœud C combine les bits des deux flux en utilisant XOR 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 ⊕ b)

flux reçu de C avec le flux ***b*** reçu de B. De même, D peut récupérer ***b*** si la liaison (B, D) échoue. Sans codage réseau, une protection dédiée n'est pas possible pour ce réseau [2].

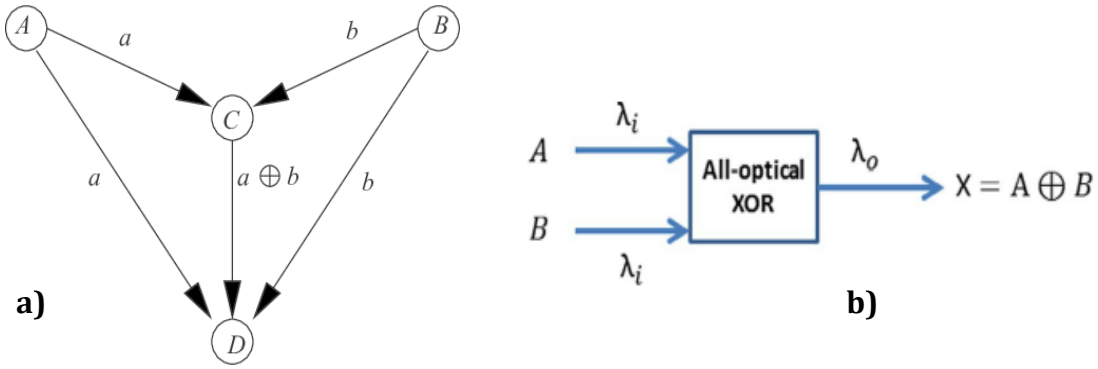


Figure III.4 : a) code réseau statique contre une panne de lien unique b) model XOR

III.2.2.3 Technologie en anneau

Le principe de fonctionnement de la topologie en anneau basée sur fibre pour la protection des PON repose sur l'utilisation d'un mécanisme de protection efficace pour l'ensemble du réseau. Ce mécanisme utilise des encodeurs optiques pour surveiller le réseau, tandis qu'un système de gestion réseau dans le bureau central initie le processus de protection en surveillant les informations collectées. Lorsque le réseau fonctionne normalement, la technologie de multiplexage par répartition spatiale est adoptée pour réduire les pertes et les diaphonies des signaux. Le système conçu propage les signaux montants et descendants dans différents anneaux de fibres pour atténuer l'influence de la rétrodiffusion Rayleigh [28].

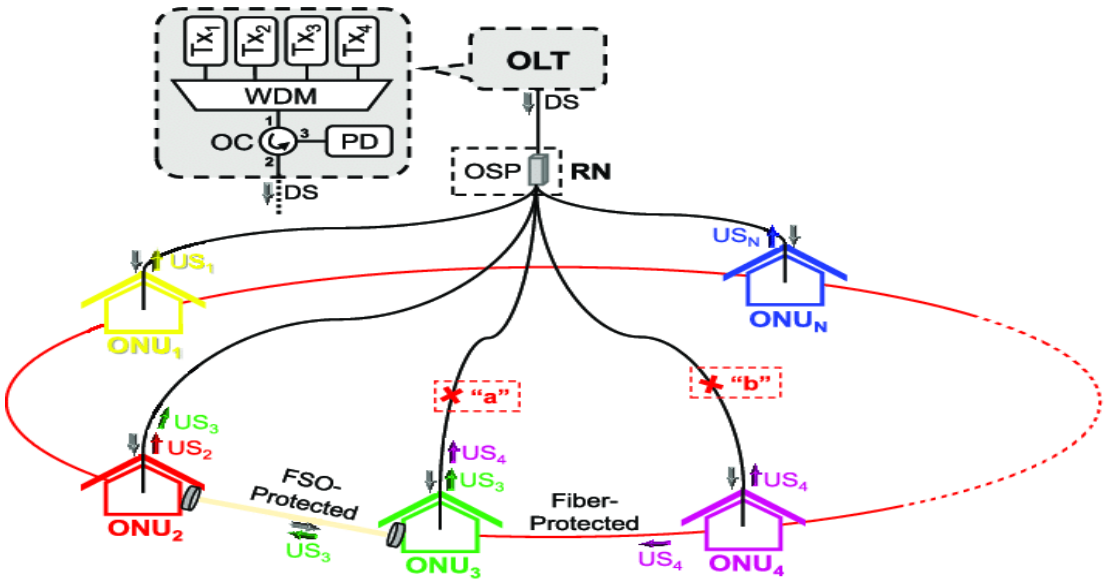
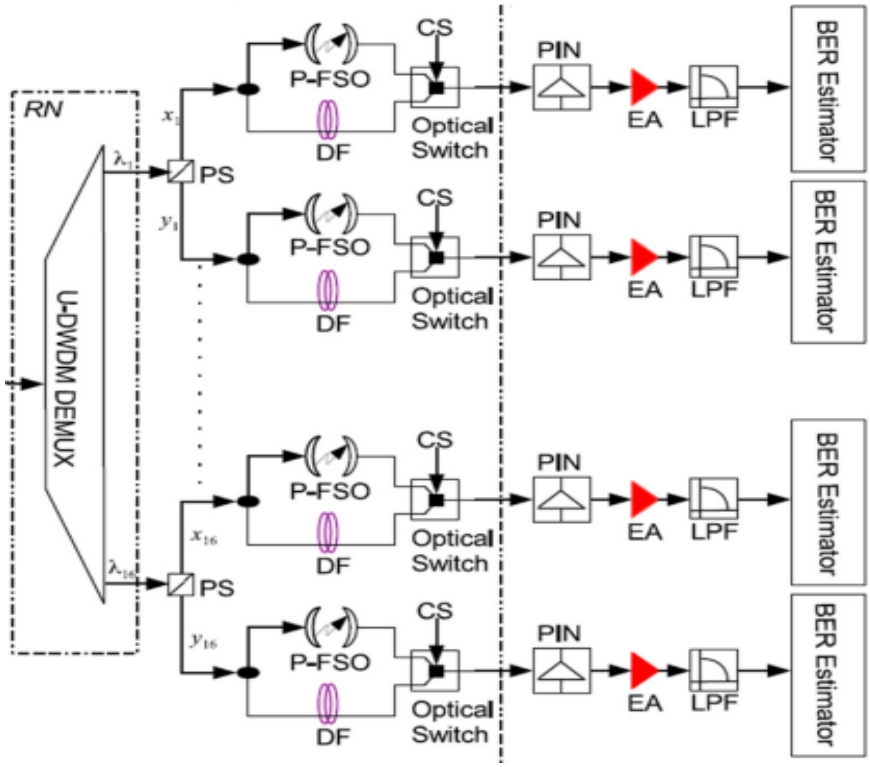


Figure III.5 : Architecture d'un système de protection en anneau [26]

III.2.3 Système de protection par SFO

Ce système de protection est utilisé dans des liaisons de transmission Backup en Outdoor lorsque l'environnement géographique est très difficile ou inapproprié pour installer la fibre optique, en raison d'une rivière plus large, d'un sol rocheux, d'une grande montagne ou d'autres facteurs environnementaux [29]. La communication optique en espace libre FSO (Free Space Optic) est une technologie utilisant les faisceaux lasers pour les transferts des données via le vide. En plus de secourir la fibre optique pour garantir une disponibilité de réseaux à très haut débit dans certaines conditions, le FSO se présente aussi comme une solution pour la redondance en liaison optique à côté de la fibre. Le concept schématique du réseau peut se définir comme l'indique la figure ci-dessous (figure III.6).



PS: Polarization Splitter; **EA**: Electrical Amplifier; **DF**: Distributed Fiber; **CS**: Switch;

LPF: Lower pass filter; **PIN**: Positive Intrinsic Negative; **RN**: Remote Node

Figure III.6 : Architecture d'un système de protection par FSO [27]

III.2.4 Protection par satellite

La redondance en lien optique pourrait bien être terrestre que satellitaire. Les désastres naturels tels que le volcanisme, le tremblement de terre et bien d'autres causes nous permettent de dire que toutes les solutions de redondance et de protection citées ci haut ne peuvent être dans tous les cas favorables. C'est pourquoi l'utilisation du satellite comme liaison de secours est dans certains cas sollicitée. L'architecture intégrée de cette approche est

constituée de deux parties : le GEO (Geostationary Earth Orbit) et le TON (Terrestrial Optical Network). Tous les satellites GEO et le TON sont interconnectés à travers des OGS (Optical Ground Station) et des liaisons laser satellite-terre.

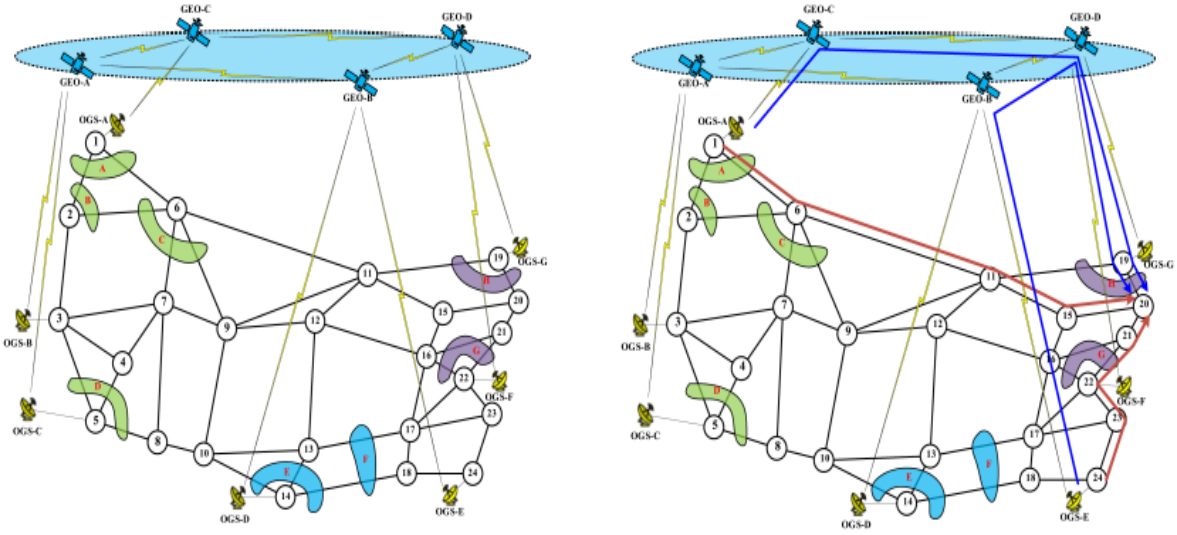


Figure III.7 : Architecture de protection basée sur GEO ; a) Communication sans assistance de protection b) Communication spatial laser de protection [28]

Dans cette figure, 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 est 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 [30]. La figure III.7 b) montre une connectivité entre le nœud 1 et 20 et entre le nœud 20 et 24 à travers les stations satellites.

En cas de défaillance d'une liaison du réseau TON, le choix du trajet de secours le plus propice est déterminé par un service de supervision utilisant l'algorithme de *Dijkstras* comme suit :

Algorithme 1 : recherche du chemin le plus court dans le WPs (Working path)

Input: request r(s,d) and WPs

Output: path and index

for each WP (from the lowest to highest index) do

#search the shortest s → d route current_route using Dijkstras's algorithm;

if ((current_route ≠ null)&&(path = = null)) do

path = current_route, index = the index of current WP;

else if ((current_route ≠ null)&&(length(current_route) < length (path))) do

path = current_route, index = the index of current WP;

end if

end for

return path and index;

Algorithme 2 : Routage et allocation de longueur d'onde pour le trajet de lumière opérationnel du schéma SLC-DP (Communication Laser Spatiale assistée par une Protection Dédiée) dans le TON.

Input: request r(s,d), T(V,E), SRLGs

Output: w_path, w_index, w_SRLGs

w_path = null, w_index = null, w_SRLG = null, current_route = null;

 # create a list of WPs according to the T(V,E) and remove all links from each of the WPs if corresponding wavelength is not available, i.e., occupied by another light-path;

 # call Algorithm 1 with < r(s,d), WPs > to find the shortest path w_path and wavelength index w_index;

if (w_path≠ null) do

for each SRLG SRLG ∈SRLGs do

for each link l ∈ w_path do

if ((l ∈SRLG)&&(SRLG ∉ w_SRLGs)) do

add SRLG into w_SRLGs;

end if

end for

end for

return w_path, w_index, w_SRLGs;

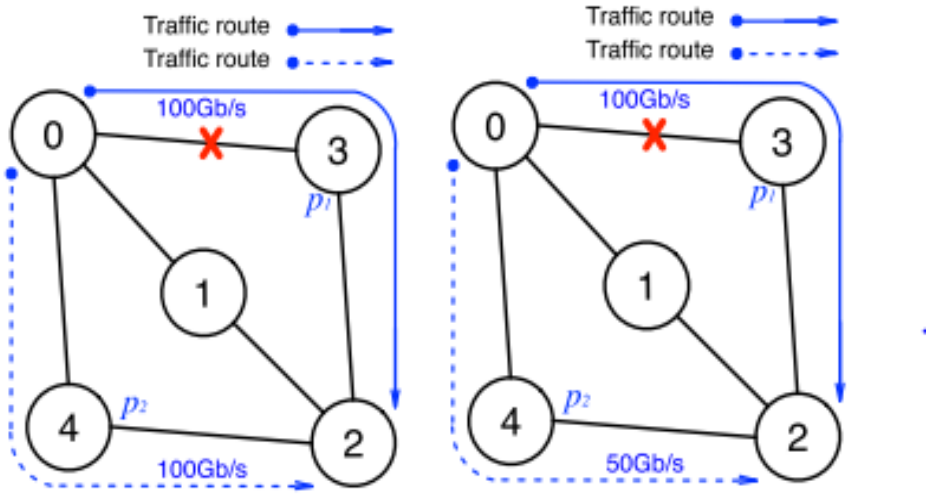
end if

Avec: *T (V,E)* indique la topologie du TON, *V* le Nodes optique dans le TON, *E* liaisons fibrées, *w_path* le trajet de lumière opérationnel avec courte distance, *w_index* l'index de longueur d'onde assigné, *w_SRLGs* tous le SRLG passé par le w_path, *SRLGs* : indique tous les SRLGs (shared risk link group) dans le TON.

SRLG: Groupe de liens à risque partagé.

III.2.5 Protection par multi-trajets

L'architecture multi trajet consiste en plusieurs chemins de secours entre une paire source destination. Elle est largement utilisée pour la protection de réseau EON (Elastic Optical Network) qui est capable de s'adapter aux besoins fluctuants du trafic de données avec une grande agilité [31]. Supposons un réseau de 5 nœuds de 0 à 4 comme montré dans la figure ci-dessous, avec des liaisons établies entre la source (nœud 0) et la destination (nœud 2), pour route principale le trajet passant par le nœud 3. Si nous prenons par exemple un de débit de 100 Gb/s pour la route principale, il nous faut en standby le même débit pour la route secondaire. Cette approche est connue sous le nom de DPP (Dedicated Path Protection) ou Chemin de Protection Dédié. Cependant, un service de protection avec une capacité de trafic de 50% du trafic initial peut être réservé. C'est ce qu'on appelle le DPPS (Dedicated Path Protection with Squeering) ou DPP compressé. La différence entre ces deux approches réside dans la capacité totale du réseau qui est à 200 et 150 Gb/s respectivement.



a) b)

Figure III.8 : Architecture de protection multi-chemin a) sans compression b) avec compression [29]

III.3 Design d'un nouveau système de protection OLP

Dans cette section, nous allons présenter la conception et le test de nouvelles architectures de protection d'OLP pour les réseaux TON à base de dispositifs optiques de simple manipulation. Deux systèmes seront étudiés : le système de protection OLP actif et le système de protection OLP passif. Ces derniers reposent sur la même structure de redondance ressemblant au système de type A du standard ITU-T G983.1. I.e. offrant simplement et efficacement un canal de transmission (fibre optique) de secours au réseau.

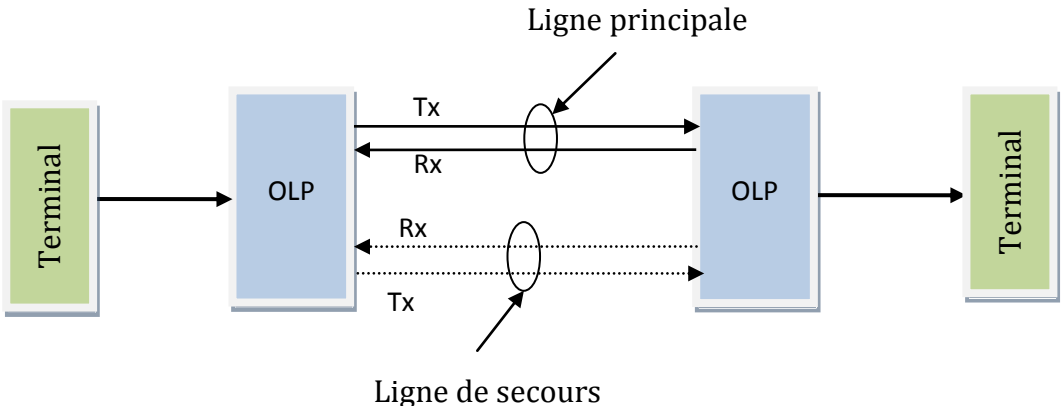


Figure III.9 : Architecture proposée

La figure III.9 illustre l'architecture basique du système de protection que nous proposons. Elle est constituée d'un terminal (émetteur et récepteur), du bloc OLP composé des équipements chargés du traitement et de la conversion du signal ainsi que du système de protection de ligne (actif ou passif que nous allons voir en détail dans ce qui suit), d'une ligne (fibres optiques) primaire et secondaire.

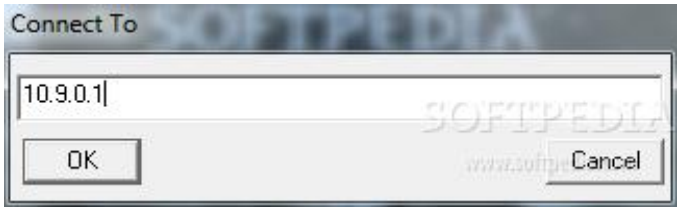
III.3.1 Prise en main de logiciels d'analyse

Nous avons effectué nos simulations et l'analyse de l'état du réseau par le transfert des données réelles qui est observé et examiné par le biais des logiciels Dukto et Roadkil's CommTest. Ces logiciels nous ont permis d'établir un bilan sur l'efficacité du système démontré.

III.3.1.1 Roadkil's CommTest

Ce logiciel est utilisé pour vérifier si la communication entre les deux ordinateurs fonctionne correctement. Il envoie des données d'un ordinateur à l'autre et vérifie si les données sont reçues avec succès. Il permet de visualiser en temps réel le débit du transfert de la liaison.

a)



b)

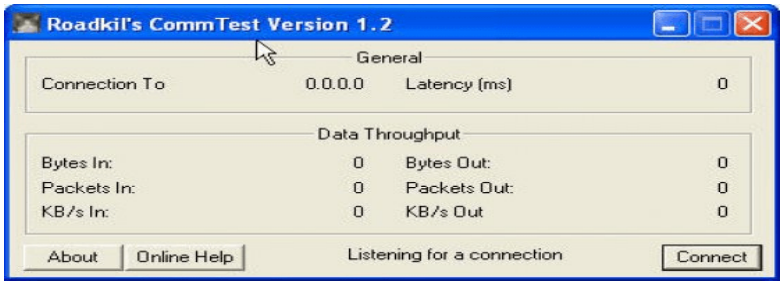
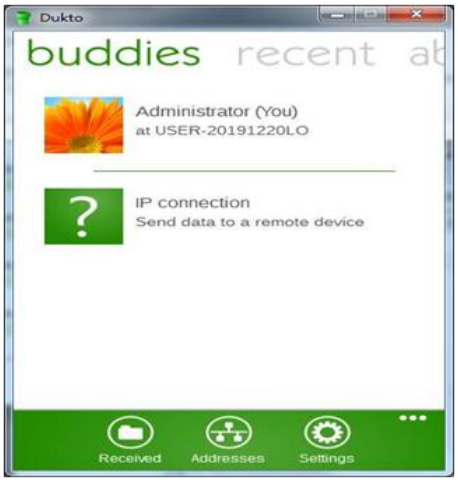


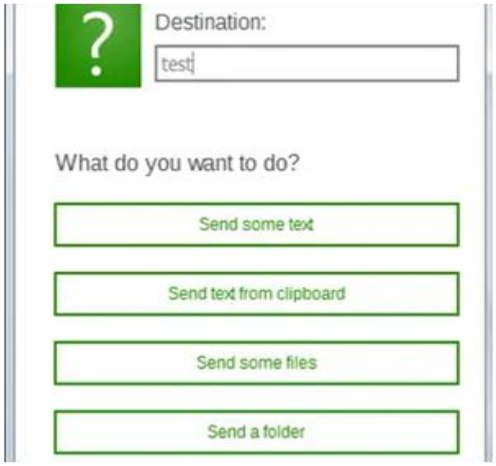
Figure III.10 : Interface Roadkil's. a) connexion a l'appareil distance ; b) Echange de donnés

III.3.1.2 Description de Dukto

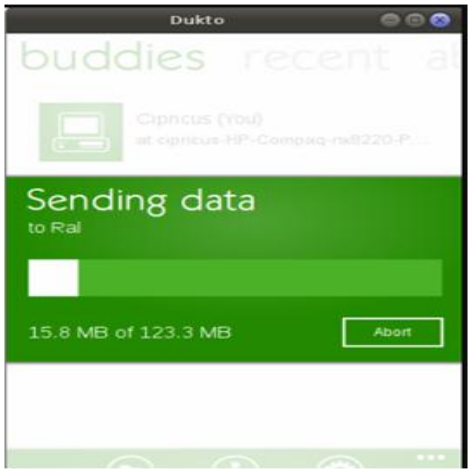
Dukto est un outil open-source de transfert de fichiers conçu pour une utilisation en réseau local (LAN), permettant de transférer facilement des fichiers et du texte entre différents appareils sur le même réseau. L'interface du logiciel offre des fonctionnalités telles que la découverte automatique du réseau et est composée essentiellement de deux parties, le Journal de transferts et l'affichage des adresses IP.



Choisir la destination



Choix de donnés à envoyer



Envois de données

Figure III.11 : Interface du logiciel Dukto

III.3.2 Design d'un système de protection active

Ce système utilise un détecteur optique actif qui est le switch, fonctionnant en régime continue alimenté par une source de tension externe pour détecter et basculer vers la ligne de

secours les données transmises dans le canal en cas de défaillance ou lors d'une interruption du signal de la ligne primaire. Multiples capteurs et dispositifs de service de maintenance et de protection peuvent être employés. Dans le cas de ce projet, nous utilisons un Switch manuel à base de VOA (Variable Optical Attenuator) pour notre simulation.

III.3.2.1 Composition du système proposé

Le système est composé de deux micros portables (utilisateurs), deux Media Converter Dual, un coupleur 50/50 des deux côtés de la liaison et de fibres de 1km pour les deux lignes. Bien que l'échange de données dans ce réseau puisse être bidirectionnel, le test de la redondance établi est uniquement dans le sens de la transmission Tx/Rx du point A vers le point B, car avec des MC duals, il faut deux OLP pour les deux sens de la communication.

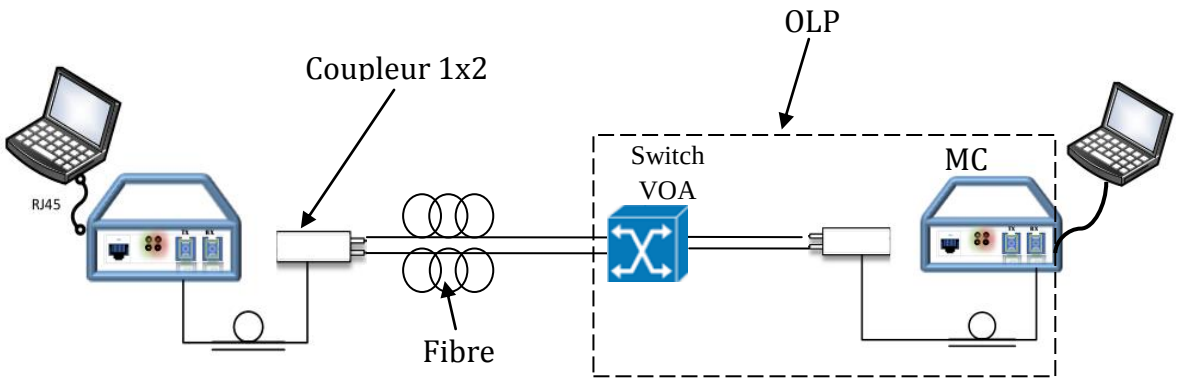


Figure III.12 : Architecture d'OLP actif

III.3.2.2 Le Switch VOA

Pour pouvoir commuter entre les deux lignes de notre OLP, un switch composé de deux VOA (Variable Optical Attenuator) interconnectés entre eux, permet le basculement du trafic sur les deux lignes en cas de panne. Le VOA est un dispositif optique qui joue le rôle d'un atténuateur, mais aussi d'un modulateur/démodulateur dans certains cas. Il atténue le signal lorsqu'il est alimenté avec une tension continue entre 0 et 5 Volts. L'atténuation de la puissance du signal varie en fonction de la tension appliquée et atteint son maximum à 5 Volts (comme l'indique la figure III.13 b).

a)

b)

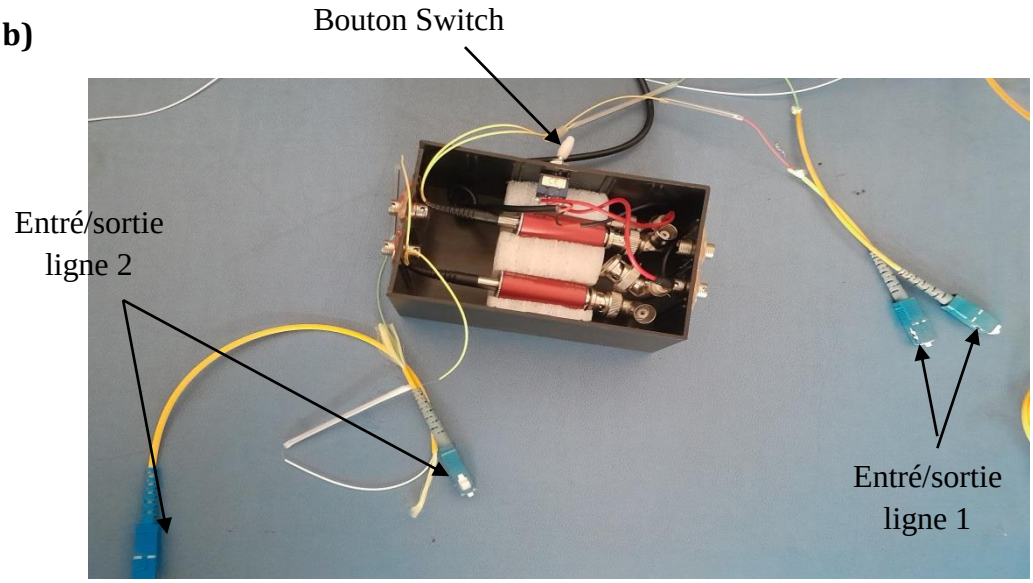


Figure III.13 : a) Structure du VOA [Thorlabs], b) schéma du Switch VOA

Les deux VOA du switch sont interconnectés et montés avec la source de la tension de façon à ce que lorsque l'un est alimenté l'autre ne soit pas et vise vers ça, laissant ainsi passer le trafic d'une seule ligne.

III.3.2.3 Media Converter

Utilisés généralement en pairs et dans les mêmes plages des longueurs d'ondes, les Media Converter jouent le rôle d'un convertisseur électronique-optique-électronique (EOE). Ils sont équipés d'émetteurs récepteurs SFP et permettent d'élargir la distance de transmission et d'agrandir le rayon d'un réseau Ethernet. La description de leurs états de fonctionnement est reportée sur le tableau III.2.

Tableau III.2 : Description des LEDs voyants du M

Numéro	Symboles	Etat/description
1	1000	Allumé : débit du port optique à 1000Mbps Eteint : débit du port optique à 100M
2	FX	Allumé : Fibre optique connecté Flash : Des données sont transmis
3	FDX	Allumé : mode duplex intégral activé Eteint Eteint : mode Half duplex
4	100/TX	Allumé : débit du port électrique à 1000Mbps Eteint : débit du port électrique à 100M
5	Link/Act	Allumé : Câble internet connecté Flash : Des données sont transmis
6	PWR	Allumé : Alimentation +5V est disponible Eteint : Pas d'alimentation

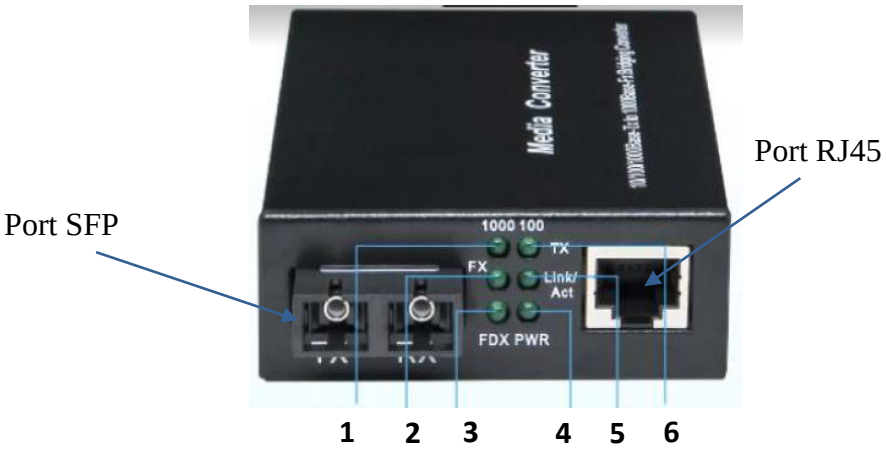


Figure III.14 : Media converter

Il y a deux types de Media Converter : le Media Converter Dual et le Media Converter Bidi. Le MC Bidi (bidirectionnel) comme son nom l'indique, il fonctionne en mode duplex (transmet et reçoit sur la même ligne) et le Dual, qui est conçu en mode half-duplex avec un SFP (transmission + réceptions) sur deux lignes différentes. Les caractéristiques de ces types MC que nous avons utilisés dans nos simulations sont reportées sur le tableau suivant.

Tableau III.3 : Caractéristiques de MC

Type	Sensibilité de puissance (dBm)	Puissance d'émission (dBm)	Longueur d'onde Tx/Rx	Port Ethernet (Gb/s)	Port optique (Mb/s)
Dual	-28	0	1310/1310	1,25	10/100/ 1000
Bidi	-25	-4,87	1310/1550	1,25	10/100/ 1000

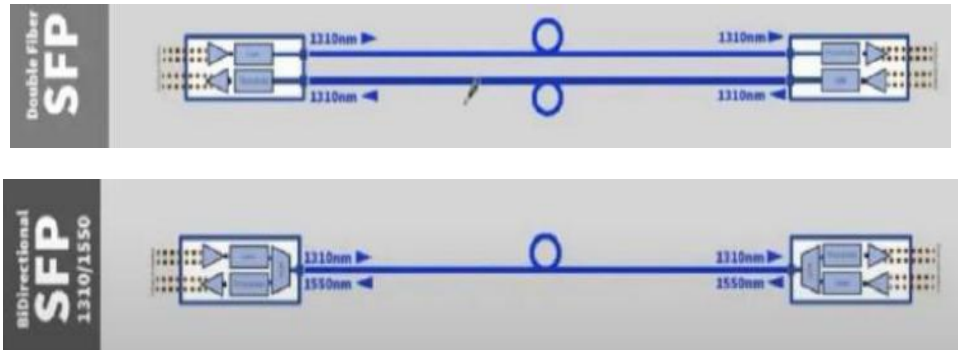


Figure III.15 : SFP à port a) Dual b) Bidi

III.3.2.4 Fibre des lignes

Les fibres optiques utilisées pour connecter les appareils distants de notre réseau ont pour caractéristiques : type SMF, atténuation α (0.2dB/km), dispersion (17ps/nm.km), longueur (1 km), perte de connexion (0,3dB).

III.3.2.5 Simulation et interprétation

La figure III.16 montre en détail l'architecture complète du système de protection actif simulé. La transmission des données se fait comme suit : lorsqu'un signal électrique est envoyé depuis le terminal (Pc) localisé au bout de la chaine, il sera converti en signal optique par le MC (Media Converter) avant de le transmettre vers le coupleur. Ce dernier, permet de fournir à sa sortie deux copies du signal reçu. Ces deux signaux seront transmis simultanément dans les deux lignes (primaire et secondaire). En fonctionnement normal de deux lignes, l'un des signaux sera atténué par le Switch en fonction du besoin des lignes. L'introduction du Switch dans le système est nécessaire pour éviter le phénomène de la para-diaphonie (Next-Near-End Crosstalk) qui se produit lorsque le récepteur reçoit deux signaux de même puissance. En cas de dysfonctionnement d'une ligne, un basculement sur l'autre ligne serait manuellement effectué. Ainsi, un signal sera reçu par le coupleur et transmis vers le MC pour être enfin restitué par le récepteur.

1 : ligne primaire ; 2 : Ligne secondaire ; 3 : Deuxième ligne dual (sans protection)

Figure III.16 : Schéma synoptique de système simulé

III.3.2.6 Résultat d'analyse

Le facteur majeur de notre étude d'interprétation des résultats est inévitablement la qualité du signal qui est reçu au niveau du récepteur. Cet aspect dépend de plusieurs paramètres, dont la longueur de la fibre et les adaptateurs, etc. Pour ce type de système (OLP actif), l'isolation en niveau de puissance entre les deux VOAs du Switch doit être assez importante pour éluder le crosstalk et permettre au MC du récepteur de distinguer les deux signaux. En effet, le test de relèvement des valeurs de puissances des deux lignes par le Power Meter à la sortie du switch

respectivement pour la ligne 1 et 2 nous indique une valeur de -13,60dBm et -55,30dBm. Cela peut se traduire par une atténuation totale générée par les VOAs par l'équation 1 liant la puissance à l'atténuation.

$$\boldsymbol{I = |Pr - Pe|} \qquad \textbf{Eq : III.1}$$

Où Pe est la puissance émis et Pr la puissance reçu ;

I : isolation entre les deux lignes

$$\Rightarrow I = |-55{,}3 - (-13{,}6)|$$

$$\Rightarrow \boxed{\text{I=41,7dB}}$$

Avec une sensibilité de -28dBm d'émetteur/récepteur utilisé, pour un écart de 41,7dBm de puissance ou encore une atténuation de 41,7dB nous pouvons dire que l'isolation engendrée par le switch sur les deux lignes fournit une bonne qualité du signal à la réception. Cette hypothèse nous sera confirmée par le bilan total de la liaison.

En considérant que la puissance du signal émis par le MC est égale à la puissance théorique de 0dbm, nous renseignons au bout de la liaison sur les deux lignes les valeurs de puissances de -17,0dbm et -15,33dBm. Ces valeurs traduisent le bon fonctionnement du système en fonction de qualité de signal. Ce que nous pouvons justifier par le voyant Fx Link/ACT du MC.

L'analyse de l'évaluation des pertes par ligne et de la performance du réseau se calcule par le bilan optique de la liaison par :

$$\boldsymbol{A_{tot} = \Sigma A_i} \qquad \textbf{Eq : III.2}$$

- Une atténuation de 3dB d'adaptation SC-APC/SC-UPC entre le coupleur d'émission et la fibre de la ligne.
- Atténuation de 3dB d'adaptation SC-APC/SC-UPC entre la fibre de ligne et l'entrée du Switch.
- Atténuation de 0,3dB d'adaptation SC-APC SC-UPC entre la sortie du Switch le coupleur de réception.
- 2 fois 0.1 dB d'atténuation de soudure au niveau du Switch.

En négligeant les pertes introduites par les coupleurs et les Media Converters, nous examinons le bilan par l'équation ci-contre.

$$\Rightarrow \quad A_{tot} = 3 + 3 + 0{,}3 + 2 * 0{,}1$$

$$\Rightarrow \boxed{\text{A=6,50dB}}$$

Ceci implique qu'on augmente la sensibilité de 6,5 dBm, ainsi nous aurons une nouvelle Ps de -21,5dBm.

Examinons à présent la distance maximale que peut supporter la liaison. La longueur maximum d'une liaison à fibre optique se calcule par la relation :

$$\boldsymbol{d = \frac{|P_s - P_r|}{\alpha}} \qquad \textbf{Eq : III.3}$$

Où Ps : Puissance de sensibilité du récepteur ;

Pr : Puissance reçu

α : L'atténuation linéique

D'où, $d_{max} = \frac{|-21{,}5-(-17)|}{0{,}2}$

$\Rightarrow \quad d_{max} = 22{,}5km$

Ce que nous donne une distance assez importante.

III.3.2.7 Test par transfert des données

Un fichier de volume 1360608926 octets soit 1,267 Go, est envoyé de A vers B tout en permutant les lignes pour générer une coupure.

a)

b)

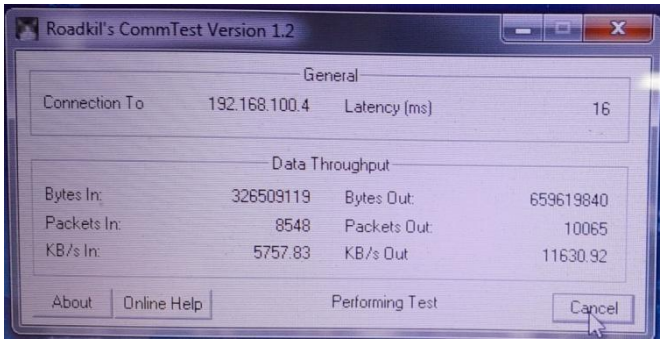


Figure III.17 : a) Données en cours d'envoie, b) Débit Ethernet de la liaison

Pour un débit de 5764,43ko sur la liaison Ethernet que nous indique le logiciel Roadkil's CommTest, le temps mis sur les deux trajets respectivement de puissances -17,0dbm (ligne 1) et -15,33dBm (ligne 2) est de : 2min et 21s soit 141s pour la ligne 1 et 1min et 55s soit 115s pour la ligne 2.

Avec le basculement du signal et l'incidence des pertes durant le trajet, nous examinons le débit réel en fonction du temps, nous donne un débit pour chaque ligne par la relation :

$$\boldsymbol{D = \frac{V}{T}\ [bits/s]} \qquad \textbf{Eq : III.4}$$

D : débit ; V : volume du fichier ; T : temps

$$\Rightarrow \quad D_1 = \frac{1{,}267*8}{141} \quad \Rightarrow \quad D_1 \approx 71{,}89 kbit/s$$

$$\text{Et} \quad D_2 = \frac{1{,}267*8}{115} \quad \Rightarrow \quad D_2 \approx 88{,}14 kbits/s$$

Nous déduisons de cette analyse que le système proposé peut être efficacement déployé dans des réseaux locaux à courte portée. L'inconvénient est que le système est actif, car le switch nécessite une alimentation externe, et qu'en cas de défaillance d'une ligne, le basculement doit être manuel. Cela peut se résoudre par un système de supervision, mais nous allons présenter un système plus simple et plus économique en énergie basé sur des dispositifs passifs ne nécessitant pas un basculement manuel entre les lignes.

III.3.3 Design d'un système de protection passif

Le but est tel qu'annoncé, c'est de réaliser un système de protection indépendant de tout apport extérieur et capable d'assurer la redondance. Etant donné l'architecture principale du système réalisé offrant une ligne de secours qui fournit une copie du signal transmis dans la ligne primaire dont leur réception simultanée produit le phénomène de la diaphonie causant ainsi une mauvaise qualité du signal au récepteur, cette nouvelle technique utilise des atténuateurs optiques passifs sur l'un des bras pour isoler les deux signaux. A la réception, le récepteur choisit le signal de meilleure qualité, c'est-à-dire celui de la ligne primaires et, en cas de panne, celui de la ligne secondaire.

III.3.3.1 Utilisation de coupleurs 99/1

Pour élimer le crosstalk en variant les niveaux des puissances entre les deux lignes, nous allons utiliser pour cette première méthode des splitter de 1x2 ayant des puissances des sorties différentes. Dans ce cas, le réseau est monté par des splitters 99/1. Le diagramme de bloc est comme le montre la figure III.18 ci-dessous.

- **Test :**

Premièrement, nous allons relever le niveau de la puissance à la sortie de chaque diviseur avant le canal. Le MC utilisé est de type dual, i.e. la puissance d'émission est de 0dBm. En estimant la perte d'adaptateurs à 1dB, le tableau III.4 indique les valeurs relevées.

Tableau III.4 : Puissances des sorties des coupleurs 99/1

	Coupleur (Tx)	Coupleur (Rx)
Port (99%)	-2,4 dBm	-2,4 dBm
Port (1%)	-23,1dBm	-22 dBm

- **Résultat de la liaison et interprétation**

Le test de bout en bout de l'entrée du coupleur Tx (1x2) jusqu'à la sortie du coupleur Rx (2x1) nous donne les valeurs des puissances reçues comme suit :

- Les deux lignes connectées : Pr=-11,66dBm
- Ligne (99%) seule c'est-à-dire ligne (1%) coupée : Pr= -11,12dBm
- Ligne (1%) seule, c'est-à-dire ligne (99%) coupée : Pr= -33,40dBm

Le niveau de la puissance reçue sur la ligne (1%) est inférieur au seuil de sensibilité du récepteur (-33,4 < -28dBm) ce qui implique une mauvaise qualité du signal et cela peut se justifier par le voyant Fx du MC qui reste éteint. Nous pouvons conclure alors que ceux coupleurs ne peuvent pas assurer la redondance.

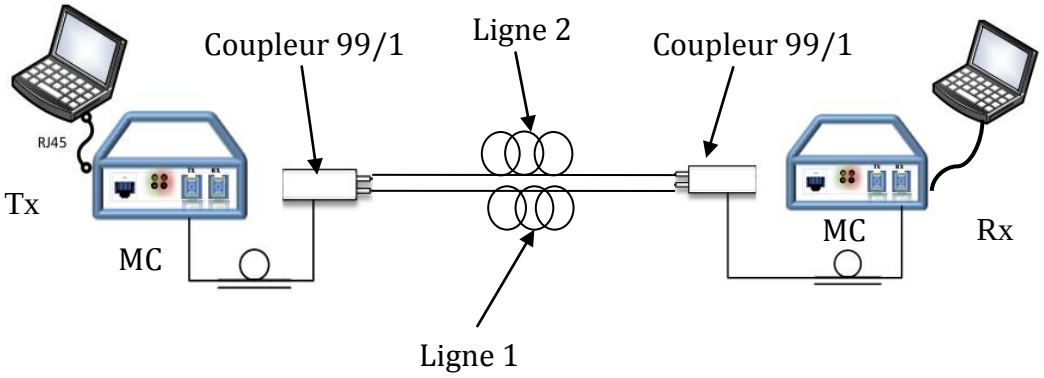


Figure III.18 : Architecture du système de protection passif à base des splitter 99/1

III.3.3.2 Utilisation d'atténuateurs

La deuxième technique que nous avons exploitée est l'introduction dans le système des atténuateurs optiques afin de limiter le phénomène de la diaphonie. Le principe est presque le même que celui présenté précédemment dans d'OLP actif. La différence est qu'au lieu d'utiliser un Switch, nous allons introduire dans l'un des chemins des atténuateurs optiques passifs pour diminuer le niveau de la puissance et faire de ce trajet une ligne de secours. Ce qui permet au récepteur de bien capter et distinguer entre les deux signaux. Cependant, l'atténuateur ainsi introduit doit répondre à l'exigence de la qualité de signal minimale requise à la sensibilité.

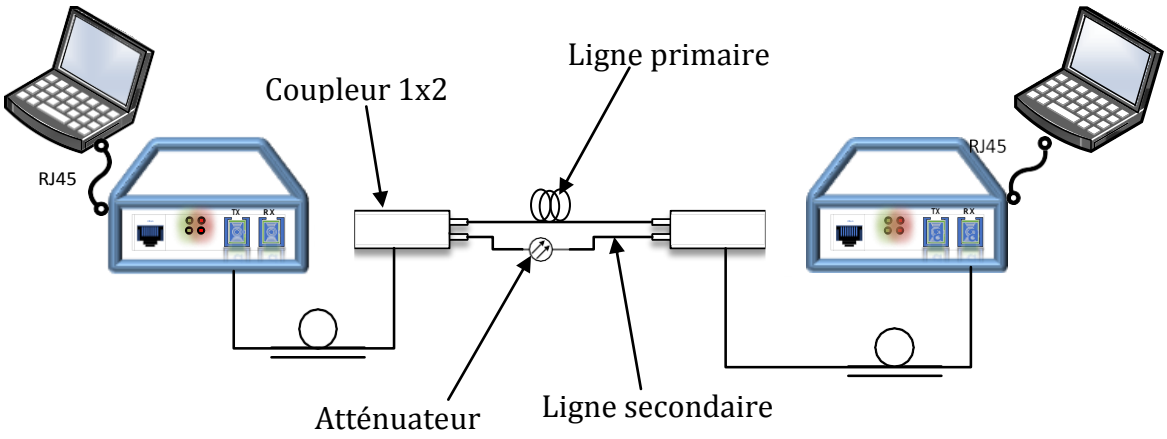
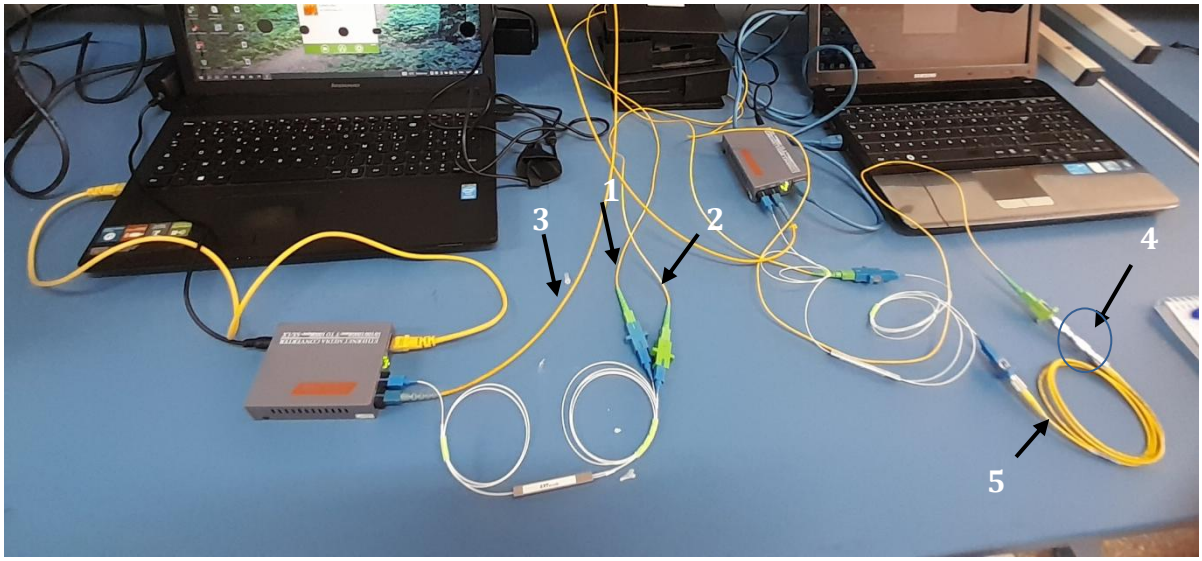


Figure III.19 : Schéma du système de protection passif à base des atténuateurs

III.3.3.3 Simulation et interprétation

Les composants utilisés dans ce système, tels que les fibres des liaisons, les coupleurs, les MC, ont les mêmes caractéristiques que ceux utilisés dans l'OLP actif présenté ci-haut. Le changement opéré est la suppression du switch et l'ajout des atténuateurs sur la ligne de secours en les plaçant avant le canal de transmission, c'est-à-dire entre le coupleur d'émission et la fibre. Le réseau simulé est présenté dans la figure ci-contre.



1 : Ligne primaire ; 2 : Ligne secondaire ; 3 : Deuxième ligne dual (sans protection) ;

4 : Atténuateur ; 5 : Fibre adaptateur

Figure III.20 : Schéma synoptique d'OLP passif simulé

III.3.3.4 Choix d'atténuateur

Pour garantir les performances du système et la qualité de la communication en minimisant le niveau du crosstalk, nous allons tester plusieurs atténuateurs de degré d'atténuation de plus faible puissance à la plus forte jusqu'à obtenir le degré idéal fournissant moins de pertes et une très bonne liaison. Pour cela, nous allons tester un atténuateur de 3dB, 5dB et de 8dB (qui est l'addition du 5 et le3).

- **Atténuateur de 3dB** : pour une atténuation de 3dB, il n'y a pas de connexion, le voyant FX du MC est éteint. Cela veut dire qu'il y a présence de crosstalk et que le précepteur ne peut pas distinguer les deux signaux.
- **Atténuateur de 5dB :** pour une atténuation de 5dB, Fx est allumé mais le transfert de fichier n'aboutit pas, i.e. la connexion est établie mais le récepteur n'arrive toujours pas à bien distinguer les deux signaux : Présence du Crosstalk.
- **Atténuateur de 8dB :** Avec une atténuation de 8dB (5+3), FX flash, donc nous pouvons dire que la liaison est bonne.

Atténuer de plus le signal, veut dire diminuer la distance de la liaison, Ainsi, nous gardons cette valeur d'atténuation de 8dB pour le reste de la simulation.

III.3.3.5 Bilan optique

La position de l'atténuateur tout au long de la ligne présente des différents effets :

Atténuateur côté émission :

Le bilan optique de la liaison pour chaque ligne indépendamment et les deux lignes en fonction est :

- Les deux fonctionnent : Pr=-13,5dBm
- Ligne primaire (ligne 2 coupée) : Pr=-14,4dBm
- Ligne secondaire (ligne 1 coupée) : Pr=-24,5dBm

Avec la sensibilité du MC de -28dbm, la puissance obtenue par la ligne de secours (-26,5) lorsque la ligne primaire est coupée montre que cette deuxième ligne peut assurer la redondance en cas de disfonctionnement de la première.

Atténuateur côté réception :

- Les deux en fonction : Pr=-13,7dBm
- Ligne primaire (ligne 2 coupé) : Pr=-14,09dBm
- Ligne secondaire (ligne 1 coupé) : Pr=-26,5dBm

Lorsque nous plaçons l'atténuateur après le canal (au niveau du coupleur récepteur), étant donné que le temps de réponse est petit, le récepteur ne parvient pas à séparer les deux signaux. Nous déduisons de cela qu'il est préférable de placer l'atténuateur avant le canal.

III.3.3.6 Calcul de la distance maximale

En négligeant les pertes de connecteur SC-APC/SC-APC de 0,3dB entre le coupleur 1x2 et la fibre adaptateur sur la ligne de secours, les pertes totales par ligne sont estimées à 6dB (3+3

connecteur bleu-vert coté émission et réception). Ce qui augmente la sensibilité de 6dBm donc nous aurons : $Ps' = Ps + 6$ avec Ps' la nouvelle sensibilité.

L'équation III.3 nous donne :

$$d_{max} = \frac{|-28+6-(-24,5)|}{0,2} \quad \Rightarrow \quad d_{max} = 12,5km$$

III.3.3.7 Test bout en bout et calcul du débit

Le fichier transmis pour ce test est le même que celui utilisé dans le système OLP actif. Pour s'assurer de l'efficacité du système, les données sont transmises sur chaque trajet à tour de rôle en coupant l'autre ligne durant la transmission.

- Les deux lignes connectées : le transfert du fichier est reçu pour un temps de 2min et 15s soit 135s. Ce qui nous donne un débit de :

$$D = \frac{1,267*8}{135} \quad \Rightarrow \quad D = 75,081kps$$

- Ligne primaire seule : le temps mis par le fichier lorsque la ligne 2 est déconnectée est de 2min et 16s soit 136s.

$$\Rightarrow \quad D = 74,529kps$$

- Ligne secondaire seule : la ligne de secours assure une connectivité de débit 73,449kps sur une durée de 2min et 18s.

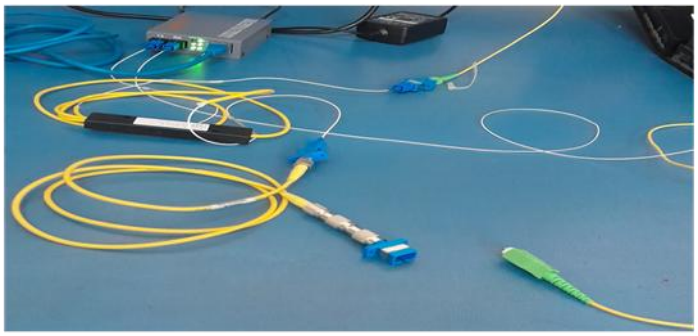


Figure III.21 : Liaison avec ligne de secours déconnectée

III.3.3.8 Test du réseau avec Media Bidi

Utilisant la technique de multiplexage en longueur d'onde, le média Converter bidi réalise à la fois la fonction de transmission et la fonction de réception sur une même ligne. Utilisé dans la même condition de simulation que le média dual, le bilan de liaison est le suivant :

- Les deux lignes en fonction : Pr=-11,45dBm
- Ligne primaire seule (ligne 2 coupé) : Pr=-12,14dBm
- Ligne secondaire seule (ligne 1 coupé) : Pr=-24,5dBm

La valeur de la puissance reçue par la ligne de secours est sensiblement égale a la sensibilité (-24,5≃-25dBm). Ce qui produit une mauvaise qualité du signal. Nous tirons de ces résultats que, la ligne de secours seule ne peut assurer la connexion en cas de défaillance de la ligne primaire avec ce MC.

La solution pour ce problème est de minimiser l'atténuation totale de la ligne de secours. Par contre, diminuer l'atténuateur veut dire se rapprocher du crosstalk et vise vers sa.

III.3.4 Synthèse d'analyse

Nous analysons dans l'ensemble que l'OLP actif s'est montré valorisant par sa capacité de couvrir une distance assez importante, permettant ainsi une liaison longue portée. Il nous assure, grâce à la différence de puissance entre les deux signaux émanant de deux lignes introduites par le switch, une connectivité sainte du phénomène de la diaphonie. Par contre, la nécessité d'une source d'alimentation pour les composants actifs et le besoin manuel de commuter entre les lignes, le défavorise par rapport à l'OLP passifs. Il ressort de cette analyse qu'il préférable d'utiliser l'OLP passif pour avoir une certaine autonomie dans le réseau.

La distance maximale du réseau simulé estimée à 32 km est due au fait que les SFP employés supportent au maximum 40km. Cette distance est réduite par les pertes d'atténuations des couplages et de manipulations. Cependant, il est tout à fait possible d'appliquer l'OLP passif dans un réseau de grande dimension en ajoutant des amplificateurs optiques, mais aussi de se munir des media converters de sources laser ou SFP plus dynamique. Nous concluons de cela que, par son simple usage et sa facilité de manipulation, ce système d'OLP passif peut répondre au besoin exigeant de la télécommunication en assurant la redondance dans nos réseaux.

III.4 Conclusion

Ce chapitre à examiné le design d'un niveau système de protection optique à base d'atténuateurs et coupleurs. En premier lieu, nous avons étudié les architectures des lignes de protection assurant la redondance dans une liaison optique. En suite, l'exploration de la réalisation et design du nouveau système proposé. L'étude de ce système a permis de mettre en point deux sous systèmes : OLP actif et OLP passif. Les systèmes OLP présentés offrent une solution économique, fiable et facile à mettre en œuvre pour la protection du réseau. L'utilisation des atténuateurs par OLP passif rend la complexité du réseau simple et facile à entretenir, car ces composants ne sont pas susceptibles de tomber en panne ni besoin d'une surveillance permanente pour changer des lignes en cas de défaillance. Cependant certaines limites telles qu'un service de supervision pour OLP actif et la persistance de la diaphonie en fonction la sensibilité du récepteur, suggèrent la nécessité de recherches future pour améliorer cette conception.

Conclusion générale

En résumé, le rôle qui joue la fibre optique dans les réseaux à haut débit en offrant des performances élevées et un transfert de données efficace grâce à ses caractéristiques optiques remarquables est essentiel dans les réseaux de communication contemporains. Les systèmes de transmission à fibre optique sont vitaux pour connecter le monde en alimentant les réseaux de communication à haut débit qui donnent vie à notre société modernisée et connectée. Leur protection est essentielle pour relier le monde en alimentant les réseaux de communication en permanence

Il a été présenté dans ce projet une nouvelle architecture d'un système de protection OLP assurant la redondance des liaisons optiques. Ce système ce distingue des autres par son aisance de conception et la simplicité des outils employés. Les deux architectures proposées sont l'OLP actif et l'OLP passif. Avec une sensibilité de -28dBm de récepteurs utilisés, le système passif est a sa meilleur performance pour une réduction de puissance de 8dB entre les lignes. La puissance au niveau de la réception pour cette atténuation sur la ligne secondaire est de -24,5dBm pour 0dBm envoyé par l'émetteur.

Les systèmes simulés couvrent une portée de 40km sans amplificateurs optiques. Il est tout à fait possible d'élargir cette distance avec des dispositifs tels que des SFP, des MC aux performances élevées. Le défi à relever reste sans doute l'élimination du phénomène du Crosstalk qui, en fonction de la longueur de la fibre et des dispositifs utilisés, peut varier.

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour explorer leurs meilleurs potentiels et évaluer leur efficacité à long terme. La mise en place et la conception d'un système de supervision est nécessaire pour la surveillance en temps réel du réseau. Cette question devrait être la prochaine étape de ce projet, mais qui pourrait bien être réalisée par des recherches à venir.

Liste d'abréviations

APC: Angles Physical Contact

ASK: Amplitude Shift Keying

CATV: Community Antenna Television

DWDM: Dense Wave Division Multiplexing

DCF: Dispersion Compensating Fibers

EDFA: Erbium-DopedFiber Amplifier

FTTH: Fiber To The Home

FBG: Fiber Bragg Grating

FWDM: Filter Wavelength Division Multiplexe

FSO: Free Space Optic

GEO: Geostationary Earth Orbit

ILD: Injection Laser Diodes

LAN: Local Area Network

LED: Light Emission Diode

MFD: Mode Field Diameter

MC: Media Converter

NRZ: Non-Return to Zero

OLT: Optical Line Terminal

OCS: Optical Circuit Switching

OPS: Optical Packet Switching

OADM: Optical Add-Dropp Multiplexer

OGS: Optical Ground Station

OLP: Optical line Protection

PON: Passive Optical Network

QPSK: Quadrature Phase shift Keying

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

RoF: Radio over Fiber

RZ: Return to Zero

RFA: Raman Fiber Amplifier

SFP: Small Factor Form Pluggable

SOA: Semiconductor Optical Amplifier

SMF: Single Mode Fiber

TDM: Time Division Multiplexing

TDMA: Time Division Multiple Access

TON: Terrestrial Optical Network

UPC: Ultra-Physical Contact

VOA: Variable Optical Attenuator

WDM: Wavelength Division Multiplexing

WRON: Wavelength Routed Optical Network

WDMA: Wavelength Division Multiple Access

Références

[1] T. Malaga, *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes*. in Melbourne. 1988.

[2] F. Sophie, « Etude de la production de neutrinos associés aux Sursauts Gamma dans le modèle du Boulet de Canon. Possibilité d'observation de ces neutrinos par le détecteur Antares, et étude du bruit de fond optique enregistré par le prototype d'un secteur de ligne », PhD Thesis, Université Loui ästeur de Strasbourg, France, 2006.

[3] V. E, *LEÇONS D'OPTIQUE PHYSIQUE*, TOME I., vol. V. Paris: Imprimérie IMPERIAL, 1856.

[4] J. M. Senior et M. Y. Jamro, *Optical fiber communications: principles and practice*, 3rd ed. Harlow, England ; New York: Financial Times/Prentice Hall, 2009.

[5] « Fibre optique : structures et caractéristiques », SYCADEL, Paris, Fiche technique 1, nov. 2020.

[6] A. Altuncu, « Emerging Technologies in Fiber Optical Comunications ». University Abou Bekr Belkhaid Tlemcen, Faculty of Technologie Depatment of Telecommunication, Conference, novembre 2023.

[7] F. Prevost, « Combinaison cohérente dans une fibre multicœurs pour des applications LIDAR ».

[8] « Pourquoi passer dès à présent à la fibre optique ? » Consulté le: 18 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://berryfibreoptique.fr/pourquoi-passer-a-la-fibre-optique

[9] « Composant d'une liaison optique ». Chapitre 3,Cours, Université de Paris.

[10] G. Keiser, *Fiber Optic Communications*. Singapore: Springer Singapore, 2021. doi: 10.1007/978-981-33-4665-9.

[11] C. Ngo et H. Ngo, *Physique des semi-conducteur*, 4e éd. Paris: Dunod, 2012.

[12] D. H, « Cours, Chap 1: Source Laser ». Université de Tlemcen.

[13] « La diode LED : cours et principe de fonctionnement ». Consulté le: 22 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.abcelectronique.com/annuaire/cours/cache/644/fonctionnement-jonction-pn.html

[14] C. Schwob et L. Julien, « Le laser : principe de fonctionnement », *Reflets phys.*, no 21, p. 12‑16, oct. 2010, doi: 10.1051/refdp/20102112.

[15] « Expressions moléculaires : physique de la lumière et des couleurs - Lasers à diode : didacticiel interactif ». Consulté le: 23 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/lasers/diodelasers/index.html

[16] K. Vlachos, F. Marques Ferreira, et S. Sygletos, « A Reconfigurable OADM Architecture for High-Order Regular- and Offset- QAM based OFDM Super-Channels », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no 16, p. 4008‑4016, août 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2905141.

[17] J. Magné, « Traitement optique du signal émis par un laser â fiber modelocked passif », PhD Thesis, Ph. D. dissertation, Université Laval, Quebec City, QC, Canada, 2007.

[18] A. Othonos et K. Kalli, « Chapter 9 - Bragg gratings in optical fibers », in *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*, H. Singh Nalwa, Éd., Burlington: Academic Press, 2001, p. 367‑480. doi: 10.1016/B978-012513745-4/50080-9.

[19] Y. Cheng, « Optical Isolators, Circulators », in *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, R. A. Meyers, Éd., New York: Academic Press, 2003, p. 381‑394. doi: 10.1016/B0-12-227410-5/00527-5.

[20] T. Erdogan, « Fiber grating spectra », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, n° 8, p. 1277‑1294, août 1997, doi: 10.1109/50.618322.

[21] K. Gerd, *Fiber Optic Communications*, 3st éd. Newton Center, MA, USA, 2021.

[22] S. Baroni et P. Bayvel, « Key topological parameters for the wavelength-routed optical network design », in *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, sept. 1996, p. 277‑280 vol.2.

[23] J. J. Vegas Olmos, « Label-controlled optical switching nodes », Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2006. doi: 10.6100/IR612910.

[24] J. M. Martinez, J. Herrera, F. Ramos, et J. Marti, « All-optical address recognition scheme for label-swapping networks », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, n° 1, p. 151‑153, janv. 2006, doi: 10.1109/LPT.2005.860049.

[25] C. Mas Machuca, L. Wosinska, et J. Chen, « Assessment methodology of protection schemes for next generation optical access networks », *Optical Fiber Technology*, vol. 26, p. 82‑93, déc. 2015, doi: 10.1016/j.yofte.2015.07.014.

[26] A. Tzanakaki *et al.*, *Optical Network Design and Modeling: 23rd IFIP WG 6.10 International Conference, ONDM 2019, Athens, Greece, May 13–16, 2019, Proceedings*. Springer Nature, 2020.

[27] E. D. Manley, J. S. Deogun, L. Xu, et D. R. Alexander, « All-Optical Network Coding », *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 2, n° 4, p. 175, avr. 2010, doi: 10.1364/JOCN.2.000175.

[28] « Efficient and Reliable Protection Mechanism in Long-Reach PON ». Consulté le: 13 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://opg.optica.org/jocn/viewmedia.cfm?uri=jocn-8-1-23&seq=0

[29] S. T. Hayle *et al.*, « Integration of fiber and FSO network with fault-protection for optical access network », *Optics Communications*, vol. 484, p. 126676, avr. 2021, doi: 10.1016/j.optcom.2020.126676.

[30] X. Li, W. Xu, H. Wang, et S. Huang, « Space Laser Communication Assisted Protection Scheme Against SRLG Failures in Terrestrial Optical Networks », *J. Lightwave Technol.*, vol. 41, n° 8, p. 2261‑2275, avr. 2023, doi: 10.1109/JLT.2022.3232110.

[31] K. D. R. Assis *et al.*, « Protection by diversity in elastic optical networks subject to single link failure », *Optical Fiber Technology*, vol. 75, p. 103208, janv. 2023, doi: 10.1016/j.yofte.2022.103208.