

لجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

والبـحـث ووزارة التـعلـيم العـالـي
العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**

– تلمسان – بلقايد جامعة أبي بكر

Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par : **DAHMANI Kawter ET BOUFIR Fatima Zohra.**

Sujet

Etude pratique sur les SFPs et ses applications

Soutenu publiquement, le 20 / 0 6 / 2023 , devant le jury composé de :

M. KHELLADI Mounir
M. CHIKH-BLED Hicham
M. KARIM Fethallah

MCA Université de Tlemcen
MCA Université de Tlemcen
Professeur Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

يَأْتِيهَا

الَّذِينَ آمَنُوا إِذَا قِيلَ لَكُمْ تَفَسَّحُوا فِي الْمَجَالِسِ فَأَفْسَحُوا بَفْسَحِ اللَّهِ لَكُمْ
وَإِذَا قِيلَ آنشزُوا فَأَنْشزُوا يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا

الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ

سورة المجادلة الآية رقم 11

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Dieu, qui nous a donné la force et la volonté de mener à bien ce travail.

Ce mémoire est le fruit d'un long travail et d'un grand investissement collectif. Nous n'aurions pas pu le mener à bien sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes. Nous tenons à les remercier sincèrement pour leur contribution à la réalisation de ce projet.

Nous voudrions dans un premier temps remercier notre encadreur, M. KARIM Fethallah, professeur à l'université de Abou Bekr Belkaïd -Tlemcen. Il nous a guidés, orientés, aidés et conseillés tout au long de notre parcours. Nous lui sommes reconnaissants pour sa patience, sa disponibilité et ses précieux conseils.

Nous remercions également M. KHELLADI Mounir Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen et M. CHIKH-BLED Hicham Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté de faire partie des membres de jury de notre soutenance. Nous apprécions leur intérêt et leur attention pour notre mémoire.

Nous remercions aussi tous nos professeurs qui ont participé à notre formation et qui nous ont transmis leurs connaissances et leurs expériences. Nous leur exprimons notre gratitude pour leur soutien et leur encouragement.

Ensuite, nous remercions nos familles, qui nous ont apporté leur soutien inconditionnel et leur bienveillance. Merci pour votre amour, votre patience et votre générosité. Vous êtes notre force et notre joie.

Nous remercions aussi nos amis, qui ont été à nos côtés dans les moments de doute et de stress. Ils ont su nous reconforter, nous motiver et nous faire rire. Nous leur devons beaucoup.

DÉDICACE

Louange à Dieu avant et après tout, et cela n'est possible qu'avec la grâce de Dieu. Je dédie ma réussite à ceux qui m'ont soutenu depuis ma naissance : à mon père bien-aimé qui a été mon guide depuis que j'ai ouvert les yeux sur la vie, et mon ange dans la vie ; à la signification de l'amour et de la tendresse, ma chère mère ♥, je ne pourrai jamais assez vous remercier pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À mes frères Hicham, Mohammed, Noureddine, et à mes petites sœurs Ibtissam et Amira, je suis tellement chanceuse de vous avoir comme ma famille, vous êtes vraiment les meilleurs.

Et je voudrais exprimer mes sincères remerciements à ma chère amie Ahlam, qui a été ma compagne de route tout au long de mon parcours universitaire. Nous avons partagé les peines avant les joies. Merci beaucoup pour ton amitié et ton encouragement, tu as été une amie précieuse. Je suis tellement reconnaissante de ta présence dans ma vie, tu es une bénédiction pour moi.

À mon binôme Kawter, je tiens à exprimer ma gratitude pour la chance que j'ai eue de travailler avec toi sur notre mémoire de fin d'études, les exposés, les travaux pratiques.

Et de partager les bons et les mauvais moments ensemble.

À ma chère Siham, Ikram, Nour El Houda, Radja, Nihed, Fatima, à tous ceux que je connais ; merci d'avoir été là pour moi dans les moments difficiles, vous êtes une source de force et de réconfort pour moi. Je suis tellement reconnaissante de votre amour et de votre soutien inconditionnels, vous êtes les meilleures amies.

Boufir Fatima Fehra

DÉDICACE

Je vous dédie ce PFE avec toute ma gratitude et mon amour.

À ma mère, qui est la meilleure du monde. Tu es la source de ma vie, de ma joie et de ma force. Elle m'a toujours soutenue, encouragée et aimée. Vous êtes mon modèle et ma source d'inspiration.

À mon père, qui m'a fait confiance et m'a laissé suivre ma voie. Ce mémoire est le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection.

À mes sœurs Rahil, Meriem, Hadjer et à mon petit frère Ismail qui ont été mes meilleurs amis et mes confidents tout au long de ma vie. Vous êtes une fierté et un bonheur pour moi.

À mon oncle Amine, qui a toujours été là pour moi, je te remercie du fond du cœur.

À mes proches amis, qui ont illuminé ma vie de leur présence et de leur tendresse, qui me connaissent et m'acceptent, qui me conseillent et me respectent.

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin

Dahmani Kawter

Résumé

La fibre optique est sans doute le meilleur support de transmission actuellement, et ceci est dû aux différents avantages qu'elle présente. Pour exploiter la fibre optique en transmission, il faut sans doute étudier sa connectique, les émetteurs/récepteurs optiques et les dispositifs largement utilisés dans les réseaux optiques haut-débits. Dans ce mémoire de fin d'études, nous avons testé et analysé des émetteurs/récepteurs (SFPs) à 1 Gbps dans une liaison optique de 2 Km. Ainsi, nous avons réalisé, testé et analysé différents dispositifs optiques expérimentalement, tel que : un multiplexeur optique basé sur des filtres FWDM et coupleurs passifs, un modulateur optique numérique ASK-2 et un routeur 1 × 2 basés sur des atténuateurs optiques variables.

Mots-clés : Fibre optique ; SFP ; coupleur ; connecteur ; modulateur ; filtre FWDM ; multiplexeur ; routeur ; atténuateur (VOA).

Abstract

Optical fiber is probably the best transmission medium today, and this is due to the different advantages it presents. To exploit optical fiber in transmission, it is probably necessary to study its connectivity, optical transceivers and devices widely used in high-speed optical networks. In this dissertation, we tested and analyzed transceivers (SFPs) at 1 Gbps in a 2 km optical link. Thus, we realized, tested and analyzed different optical devices experimentally, such as : an optical multiplexer based on FWDM filters and passive couplers, an ASK-2 digital optical modulator and a 1 × 2 router based on variable optical attenuators.

Keywords : Optical fiber ; SFP; coupler; connector; modulator; FWDM filter; multiplexer; router; attenuator (VOA).

الملخص

ربما تكون الألياف الضوئية هي أفضل وسيلة نقل اليوم، ويرجع ذلك إلى المزايا المختلفة التي تقدمها. لاستغلال الألياف الضوئية في الإرسال، ربما يكون من الضروري دراسة توصيلها وأجهزة الإرسال والاستقبال الضوئية والأجهزة المستخدمة على نطاق واسع في الشبكات الضوئية عالية السرعة. في هذه الأطروحة، قمنا باختبار وتحليل أجهزة الإرسال والاستقبال (SFPs) بسرعة 1 جيجا بت في الثانية في وصلة بصرية بطول 2 كم. وهكذا، أدركنا واختبرنا وحللنا أجهزة بصرية مختلفة تجريبياً، مثل: مضاعف إرسال بصري يعتمد على مرشحات FWDM وقارنات التوصيل السلبية، ومعدل بصري رقمي ASK-2 وجهاز توجيهه 1×2 يعتمد على مخفضات بصرية متغيرة.

كلمات المفتاحية: الألياف الضوئية؛ سغب. مقرنه؛ موصل؛ المغير؛ مرشح FWDM؛ متعدد؛ موجة؛ المخفف



TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT	A
DÉDICACE	B
DEDICACE	C
RESUME	D
TABLE DES MATIERES	E
TABLE DES FIGURES	H
LISTE DES TABLEAUX	J
LISTE DES ABREVIATIONS	K
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA FIBRE OPTIQUE	2
I.1. INTRODUCTION	5
I.2. HISTORIQUE	5
I.3. COUCHES PHYSIQUES DE LA FIBRE OPTIQUE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
I.3.1. LE CŒUR	7
I.3.2. LA GAINE	8
I.3.3. LE REVETEMENT	8
I.3.4. LA COUCHE DE RENFORT	8
I.3.5. LA GAINE EXTERIEURE	8
I.4. FONCTIONNEMENT DE LA FIBRE OPTIQUE	9
I.4.1. LES PRINCIPES DE LA FIBRE OPTIQUE	9
I.4.1.1. La lumière est utilisée pour transmettre des données	Erreur ! Signet non défini.
I.4.1.2. Conversion du signal optique en données électroniques	9
I.4.1.3. Bande passante très élevée	9
I.5. COMPARAISON AVEC LES AUTRES	9
I.6. LES DIFFERENTS TYPES DE FIBRES	10
I.6.1. LES FIBRES MONOMODES	10
I.6.2. LES FIBRES MULTIMODES	10
I.6.3. LES FIBRES MULTIMODE A SAUT D'INDICE	11
I.6.4. LES FIBRES MULTIMODE A GRADIENT D'INDICE	11
I.7. LES CONNECTEURS OPTIQUES	12
I.8. CONSTRUCTION GENERALE DU CONNECTEUR	12
I.9. TYPES DE CONNECTEURS COURANTS	14

I.9.1. CONNECTEUR SC	14
I.9.2. CONNECTEUR ST	15
I.9.3. CONNECTEUR FDDI	16
I.9.4. CONNECTEUR FC	16
I.10. LES APPLICATIONS DE LA FIBRE OPTIQUE	17
I.10.1. TELECOMMUNICATION	17
I.10.2. INTERNET HAUT DEBIT	17
I.10.3. RESEAUX INFORMATIQUE	17
I.10.4. CAPTEURS OPTIQUE	17
I.11. CARACTERISTIQUES DES FIBRES	18
I.11.1. LA DISPERSION	18
I.11.1.1. Dispersion modale	19
I.11.1.2. Dispersion chromatique	21
I.11.1.3. Dispersion du guide d'ondes	22
I.11.1.4. Dispersion de polarisation	22
I.11.2. L'ATTENUATION	23
I.12. TRANSMISSION DE LA THEORIE DES RAYONS	24
I.12.1. REFLEXION INTERNE TOTALE	24
I.12.2. ANGLE D'ACCEPTATION	27
I.12.3. OUVERTURE NUMERIQUE	29
I.13. LE CHOIX DE LA FREQUENCE	31
I.13.1. ONDES ELECTROMAGNETIQUES	31
I.13.2. SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE	31
I.13.3. LES FENETRES	34
I.14. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE LA FIBRE OPTIQUE	35
I.14.1. LES AVANTAGES	35
I.14.2. LES INCONVENIENTS	36
I.15. CONCLUSION	36

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES SFP (SMALL **5**

FORM-FACTOR PLUGGABLE). **5**

II.1. INTRODUCTION	38
II.2. TYPES DE MODULES SFP	38
II.2.1. MODULES SFP POUR FIBRES MULTIMODES	38
II.2.2. MODULES SFP POUR FIBRES MONOMODES	39
II.2.3. MODULES SFP BIDIRECTIONNELS	40
II.2.4. MODULES SFP CWDM ET DWDM	40
II.3. SFP SIMPLEX ET SFP DUPLEX	41
II.4. APPLICATIONS DES MODULES SFP	42
II.4.1. TRANSMISSION DE DONNEES A GRANDE VITESSE	42
II.4.2. CAMERAS DE SECURITE	42
II.4.3. RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS	42
II.4.4. SYSTEMES D'AUTOMATISATION INDUSTRIELLE	43
II.5. LES AVANTAGES DES MODULES SFP	43
II.6. LES INCONVENIENTS DES MODULES SFP	43

II.7. CONCLUSION	44
<u>CHAPITRE III : REALISATION ET TEST DE DISPOSITIFS OPTIQUES VIA SFPS, FILTRES FWDM, COUPLEURS ET ATTENUATEURS OPTIQUES.</u>	<u>38</u>
III.1. INTRODUCTION	46
III.2. DEFINITIONS	46
III.3. MANIPULATION	47
III.3.1. REALISATION ET TEST D'UNE LIAISON A FIBRE AVEC DES MEDIA CONVERTERS BIDI	47
III.3.2. REALISATION ET TEST D'UN MULTIPLEXEUR 2X1 BASE SUR DES FILTRES FWDM ET COUPLEURS OPTIQUES	56
III.3.2.1. Etude d'un filtre FWDM	56
III.3.2.2. Réalisation et test d'un multiplexeur 2x1	57
III.3.3. REALISATION ET TEST D'UN MODULATEUR ASK-2 A BASE D'ATTENUATEURS OPTIQUES VARIABLES (VOA)	59
III.3.4. REALISATION ET TEST D'UN SWITCH 1X2 A BASE D'ATTENUATEURS OPTIQUE VARIABLES (VOA) ET COUPLEURS 1X2	64
III.4. CONCLUSION	67
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	<u>69</u>
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	<u>69</u>
<u>RESUME</u>	<u>68</u>
<u>MOTS-CLES</u>	<u>68</u>
<u>ABSTRACT</u>	<u>68</u>
<u>KEYWORDS</u>	<u>68</u>
<u>الكلمات المفتاحية</u>	<u>68</u>

TABLE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur la fibre optique

FIGURE I-1 : COMPOSITION DE LA FIBRE OPTIQUE.	8
FIGURE I-2 : FIBRE MONOMODE.	10
FIGURE I-3 : FIBRE A SAUT D'INDICE.	11
FIGURE I-4 : FIBRE A GRADIENT D'INDICE.	12
FIGURE I-5 : AGENCEMENT DE MANCHON DE CONNECTEUR.	13
FIGURE I-6 : CONNECTEUR A LENTILLES.	14
FIGURE I-7 : SC CONNECTEUR.	15
FIGURE I-8 : ST CONNECTEUR.	16
FIGURE I-9 : FDDI CONNECTEUR.	17
FIGURE I-10 : DISPERSION DES IMPULSIONS EN FONCTION DE LA DISTANCE PARCOURUE A L'INTERIEUR DE LA FIBRE.	18
FIGURE I-11 : DISPERSION MODALE DANS UNE FIBRE MULTIMODE.	20
FIGURE I-12 : TRAJECTOIRE DE DIFFERENTS MODES DANS UNE FIBRE A GRADIENT D'INDICE.	20
FIGURE I-13 : DISPERSION EN MODE DE POLARISATION (PMD) A LA SUITE DE LA BIREFRINGENCE DES FIBRES.	23
FIGURE I-14 : RAYONS LUMINEUX INCIDENTS SUR UNE INTERFACE A INDICE DE REFRACTION ELEVE A FAIBLE (VERRE-AIR) : (A) REFRACTION ;(B) LE CAS LIMITE DE REFRACTION MONTRANT LE RAYON CRITIQUE A UN ANGLE ϕ_c ; (C) REFLEXION INTERNE TOTALE LORSQUE $\phi > \phi_c$.	25
FIGURE I-15 : LA TRANSMISSION D'UN RAYON LUMINEUX DANS UNE FIBRE OPTIQUE PARFAITE.	26
FIGURE I-16 : ANGLE D'ACCEPTATION θ_a LORS DU LANCEMENT DE LA LUMIERE DANS UNE FIBRE OPTIQUE.	28
FIGURE I-17 : TRAJET DU RAYON D'UN RAYON MERIDIONAL LANCE DANS UNE FIBRE OPTIQUE DANS L'AIR A UN ANGLE D'ENTREE INFERIEUR A L'ANGLE D'ACCEPTATION DE LA FIBRE.	29
FIGURE I-18 : LA FIBRE OPTIQUE UTILISE LA LUMIERE VISIBLE ET INFRAROUGE.	32
FIGURE I-19 : LES FENETRES INFRAROUGES UTILISEES EN FIBRE OPTIQUE.	35

Chapitre II : Généralités sur les SFP (Small Form-factor Pluggable)

FIGURE II-1 : COMPOSITION INTERNE DE SFP.	38
FIGURE II-2 : SFP POUR FIBRES MULTIMODES.	39
FIGURE II-3 : SFP POUR FIBRES MONOMODES.	40
FIGURE II-4 : SFP DUPLEX AVEC DOUBLE PORT FIBRE ET SFP SIMPLEX AVEC PORT FIBRE UNIQUE.	42

Chapitre III : Réalisation et test de dispositifs optiques via SFPs, filtres FWDM, coupleurs et atténuateurs optiques

FIGURE III-1 : MEDIA CONVERTER.	47
FIGURE III-2 : METHODE D'IDENTIFICATION DU MEDIA CONVERTER.	48
FIGURE III-3 : IDENTIFICATION PRATIQUE DU MEDIA CONVERTER.	50
FIGURE III-4 : CONNEXION DE DEUX MCS ET VERIFICATION DES VOYANTS.	51
FIGURE III-5 : MONTAGE PRATIQUE COMPLET DE NOTRE LIAISON OPTIQUE DE 2KM AVEC UN DEBIT DE 100 MBPS.	52
FIGURE III-6 : RESULTAT DE TEST DE LIAISON AVEC LE LOGICIEL ROADKIL'S COMMTEST.	52
FIGURE III-7 : ECHANGE DE DONNEES VIDEO ENTRE LES LAPTOPS AVEC DUKTO-R6.	53
FIGURE III-8 : ATTENUATEUR 25 DB AVEC CONNECTEUR FC/APC.	55
FIGURE III-9 : MONTAGE COMPLET REALISE AVEC DES ATTENUATEURS OPTIQUES FIXES.	56
FIGURE III-10 : SCHEMA SYNOPTIQUE DU MULTIPLEXEUR 2X1.	57
FIGURE III-11 : COUPLEUR PLC 2X1	57
FIGURE III-12 : REALISATION D'UN MULTIPLEXEUR OPTIQUE 2X1.	59
FIGURE III-13 : ATTENUATEUR OPTIQUE VARIABLE (VOA).	59
FIGURE III-14 : CARACTERISTIQUE DU VOA.	60
FIGURE III-15 : TEST D'UN MODULATEUR ASK-2 A BASE DE VOA.	61
FIGURE III-16 : SIGNAL MODULE DE SORTIE ASK-2.	62
FIGURE III-17 : SCHEMA DU DEMODULATEUR.	62
FIGURE III-18 : PHOTO-DETECTEUR PIN.	63
FIGURE III-19 : MONTAGE DE DEMODULATION DU SIGNAL ASK-2.	63
FIGURE III-20 : REPRESENTATION DU SIGNAL DEMODULE.	64
FIGURE III-21 : SCHEMA SYNOPTIQUE DU SWITCH OPTIQUE 1X2.	64
FIGURE III-22 : REALISATION D'UN SWITCH 1X2 A L'AIDE DE VOAS.	65

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU III-1 : MESURES OBTENUES SUR LE MC "A", PORT FWDM REF. _____	49
TABLEAU III-2 : MESURES OBTENUES SUR LE MC "A", PORT FWDM PASS. _____	49
TABLEAU III-3 : MESURES OBTENUES SUR LE MC "B", PORT FWDM PASS. _____	49
TABLEAU III-4 : MESURES OBTENUES SUR LE MC "B", PORT FWDM REF. _____	49
TABLEAU III-5 : MESURES OBTENUES AVEC LES DIFFERENTS ATTENUATEURS OPTIQUES FIXES. _____	54

Liste des abréviations

A

APC : Angled Physical Contact

ASK : Amplitude Shift Keying

B

BIDI : Bidirectional

C

CEI : Commission Electrotechnique Internationale

CWDM : Coarse Wavelength Division Multiplexing

D

DEL : Diode électroluminescente

DSL : Digital Subscriber Line

DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing

E

ER : Extinction Ration

I

IP : Internet Protocol

F

FC : Fiber Connector

FDDI : Fiber Distributed Data Interface

FBT : Fused Biconical Taper

FTTH : Fiber to the home

FWDM : Fiber Wavelength Division Multiplexing

I

IL : Insertion loss

ISO : International Organization for Standardization

G

GBIC : Gigabit Interface Converter

GRIN : Gradient Refractive Index

L

LAN : Local Area Network

LC : Lucent Connector

M

MC : Media Converter

MMF : Multi-Mode Fiber

MSA : Multiple System Atrophy

O

ON : Ouverture numérique

OPM : Optical Power Meter

P

PC : Physical Connector

Pc : Personal Computer

PD : Photo-détecteur

PIN : Positive Intrinsic Negative

PLC : Planar Lightwave Circuit

PMD : Polarization Mode Dispersion

PON : Passive Optical Network

S

SC : Subscriber Connector

SFP : Small Form-factor Pluggable

SMA : stands for SubMiniature version A

SMF : Single-mode fiber

ST : Straight Tip

T

TIA : Telecommunications Industry Association

U

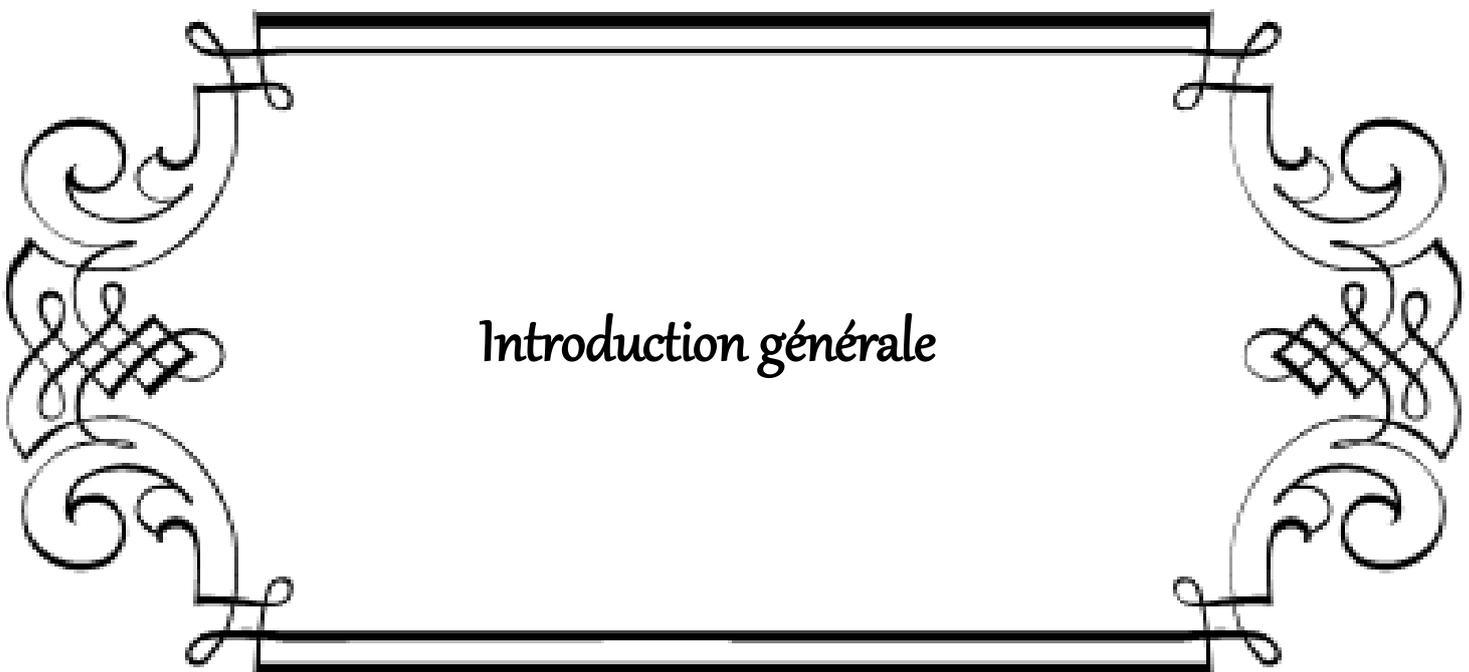
UPC : Ultra Physical Contact

V

VOA : Variable Optical Attenuator

W

WDM : Wavelength Division Multiplexing



Introduction générale

Introduction générale

Utilisant de minuscules fils de verre ou de plastique, la fibre optique permet une transmission de données ultra-rapide. Ses nombreux avantages couvrent des domaines allant de la médecine aux télécommunications, et même à l'éclairage. Mais, connecter la fibre optique aux équipements réseau nécessite un élément matériel crucial connu sous le nom de module SFP (Small Form Factor Pluggable), qui garantit l'excellence et l'efficacité de la communication optique.

Les modules SFP et la fibre optique ont piqué notre curiosité, grâce à notre formation en télécommunications qui nous a apporté des connaissances à la fois théoriques et pratiques sur le volet réseaux et des systèmes de télécommunication. Notre inspiration vient de notre encadreur, qui nous a poussés à expérimenter les modules émetteurs/récepteurs optiques, connus sous le nom SFP, et ses applications en transmission optique.

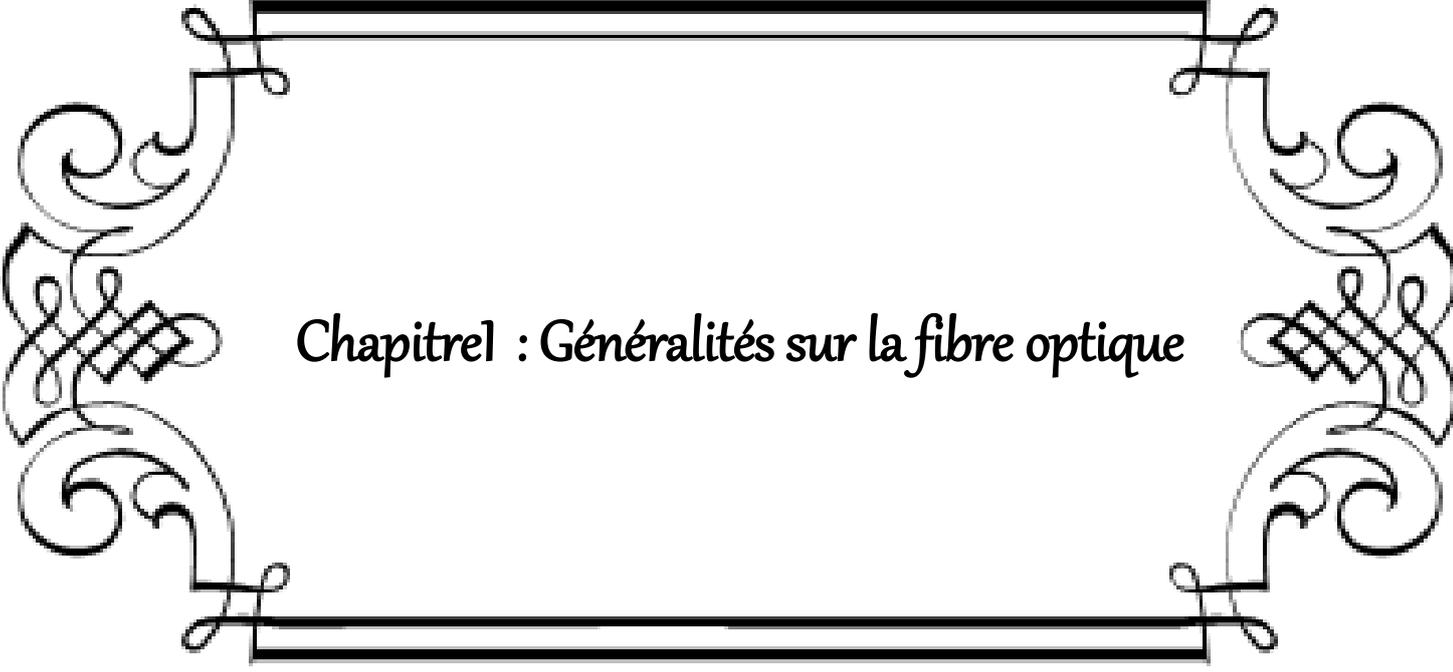
L'objectif principal de notre mémoire est de montrer les possibilités offertes par la fibre optique et les modules SFP dans le domaine des communications optiques. Pour cela, nous avons utilisé une démarche expérimentale basée sur l'analyse et évaluation des performances de quelques dispositifs optiques au laboratoire de télécommunications (LTEC) de la faculté de Technologie-Tlemcen.

Notre mémoire est constitué de trois chapitres. Le premier chapitre présente le contexte qui entoure notre travail dans son ensemble. Au sein de celui-ci, nous élaborons sur de nombreux sujets, y compris les connaissances sur la fibre optique telles que son histoire, ses caractéristiques, fonctions et applications.

En deuxième chapitre, Nous décrivons l'étude du SFP - un module crucial qui relie les équipements de réseau et les fibres optiques. Dans ce chapitre, les lecteurs examineront les diverses applications, les différents types de SFPs, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Il s'agit essentiellement d'une ventilation complète de tout ce qui concerne une SFP.

Dans le troisième chapitre, nous présentons plusieurs réalisations et tests pratiques liés à la fibre optique. Nous avons réalisé une liaison à fibre avec des media converters BIDI (Bidirectional), étudié un filtre FWDM (Filter Wavelength Division Multiplexing), réalisé un multiplexeur 2x1 à base de coupleurs et filtres FWDM, réalisé

et testé un modulateur ASK-2 (Amplitude Shift Keying) à base d'atténuateurs optiques variables (VOA) et enfin nous avons



Chapitre 1 : Généralités sur la fibre optique

I.1. Introduction

La fibre optique est un moyen de transmission de l'information d'un point à un autre sous forme de lumière. Elle offre des débits 100 fois plus élevés que le réseau actuel en cuivre. Elle permet d'offrir une grande sécurité et une faible atténuation du signal. Elle est donc adaptée pour les transmissions de données sur de longues distances et dans les domaines sensibles comme la défense ou la santé.

I.2. Historique

La technologie de la fibre optique n'a pas suffisamment progressé pour devenir une proposition commercialement viable à des fins de communication avant les années 1980. Toutefois, l'évolution des normes internationales en matière de télécommunications prévoyait des exigences très élevées en matière de débit de données. Bien que la capacité de transmission puisse être obtenue à partir des technologies classiques du câble, des micro-ondes et des satellites, il y avait une nette pénurie de capacité de transmission pour les besoins de transfert de données à terme. Les systèmes de transmission par fibre optique ont fourni l'énorme capacité nécessaire pour surmonter les déficits potentiellement désastreux. Une brève description chronologique des principaux événements de l'histoire technologique qui ont façonné le développement des communications par fibre optique est donnée ici : Les premières sociétés préhistoriques utilisaient des feux de signalisation pour envoyer des messages numériques vers des endroits éloignés. Polybios, un mathématicien grec, a développé une méthode d'envoi de caractères à l'aide de feux en établissant une matrice de caractères où un ensemble de feux représentait des lignes de la matrice et l'autre ensemble représentait les colonnes de la matrice (Bailey & Wright, 2003).

En 1700 Isaac Newton découvre la diffraction de la lumière et que la lumière est construite à partir d'un spectre de nombreuses couleurs différentes (Bailey & Wright, 2003).

en 1790 L'ingénieur français Claude Chappe développe le premier système de télégraphe optique utilisant des sémaphores. Les messages étaient relayés d'une colline à l'autre à l'aide de bras sémaphores mobiles (Bailey & Wright, 2003).

en 1800 William Herschel découvre qu'une certaine partie du spectre du visible contient de l'énergie infrarouge. Le mathématicien français Augustin Fresnel a développé le premier modèle mathématique pour expliquer les propriétés de la lumière. Sa

proposition était basée sur la prémisse que la lumière est construite d'ondes sinusoïdales. Le physicien James Maxwell a jeté les bases du développement de l'étude de la transmission de la lumière sous forme d'ondes électromagnétiques. Les équations de Maxwell sont encore utilisées pour expliquer le comportement des ondes radio et lumineuses dans les systèmes de transmission (Bailey & Wright, 2003).

en 1854 Le physicien britannique John Tyndall met en place une expérience par laquelle il fait passer de la lumière sur un faisceau d'eau, démontrant la transmission d'un signal par réflexion interne totale (Bailey & Wright, 2003).

en 1880 Le célèbre inventeur Alexander Bell a inventé un appareil appelé Photophone, qui contenait une membrane en matériau réfléchissant. Lorsque le son faisait vibrer le photophone, il modulait un faisceau lumineux qui brillait sur lui et réfléchissait cette lumière vers un endroit éloigné. La lumière réfléchie pourrait alors être démodulée à l'aide d'un autre photophone. En appliquant cette méthode, Bell a pu communiquer à une distance maximale de 213 mètres. L'ingénieur américain William Wheeler a conçu un système d'éclairage pour un bâtiment basé sur une série de tuyaux et de conduits. La lumière était injectée dans une extrémité et la réflexion interne à travers les tuyaux transportait les rayons lumineux vers un certain nombre d'extrémités de tuyaux qui émanaient dans les pièces où la lumière devait être diffusée. Bien que le système n'aurait probablement jamais fonctionné efficacement, l'idée était bonne et a finalement conduit à l'avènement des communications par fibre optique (Bailey & Wright, 2003).

en 1907 Un chimiste nommé Round a découvert qu'en polarisant vers l'avant différents types de cristaux de carbure de silicium, ils émettaient de la lumière jaune, verte, orange ou bleue (Bailey & Wright, 2003).

en 1910 Deux physiciens, Hondros et Deybe, publient un article important sur la transmission des ondes électromagnétiques dans les solides diélectriques (Bailey & Wright, 2003).

en 1923 Lossew, un physicien, développe la diode électroluminescente (DEL) (Bailey & Wright, 2003).

en 1927 Baird, un ingénieur, propose l'utilisation de fibres non revêtues pour transmettre des images à des fins de télévision (Bailey & Wright, 2003).

en 1934 L'ingénieur AT & T Norman French a breveté pour la première fois l'idée de transmettre des signaux de communication sur un mince morceau de verre. À cette époque, il n'existait pas de matériaux transparents avec une atténuation suffisamment faible pour rendre la technologie réalisable (Bailey & Wright, 2003).

en 1955 Un ingénieur de RCA Braunstein a développé un dispositif en arséniate de gallium qui émettait un signal infrarouge (Bailey & Wright, 2003).

en 1956 NS Kapany, une société américaine, utilise pour la première fois le terme « fibre optique ». Il a le mérite d'avoir inventé la tige de verre pour la première fois (Bailey & Wright, 2003).

en 1960 Theodore Maiman, un ingénieur de Hughes Aircraft, a développé le premier laser à gaz fonctionnel. IBM, General Electric et le Massachusetts Institute of Technology ont tous développé pratiquement simultanément des diodes laser à injection (Bailey & Wright, 2003)].

en 1966 Deux chercheurs de STL à Harlow ont mis au point une fibre de verre dont l'intensité était d'environ 1000 dB/km (Bailey & Wright, 2003).

en 1970 La société Corning Glass Works a développé une technique de fabrication de fibres de verre présentant une atténuation de 20 dB/km. Les laboratoires Bell, RCA et des scientifiques de l'Union soviétique de l'époque ont développé des lasers à injection à semi-conducteurs à fonctionnement continu (Bailey & Wright, 2003).

en 1972 L'atténuation du signal dans les fibres optiques est réduite à 4 dB/km (Bailey & Wright, 2003).

en 1976 Rediffusion installe le premier système commercial de fibre optique pour la transmission de signaux de télévision analogiques (Bailey & Wright, 2003).

en 1980 Les systèmes de communication par fibre optique sont commercialisés (Drouet, 2009).

en 1988 : Le premier câble à fibre optique transatlantique, TAT-8, est mis en service avec une capacité de 280 Mb/s (Boullier, 2014).

en 1996 : TPC-5, le premier câble tout fibre utilisant des amplificateurs optiques, est posé à travers l'océan Pacifique (ElettroAmici, s.d).

I.3. Structure de la fibre optique

I.3.1. Le cœur

C'est la partie centrale de la fibre optique, qui transporte le signal lumineux. Il est constitué d'un matériau diélectrique transparent, généralement du verre ou du plastique, dont l'indice de réfraction est supérieur à celui de la gaine. Le diamètre du cœur varie selon le type de fibre optique, de quelques micromètres à quelques centaines de micromètres.

I.3.2. La gaine

C'est la couche qui entoure le cœur et qui assure le guidage du signal lumineux par réflexion totale. Elle est également constituée d'un matériau diélectrique transparent, mais dont l'indice de réfraction est inférieur à celui du cœur. La différence d'indice entre le cœur et la gaine détermine le mode de propagation de la lumière dans la fibre optique (optique, s. d).

I.3.3. Le revêtement

C'est la couche qui protège la gaine des agressions extérieures, comme l'humidité, les rayures ou les chocs. Il est constitué d'un matériau plastique souple et résistant, souvent du polyimide ou de l'acrylate. Le revêtement n'a pas d'influence sur les propriétés optiques de la fibre optique, mais il joue un rôle important pour sa manipulation et sa mise en œuvre.

I.3.4. La couche de renfort

C'est la couche qui renforce la résistance mécanique de la fibre optique et qui évite sa rupture sous l'effet de la traction ou de la flexion. Elle est constituée de fils ou de rubans de matériaux résistants, comme le kevlar ou l'acier. La couche de renfort est généralement disposée autour du revêtement ou incorporée dans une gaine secondaire.

I.3.5. La gaine extérieure

C'est la couche qui assure l'isolation électrique et thermique de la fibre optique et qui facilite son identification et son repérage. Elle est constituée d'un matériau plastique coloré ou marqué, souvent du polyéthylène ou du PVC. La gaine extérieure peut également contenir des éléments supplémentaires, comme des tubes ou des rubans hydrophobes, pour améliorer l'étanchéité de la fibre optique.

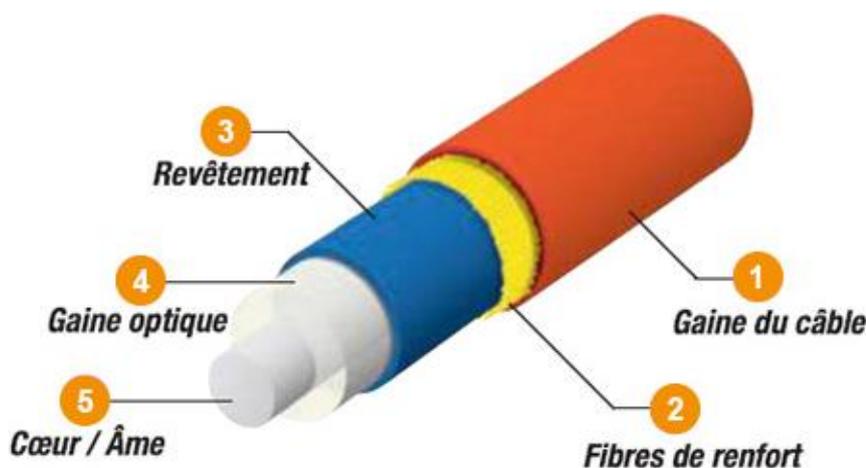


Figure I-1 : Composition de la fibre optique (Compufirst, s.d).

I.4. Fonctionnement de la fibre optique

I.4.1. Les principes de la fibre optique

La transmission optique est une méthode de transmission de données via des fibres optiques à l'aide de signaux optiques. Voici les principes de base de la transmission lumineuse :

I.4.1.1. Les fibres optiques sont utilisées pour transmettre des signaux

Les fibres optiques sont des fils de verre ou de plastique très fins qui peuvent transmettre la lumière sur de longues distances sans perte de signal notable. Réfléter les signaux optiques à l'intérieur des fibres optiques à l'aide de la réflexion interne totale (Studocu, s.d).

I.4.1.2. Conversion du signal optique en données électroniques

Une fois que le signal optique atteint sa destination, il est converti en données électroniques par le récepteur optique. Les informations sont ensuite transmises à un ordinateur ou à un autre appareil à l'aide de signaux électroniques.

I.4.1.3. Bande passante très élevée

La transmission optique peut fournir une bande passante très élevée, permettant aux données d'être transmises à des vitesses très élevées. Les fibres optiques peuvent transmettre des signaux lumineux à des vitesses allant jusqu'à plusieurs téraoctets par seconde.

I.5. Comparaison avec les autres

Les fibres optiques sont généralement plus rapides et peuvent transmettre plus de données sur de plus grandes distances que les câbles coaxiaux. Les câbles coaxiaux sont utilisés pour les connexions Internet filaires, la télévision par câble et les réseaux locaux (LAN).

La fibre est également plus rapide et peut transmettre plus de données sur de plus grandes distances que les lignes téléphoniques. Les lignes téléphoniques sont couramment utilisées pour les connexions Internet DSL (Digital Subscriber Line) et les réseaux téléphoniques.

Généralement, la fibre optique est considérée comme la technologie de transmission de données la plus rapide et la plus fiable. Il peut transférer de grandes quantités de données à grande vitesse sur de longues distances sans perte de qualité ou de vitesse. C'est pourquoi il s'agit de la norme pour les connexions Internet à haut débit et les réseaux d'entreprise à haut débit.

I.6. Les différents types de fibres

I.6.1. Les fibres monomodes

Une fibre monomode est une fibre qui permet à la lumière monomode d'être transmise à travers le cœur. Le cœur est la partie centrale de la fibre qui transmet la lumière. La fibre monomode a généralement un diamètre de cœur de 8 à 10 microns et une gaine de 125 microns (Drouet, 2009).

La fibre monomode est utilisée pour la transmission longue distance (jusqu'à 100 kilomètres ou plus), comme les liaisons entre les réseaux de télécommunications et les centres de données. Les avantages de la fibre monomode sont une bande passante élevée, une faible atténuation (perte de signal) et la capacité de transmettre des signaux sur de longues distances sans régénération (Drouet, 2009).

Cependant, la fibre monomode peut être plus chère que la fibre multimode et plus complexe à installer en raison de la précision requise pour aligner la source lumineuse avec le cœur de la fibre (Drouet, 2009).

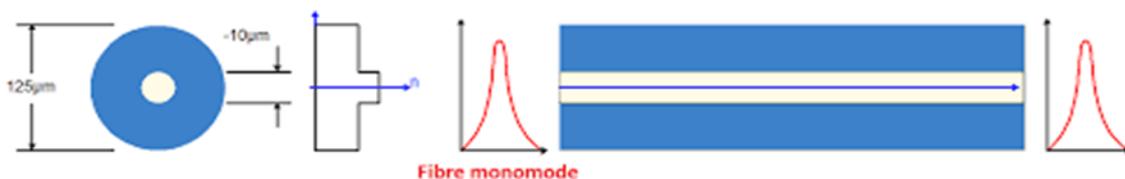


Figure I-2 : Fibre monomode (Duris, s.d).

I.6.2. Les fibres multimodes

Une fibre multimode est une fibre qui permet à plusieurs modes de lumière de traverser simultanément le cœur. Le noyau est la partie centrale de la fibre qui transmet la lumière. La fibre multimode a généralement un diamètre de cœur de 50 à 62,5 microns et une gaine de 125 microns (Duris, s.d).

La fibre multimode est généralement utilisée pour des distances plus courtes (moins de 2 km), telles que les applications LAN et industrielles. Les avantages de la fibre multimode sont un coût inférieur par rapport à la fibre monomode, la capacité de

transmettre des signaux sur de courtes distances et une installation plus facile car un alignement moins précis de la source lumineuse peut être toléré (Duris, s.d).

Cependant, les fibres multimodes ont une bande passante plus limitée et une atténuation plus élevée (perte de signal) que les fibres monomodes, ce qui peut limiter leur utilisation pour la transmission longue distance et les applications nécessitant une grande capacité de bande passante (Duris, s.d).

I.6.3. Les fibres multimode à saut d'indice

Une fibre multimode à saut d'indice est une fibre dont l'indice de réfraction est constant dans le cœur et plus faible dans la gaine. Ils permettent à plusieurs modes de lumière de voyager à travers le cœur, mais à des vitesses et des chemins différents. Cela provoque une dispersion modale, qui limite la bande passante et la distance de transmission de ces fibres. Ils sont généralement utilisés dans les LAN à faible vitesse et à faible coût (FS, 2018).

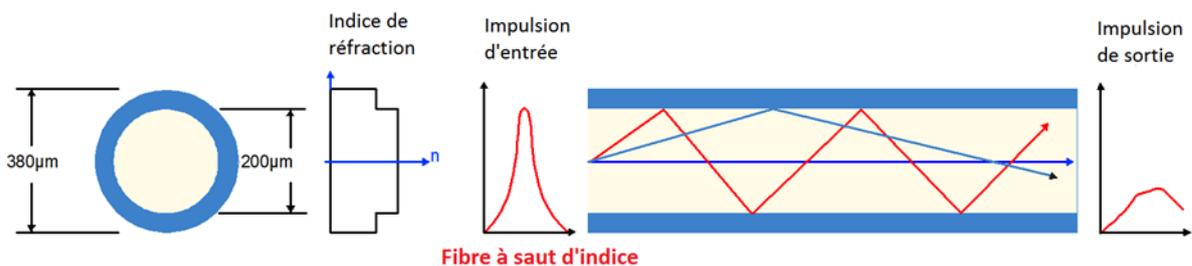


Figure I-3 : Fibre à saut d'indice (Duris, s.d).

I.6.4. Les fibres multimode à gradient d'indice

Les fibres multimode à gradient d'indice sont des fibres optiques dont l'indice de réfraction varie de façon continue dans le cœur, en diminuant du centre vers la périphérie. Elles permettent également la propagation de plusieurs modes de lumière dans le cœur, mais avec une vitesse plus uniforme. En effet, les modes qui empruntent des trajets plus longs bénéficient d'un indice de réfraction plus faible, ce qui compense le retard par rapport aux modes qui empruntent des trajets plus courts. Cela réduit la dispersion modale et augmente la bande passante et la distance de transmission de ces fibres. Elles sont généralement utilisées dans les réseaux locaux à moyenne vitesse et à coût modéré (FS, 2018).

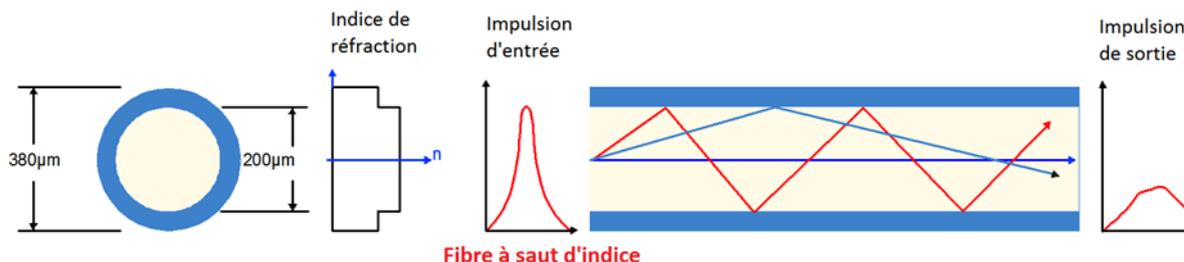


Figure I-4 : Fibre à gradient d'indice (*Duris, s.d.*)

I.7. Les connecteurs optiques

C'est un composant qui relie les deux extrémités de la fibre optique entre elles ou à l'appareil. Il assure l'alignement des fibres et minimise la perte de lumière. Il existe différents types de connecteurs (SC, LC, ST, FC...) selon la forme, le diamètre et le mode de fixation de la fibre.

I.8. Construction générale du connecteur

Il existe de nombreux types de connecteurs. Les concepts de base de la conception du connecteur sont illustrés à la figure I-5 et décrits ci-dessous. La plupart des conceptions de connecteurs produisent un joint bout à bout avec les extrémités de la fibre aussi proches que possible. La fibre est montée dans une virole avec une taille de trou pour correspondre étroitement au diamètre du revêtement en fibres. La virole est généralement en métal ou en céramique et son but est de centrer et d'aligner la fibre ainsi que de fournir une protection mécanique à l'extrémité de la fibre. La fibre est normalement collée dans la virole puis l'extrémité coupée et polie pour être affleurée avec la face de la virole. Les viroles de deux connecteurs s'accouplent avec un manchon précis et lisse, également appelé adaptateur ou récipient d'accouplement, qui fournit

L'alignement axial et angulaire nécessaire. Les viroles et les manchons peuvent être effilés, comme dans les connecteurs biconiques, auquel cas des connecteurs en plastique peuvent être utilisés. En effet, il y a peu d'usure abrasive lorsque des composants coniques sont connectés et déconnectés à plusieurs reprises (Bailey & Wright, 2003).

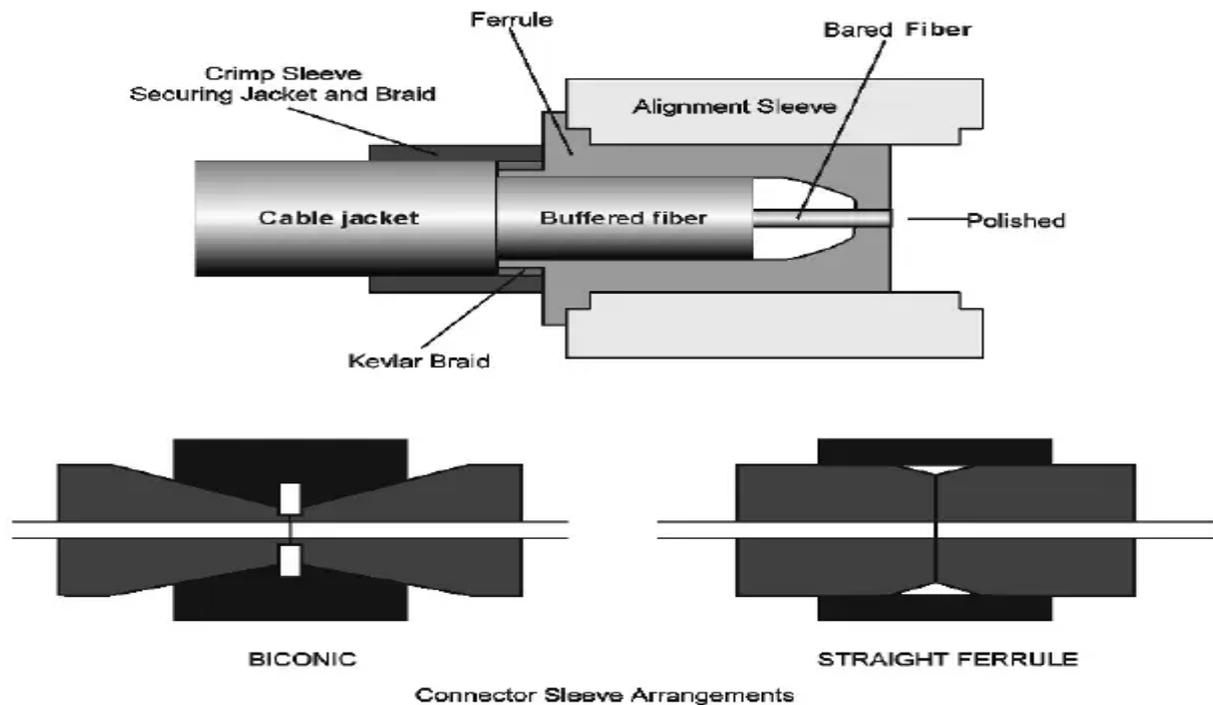


Figure I-5 : Agencement de manchon de connecteur (Bailey & Wright, 2003).

Les viroles sont montées dans le corps du connecteur, normalement en métal ou en plastique, avec une disposition pour le soulagement de la contrainte de la fibre. L'élément de résistance du câble et la gaine sont généralement fixés au corps et une botte de décharge de tension peut fournir une protection supplémentaire à la jonction avec le connecteur. Le corps du connecteur nécessite également généralement un mécanisme pour le fixer à l'adaptateur de couplage. Cela peut prendre la forme d'une connexion vissée (types SMA, FC et bisonic), d'une connexion à baïonnette à ressort (connecteur ST et SC). Un autre type de connecteur suit une approche à lentilles. Ceci est illustré schématiquement à la figure I-6. Une lentille est utilisée pour collimater le faisceau sortant de l'extrémité de la fibre. La distance fibre-lentille est égale à la distance focale de la lentille. Cela produit un faisceau parallèle du diamètre de la lentille. Cette disposition, lorsqu'elle est associée à un connecteur similaire, a moins de sensibilité au décalage latéral et à l'écart entre les connecteurs. De plus, il permet d'installer des

fenêtres en verre sur la lentille pour la protéger contre la saleté et les rayures. Ces connecteurs sont plus chers et sont utilisés là où des performances robustes sont critiques, comme pour un usage militaire (Bailey & Wright, 2003).

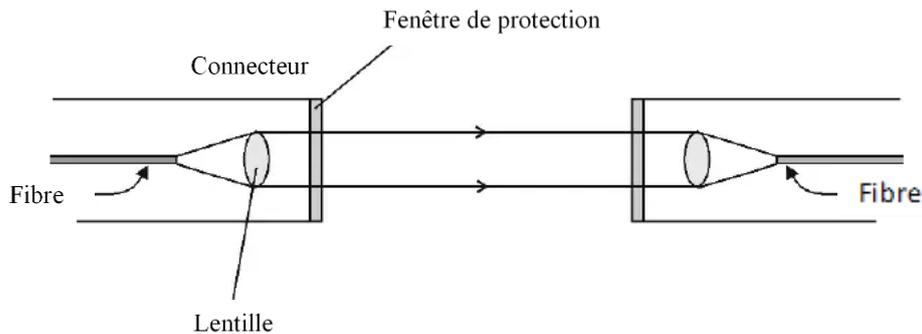


Figure I-6 : Connecteur à lentilles (Bailey & Wright, 2003).

I.9. Types de connecteurs courants

Il existe de nombreuses conceptions propriétaires pour les connecteurs. Une certaine normalisation est en train d'émerger et l'Organisation internationale de normalisation (ISO), la Commission électrotechnique internationale (CEI) et l'Association des industries des télécommunications (TIA) ont toutes approuvé un type de connecteur, le connecteur SC. Deux autres types de connecteurs sont largement utilisés : le connecteur ST dans les industries des données et des télécommunications et le connecteur FDDI duplex dans les réseaux locaux. Ces connecteurs sont décrits en détail ci-dessous (Bailey & Wright, 2003).

I.9.1. Connecteur SC

Le connecteur SC est le connecteur le plus couramment utilisé dans l'industrie aujourd'hui. Le connecteur SC est illustré à la figure I-7. Celui-ci est construit avec une virole cylindrique en céramique, qui s'accouple avec un récipient d'accouplement. Le connecteur a une section transversale carrée pour une densité d'emballage élevée sur

l'équipement et dispose d'un mécanisme de verrouillage push-pull. L'ISO et le TIA ont adopté une version duplex polarisée en standard et celle-ci est maintenant utilisée comme connecteur FDDI à faible coût. Le connecteur SC présente une perte spécifiée inférieure à 0,6 dB (généralement 0,3 dB) pour les fibres monomodes et multimodes et une perte de retour typique de 45 dB (Bailey & Wright, 2003).

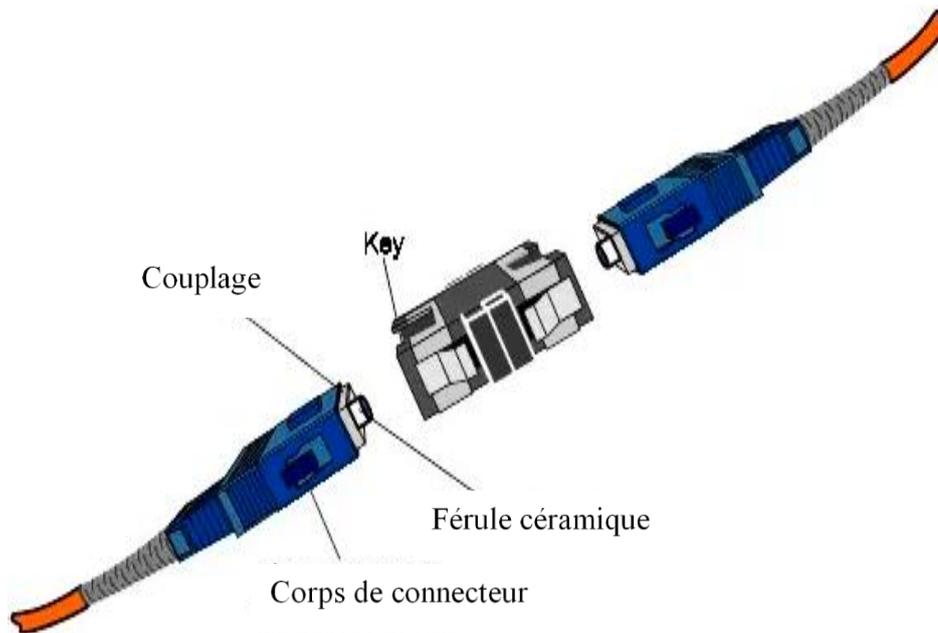


Figure I-7 : SC connecteur (Bailey & Wright, 2003).

I.9.2. Connecteur ST

Le connecteur ST est illustré à la figure I-8. Il s'agit d'une norme plus ancienne utilisée pour les communications de données. Ceci est également construit avec une virole cylindrique en céramique, qui s'accouple avec un récipient d'accouplement. Le connecteur a une section transversale ronde et est fixé par torsion pour l'engager dans l'accouplement à baïonnette à ressort. Comme il dépend du ressort interne pour maintenir les viroles ensemble, le contact optique peut être perdu si une force supérieure à environ un kilogramme est appliquée au connecteur (Bailey & Wright, 2003).

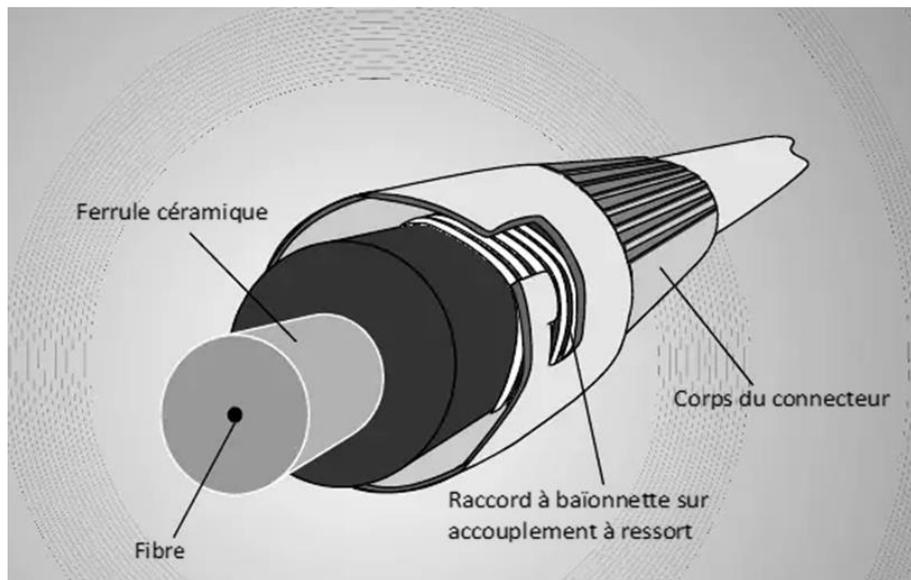


Figure I-8 : ST connecteur (Bailey & Wright, 2003).

I.9.3. Connecteur FDDI

Le système FDDI (Fiber Distributed Data Interface) a développé son propre connecteur duplex standard. C'est ce que montre la figure I.9. Le connecteur FDDI est moins fréquent dans l'industrie simplement parce que la norme FDDI est de moins en moins courante. Il est similaire aux connecteurs SC et ST utilisant une conception de virole en céramique cylindrique, qui s'accouple à un récipient de couplage. Il est à clé de sorte qu'il ne peut être installé qu'avec une polarité. Ceci est essentiel pour le système FDDI, qui utilise une paire de fibres unidirectionnelles, pour s'assurer que le branchement accidentel de la fibre de transmission dans le récepteur ne se produit pas. Les connecteurs SC duplex polarisés sont maintenant adoptés pour la norme FDDI à faible coût (Bailey & Wright, 2003).

I.9.4. Connecteur FC

C'est l'un des premiers types de connecteurs rarement utilisé aujourd'hui. Il est similaire au connecteur ST mais a une vis en baïonnette (Bailey & Wright, 2003).

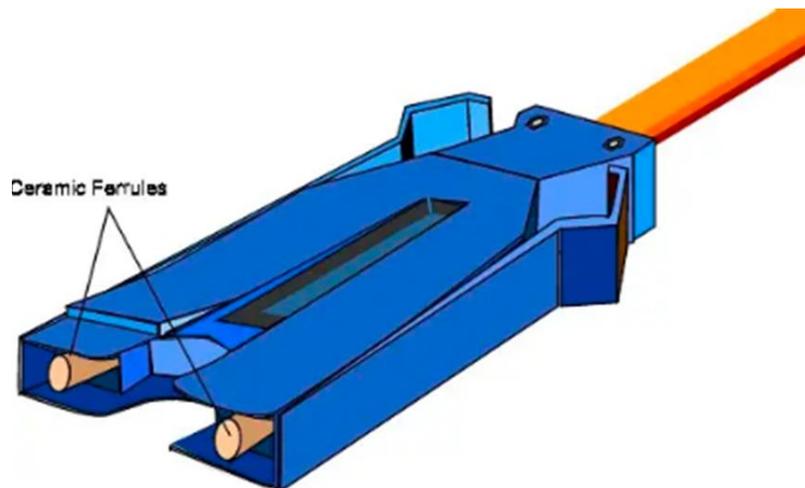


Figure I-9 : FDDI connecteur (Bailey & Wright, 2003).

I.10. Les applications de fibre optique

I.10.1. Télécommunication

La fibre optique est utilisée pour les communications à longue distance car elle permet de transmettre des données sur de longues distances sans perte de signal. Elle est également utilisée pour les communications à haute vitesse telles que la vidéoconférence et la téléphonie.

I.10.2. Internet haut débit

La fibre optique est utilisée pour fournir des connexions Internet à haut débit. Il offre des vitesses de téléchargement et de téléversement plus rapides que les autres technologies de connexion Internet.

I.10.3. Réseaux informatique

Les fibres optiques sont utilisées pour connecter des ordinateurs et d'autres périphériques réseau. Il permet des vitesses de transfert de données plus rapides que les autres technologies de connexion réseau.

I.10.4. Capteurs optique

Les fibres optiques sont utilisées dans les capteurs optiques tels que les capteurs de température et les capteurs de pression. Il permet une mesure précise et fiable des paramètres environnementaux.

I.11. Caractéristiques des fibres

I.11.1. La dispersion

Un facteur important qui limite les performances des liaisons optiques, en particulier à des débits de données plus élevés, est la dispersion. En général, la dispersion fait référence à l'élargissement des impulsions qui composent un signal lorsqu'il se déplace le long de la fibre. La figure I-10 illustre la propagation des impulsions due à la dispersion d'un octet représentatif de données lorsqu'il se déplace le long de la fibre (Azadeh, 2009).

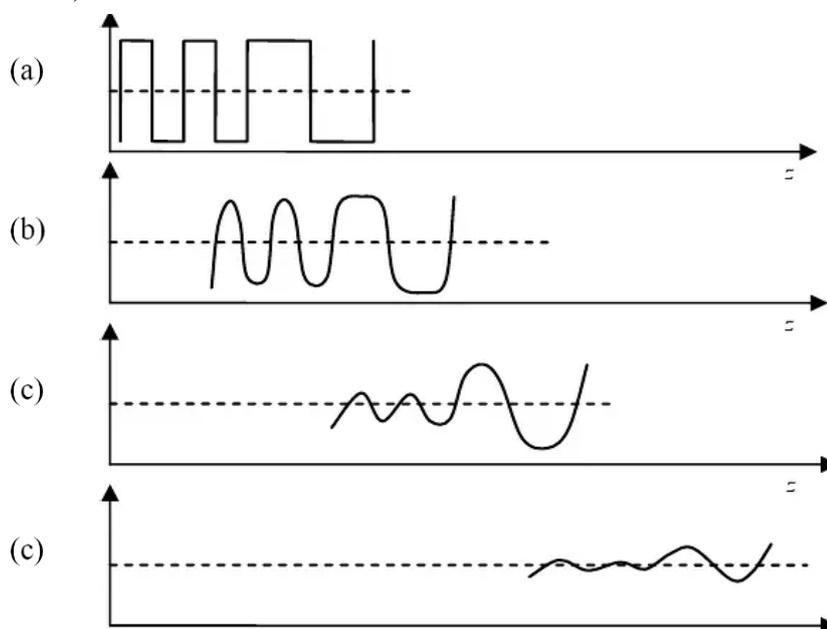


Figure I-10 : Dispersion des impulsions en fonction de la distance parcourue à l'intérieur de la fibre (Azadeh, 2009).

Supposons que l'octet est donné par la séquence 10101100 et que lorsqu'il est lancé dans la fibre, il a des arêtes vives séparant clairement les bits individuels. Notez que dans cet exemple, la première moitié de l'octet est composée d'une fréquence plus élevée, tandis que la seconde moitié est constituée de composantes à basse fréquence. Au fur et à mesure que cet octet de données voyage, les arêtes vives commencent à s'arrondir. Initialement, tous les bits individuels sont encore clairement distinguables, comme le montre la figure I-10 (b). Cependant, à mesure que l'impulsion se déplace plus loin, l'effet d'arrondi se poursuit et, à un moment donné, les quatre premiers bits, qui représentaient un taux de transition plus élevé, commencent à fusionner. Telle est la

situation de la figure I-10(c). Finalement, après une distance suffisante, les quatre derniers bits du paquet commencent également à fusionner, ce qui signifie que peu de temps après ce point, tous ces octets de données seront complètement perdus (Azadeh, 2009).

Cet exemple montre que la dispersion affecte les débits de données plus élevés plus séparément, car à des débits de données plus faibles, la largeur de chaque bit est plus large et il faut donc plus de distance avant que les bords ne s'effondrent complètement en raison de l'élargissement des impulsions. Par conséquent, le produit du débit de données et de la distance est généralement utilisé comme un chiffre de mérite pour caractériser la capacité d'information des fibres. Par exemple, une fibre d'une capacité de 100 Mbps.km peut supporter un débit de données de 100 Mbps sur une distance de 1 km , ou un débit de données de 1 Gbps sur une distance de 100 m , etc (Azadeh, 2009).

Les fibres multimodes ont généralement une capacité beaucoup plus faible par rapport aux fibres monomodes, car le mécanisme de dispersion dominant est différent dans une fibre monomode par rapport à une fibre multimode, comme discuté ci-dessous (Azadeh, 2009).

L'élargissement ou la dispersion des impulsions peut être dû à plusieurs mécanismes. Par conséquent, la dispersion peut être divisée en plusieurs catégories, dont les plus importantes sont la dispersion modale, chromatique, guide d'ondes et polarisation. Le premier mécanisme domine dans les fibres multimodes, tandis que les autres dominent dans les fibres monomodes (Azadeh, 2009).

I.11.1.1. Dispersion modale

Dans les fibres multimodes, la dispersion modale est la forme dominante de dispersion. Pour comprendre la racine de la dispersion modale, il est plus facile d'utiliser la théorie des rayons pour décrire la propagation de la lumière. Bien qu'un traitement rigoureux nécessite la théorie des ondes, la théorie des rayons fournit une description qualitative suffisante. Considérons figure I-11 qui représente une impulsion de lumière qui est lancée dans la fibre. L'impulsion commence comme plusieurs modes qui se chevauchent (Azadeh, 2009).

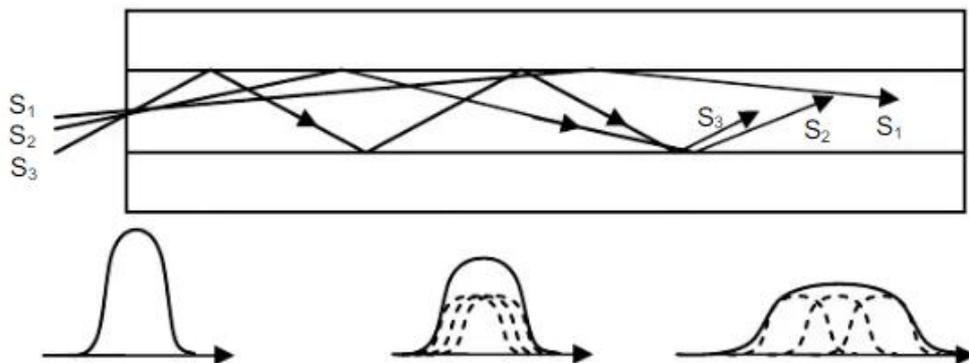


Figure I-11 : Dispersion modale dans une fibre multimode (Azadeh, 2009).

Pour garder la figure simple, seuls trois modes sont représentés qui sont représentés par trois rayons, $S_1 - S_3$. Au point de lancement, les trois modes qui composent l'impulsion sont alignés. Cependant, au fur et à mesure qu'ils se propagent le long de la fibre, le mode représenté par S_1 parcourt une distance plus courte par rapport aux autres modes et, par conséquent, devance les autres. D'autre part, le mode représenté par S_3 parcourt une distance plus longue par rapport aux autres, et est donc en retard sur les autres. Le résultat de cette différence dans les vitesses de propagation effectives est que l'impulsion d'origine se répand dans le temps, et si elle fait partie d'une séquence d'impulsions, elle fusionnera avec d'autres impulsions (Azadeh, 2009).

Les fibres à indice gradué (GRIN) peuvent réduire considérablement la détérioration du signal due à la dispersion modale. Dans une fibre GRIN, les rayons qui se propagent plus loin de l'axe de la fibre parcourent une plus longue distance dans un milieu avec un indice de réfraction plus faible, et donc voyagent plus rapidement. En conséquence, ils rattrapent ces rayons qui se propagent plus près du centre et se déplacent à une vitesse inférieure. Par conséquent, comme le montre la figure I-12, les rayons qui commencent à diverger au point de lancement sont recentrés périodiquement au fur et à mesure qu'ils se déplacent le long de la fibre (Azadeh, 2009).

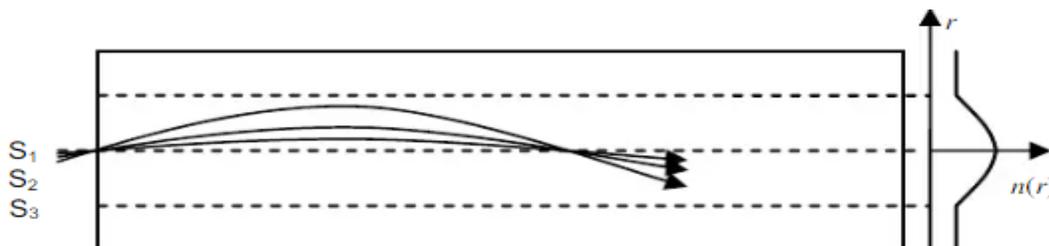


Figure I-12 : Trajectoire de différents modes dans une fibre à gradient d'indice (Azadeh, 2009).

Comme indiqué précédemment, la dispersion modale est la cause dominante de la distorsion du signal dans les fibres multimodes. Dans les fibres à indice progressif, la capacité d'information est limitée à environ 20 MHz.km . Les fibres GRIN ont une capacité beaucoup plus élevée, généralement dans la gamme de 2 GHz.km ou même plus. D'autre part, les fibres monomodes ne montrent pas de dispersion modale précisément parce qu'un seul mode transporte toute l'énergie optique (Azadeh, 2009).

I.11.1.2. Dispersion chromatique

Bien que dans la plupart des cas l'indice de réfraction du verre soit traité comme une constante, en réalité c'est une fonction faible de fréquence. Dans le même temps, les signaux optiques n'ont pas un spectre à bande infiniment étroite, c'est-à-dire que leur énergie est constituée d'une gamme de fréquences optiques. Par conséquent, diverses composantes de fréquence d'un signal optique connaissent un indice de réfraction légèrement différent lorsqu'elles traversent la fibre. La vitesse de propagation étant fonction de l'indice de réfraction, ces différents Les composants se déplacent à des vitesses différentes. Le résultat est qu'une impulsion donnée de lumière se propage au fur et à mesure que l'impulsion se propage, donnant lieu à ce que l'on appelle normalement une dispersion chromatique. Il convient de noter que la dispersion chromatique (également connue sous le nom de dispersion inter-modale) est différente de la dispersion modale discutée précédemment, car elle affecte les signaux au sein d'un seul mode. Ainsi, dans une fibre multimode, il existe à la fois une dispersion modale et chromatique, bien que la dispersion modale domine. D'autre part, une fibre monomode élimine la dispersion modale, mais montre toujours une dispersion chromatique. La dispersion chromatique est généralement caractérisée en termes de coefficient de dispersion, D , exprimé en unités de picoseconde par (nanomètre-kilomètre). Connaissant le coefficient de dispersion de la fibre, nous pouvons estimer l'étalement temporel d'une impulsion donnée comme suit (Azadeh, 2009):

$$\tau = DBL \quad (\text{I.1})$$

D : Coefficient de Dispersion.

B : La largeur de Bande.

L : La Longueur de la fibre.

I.11.1.3. Dispersion du guide d'ondes

Comme la dispersion chromatique, la dispersion du guide d'ondes résulte de la largeur spectrale non nulle d'une source optique. Cependant, contrairement à la dispersion chromatique qui résulte de la dépendance de la longueur d'onde de l'indice de réfraction du verre, la dispersion du guide d'ondes résulte du fait que dans une fibre monomode, une partie de l'énergie lumineuse se propage dans le revêtement. Parce que l'indice de réfraction dans le revêtement est légèrement inférieur à celle du noyau, la partie du signal qui se trouve dans le revêtement se déplace plus rapidement, provoquant la propagation de l'énergie dans une impulsion (Azadeh, 2009).

Bien que les effets de la dispersion du guide d'ondes soient généralement faibles, dans certains cas, ils deviennent importants. Par exemple, comme indiqué ci-dessus, dans les fibres compensatrices de dispersion, les effets de dispersion du guide d'ondes sont délibérément utilisés et leurs effets sont maximisés pour obtenir un coefficient de dispersion global opposé à celui des fibres standard (Azadeh, 2009).

I.11.1.4. Dispersion de polarisation

Une autre forme de dispersion résulte de l'élargissement des impulsions dû à la polarisation de l'impulsion optique et à la biréfringence des fibres. Pour être plus précis, une impulsion donnée peut être constituée de composants ou d'états de polarisation différents, et les fibres ne fournissent pas un indice de réfraction identique pour ces états de polarisation. Des facteurs tels que le stress, les courbures des fibres, les variations de composition ou de géométrie et la non-circularité de la fibre peuvent préférentiellement provoquer de légères modifications de l'indice effectif de réfraction de la fibre le long de différentes directions de polarisation. Lorsque différentes composantes de polarisation d'un signal optique subissent différents indices de réfraction, elles se propagent à des vitesses différentes, provoquant un élargissement et une dispersion des impulsions. Cet effet est connu sous le nom de dispersion en mode de polarisation (PMD) (Azadeh, 2009).

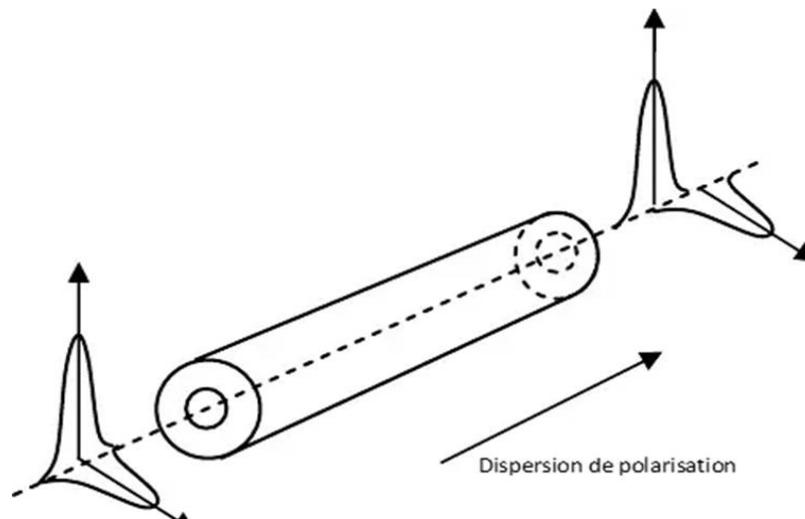


Figure I-13 : Dispersion en mode de polarisation (PMD) à la suite de la biréfringence des fibres (Azadeh, 2009).

La figure I-13 est une illustration de PMD. Nous pouvons penser à une impulsion lumineuse donnée composée de deux polarisations orthogonales. En raison de la biréfringence de la fibre, les deux modes se déplacent à des vitesses de groupe différentes, et donc ils commencent à se séparer lorsque l'impulsion se propage le long de la fibre. Le point important à propos de PMD est que, contrairement à d'autres phénomènes de dispersion, il est aléatoire et en général variable dans le temps. En effet, les causes environnementales de la biréfringence telles que les variations de température ou de stress sont généralement aléatoires. Cependant, il convient de noter que PMD (Azadeh, 2009).

I.11.2. L'atténuation

L'atténuation ou la perte de transmission des fibres optiques s'est avérée être l'un des facteurs les plus importants pour leur large acceptation dans les télécommunications. Comme l'atténuation du canal déterminait en grande partie la distance de transmission maximale avant la restauration du signal, les communications par fibre optique devenaient particulièrement attrayantes lorsque les pertes de transmission des fibres étaient réduites en dessous de celles des conducteurs métalliques concurrents (moins de 5 dB km^{-1}). L'atténuation du signal dans les fibres optiques, comme pour les conducteurs métalliques, est généralement exprimée dans l'unité logarithmique du

décibel. Le décibel utilisé pour comparer deux niveaux de puissance peut être défini pour une longueur d'onde optique particulière comme le rapport de la puissance optique d'entrée (transmise) P_i dans une fibre à la puissance optique de sortie (reçue) P_o de la fibre comme (Senior & Jamro, 2009):

$$\text{Nombre de décibels (dB)} = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad (\text{I.2})$$

Cette unité logarithmique présente l'avantage que les opérations de multiplication et de division se réduisent à l'addition et à la soustraction, tandis que les puissances et les racines se réduisent à la multiplication et à la division. Cependant, l'addition et la soustraction nécessitent une conversion en valeurs numériques qui peuvent être obtenues en utilisant la relation (Senior & Jamro, 2009) :

$$\frac{P_i}{P_o} = 10^{(10/dB)} \quad (\text{I.3})$$

Dans les communications par fibre optique, l'atténuation est généralement exprimée en décibels par unité de longueur (c'est-à-dire $dB \text{ km}^{-1}$) comme suit (Senior & Jamro, 2009) :

$$\alpha dB L = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad (\text{I.4})$$

Où αdB est l'atténuation du signal par unité de longueur en décibels et L est la longueur de la fibre (Senior & Jamro, 2009).

I.12. Transmission des rayons

I.12.1. Réflexion interne totale

Pour considérer la propagation de la lumière dans une fibre optique en utilisant le modèle de la théorie des rayons, il est nécessaire de prendre en compte l'indice de réfraction du milieu diélectrique. L'indice réfraction d'un milieu est défini comme le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le

milieu. Un rayon de lumière se déplace plus lentement dans un milieu optiquement dense que dans un milieu moins dense, et l'indice de réfraction donne une mesure de cet effet. Lorsqu'un rayon est incident à l'interface entre deux diélectriques d'indices réfractaires différents (par exemple verre-air), une réfraction se produit, comme illustré à la figure I-14 (a). On peut observer que le rayon s'approchant de l'interface se propage dans un diélectrique d'indice de réfraction n_1 et est à un angle φ_1 par rapport à la normale à la surface de l'interface. Si le diélectrique de l'autre côté de l'interface a un indice de réfraction n_2 inférieur à n_1 , alors la fluorescence est telle que le trajet du rayon dans ce milieu d'indice inférieur est à un angle φ_2 par rapport à la normale, où φ_2 est supérieur à φ_1 . Les angles d'incidence φ_1 et de réfraction φ_2 sont liés les uns aux autres et aux indices de réfraction des diélectriques par la loi de réfraction de Snell, qui stipule que (Senior & Jamro, 2009) :

$$n_1 \sin\varphi_1 = n_2 \sin\varphi_2 \quad (I.5)$$

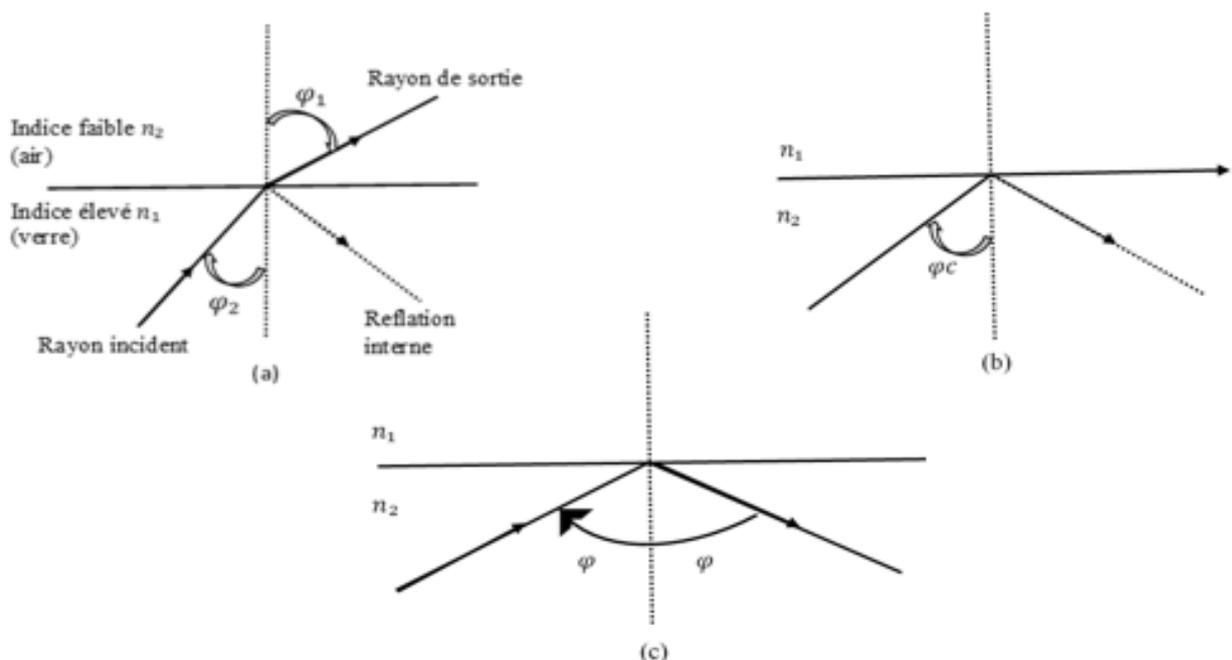


Figure I-14 : Rayons lumineux incidents sur une interface à indice de réfraction élevé à faible (verre-air) : (a) réfraction ;(b) le cas limite de réfraction montrant le rayon critique à un angle φ_c ; (c) Réflexion interne totale lorsque $\varphi > \varphi_c$.

Ou :
$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{I.6})$$

On peut également observer à la figure I-14(a) qu'une petite quantité de lumière est réfléchie dans le milieu diélectrique d'origine (réflexion interne partielle). Comme n_1 est supérieur à n_2 , l'angle de réfraction est toujours supérieur à l'angle d'incidence. Ainsi, lorsque l'angle de réfraction est de 90° et que le rayon réfracté émerge parallèlement à l'interface entre les diélectriques, l'angle d'incidence doit être inférieur à 90° . C'est le cas limite de réfraction et l'angle d'incidence est maintenant connu sous le nom d'angle critique φ_c cas illustré à la figure I-14 (b). D'après l'équation (I.6), la valeur de l'angle critique est donnée par (Senior & Jamro, 2009):

$$\sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{I.7})$$

À des angles d'incidence supérieurs à l'angle critique, la lumière est réfléchie dans le milieu diélectrique d'origine (réflexion interne totale) avec un rendement élevé (environ 99,9%). Par conséquent, on peut observer à la figure I-14 (c) que la réflexion interne totale se produit à l'interface entre deux diélectriques d'indices de réfraction différents lorsque la lumière est incidente sur le diélectrique d'indice inférieur du diélectrique d'indice supérieur, et que l'angle d'incidence

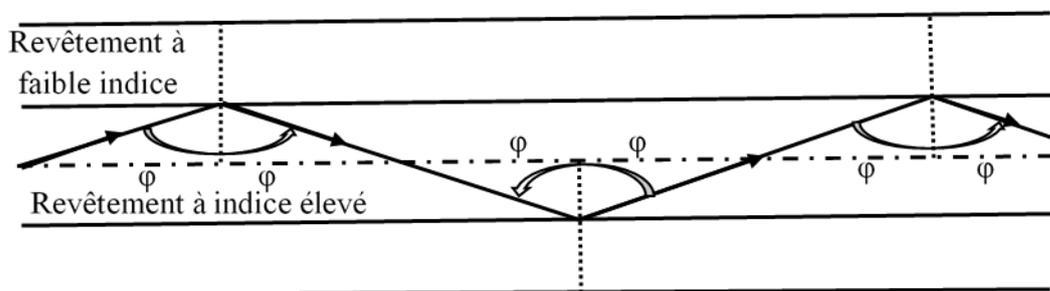


Figure I-15 : La transmission d'un rayon lumineux dans une fibre optique parfaite.

du rayon dépasse la valeur critique. C'est le mécanisme par lequel la lumière à un angle suffisamment faible (moins de $90^\circ - \varphi_c$) peut être considérée comme se propageant vers le bas d'une fibre optique à faible perte. La figure I-15 illustre la transmission d'un rayon lumineux dans une fibre optique via une série de réflexions internes totales à l'interface du cœur de silice et du revêtement de silice à indice de réfraction légèrement inférieur. Le rayon a un angle d'incidence φ à l'interface qui est supérieur à l'angle critique et est réfléchi au même angle par rapport à la normale. Le rayon lumineux représenté à la figure I-15 est connu comme un rayon méridional lorsqu'il traverse l'axe du cœur fibreux. Ce type de rayon est le plus simple à décrire et est généralement utilisé pour illustrer les propriétés fondamentales de transmission des fibres optiques. Il faut également noter que la transmission lumineuse illustrée à la figure I-15 suppose une fibre parfaite, et que toute discontinuité ou imperfection à l'interface cœur-gaine entraînerait probablement une réfraction plutôt qu'une réflexion interne totale, avec la perte subséquente du rayon lumineux dans la gaine (Senior & Jamro, 2009).

I.12.2. Angle d'acceptance

Après avoir considéré la propagation de la lumière dans une fibre optique par réflexion interne totale à l'interface cœur-gaine, il est utile d'élargir l'approche optique géométrique en référence aux rayons lumineux entrant dans la fibre. Étant donné que seuls les rayons avec un angle rasant suffisamment faible (c'est-à-dire avec un angle par rapport à la normale supérieur à φ_c) à l'interface cœur-gaine sont transmis par réflexion interne totale, il est clair que tous les rayons entrant dans le cœur de la fibre ne continueront pas à se propager sur sa longueur. La géométrie concernée par le lancement d'un rayon lumineux dans une fibre optique est illustré à la figure I-16, qui illustre un rayon méridional A à l'angle critique φ_c dans la fibre à l'interface cœur-gaine. On peut observer que ce rayon pénètre dans le cœur de la fibre à un angle θ_a par

rapport à l'axe de la fibre et est réfracté à l'interface cœur-gaine. On peut observer que ce rayon pénètre dans le cœur de la fibre à un angle θ_a par rapport à l'axe de la fibre et est réfracté à l'interface air-cœur avant d'être transmis à l'interface cœur-gaine à l'angle critique. Par conséquent, tous les rayons qui sont incidents dans le cœur de la fibre à un angle supérieur à θ_a sera transmis à l'interface cœur -gainage à un angle inférieur à φ_c , et ne sera pas totalement réfléchi en interne. Cette situation est également illustrée à la figure I-16, où le rayon incident B à un angle supérieur à θ_a est réfracté dans le revêtement et finalement perdu par rayonnement. Ainsi, pour que les rayons soient transmis par réflexion interne totale à l'intérieur du cœur de la fibre, ils doivent être incidents sur le cœur de la fibre dans un cône d'acceptabilité défini par le demi-angle conique θ_a . Par conséquent, θ_a est l'angle maximal par rapport à l'axe où la lumière peut pénétrer dans la fibre pour se propager, et est souvent appelé angle d'acceptation* pour la fibre (Senior & Jamro, 2009).

* θ_a est parfois appelé angle d'acceptation maximal ou total.

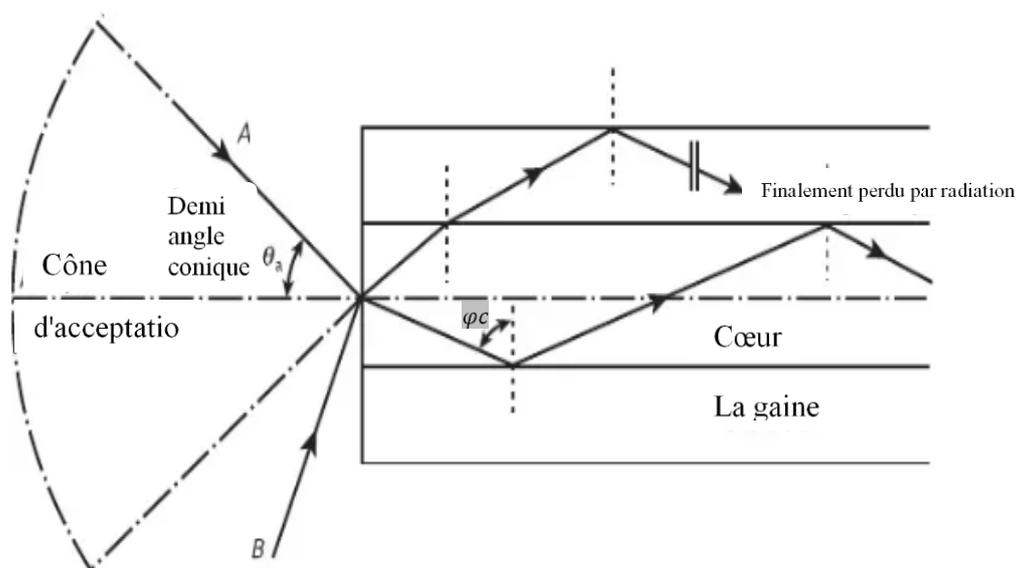


Figure I-16 : Angle d'acceptation θ_a lors du lancement de la lumière dans une fibre optique (Senior & Jamro, 2009).

Si la fibre a une section transversale régulière (c'est-à-dire que les interfaces cœur-gaine sont parallèles et qu'il n'y a pas de discontinuités), un rayon méridional incident supérieur à l'angle critique continuera d'être réfléchi et sera transmis à travers la fibre.

D'après les considérations de symétrie, on peut noter que l'angle de sortie par rapport à l'axe sera égal à l'angle d'entrée du rayon, en supposant que le rayon émerge dans un milieu du même indice de réfraction à partir duquel il a été entré (Senior & Jamro, 2009).

I.12.3. Ouverture numérique

L'angle d'acceptance d'une fibre optique a été défini dans la section précédente. Cependant, il est possible de poursuivre l'analyse de la théorie des rayons pour obtenir une relation entre l'angle d'acceptation et les indices de réfraction des trois milieux impliqués, à savoir le noyau, le gainage et l'air. Cela conduit à la définition d'un terme plus généralement utilisé, la perpétration numérique de la fibre. Il faut noter que dans cette analyse, comme pour la discussion précédente de l'angle d'acceptation, nous nous intéressons aux rayons méridiens à l'intérieur de la fibre. La figure I-17 montre un rayon lumineux incident sur le cœur de la fibre à un angle θ_1 par rapport à l'axe de la fibre qui est inférieur à l'angle d'acceptation de la fibre θ_a . Le rayon pénètre dans la fibre à partir d'un

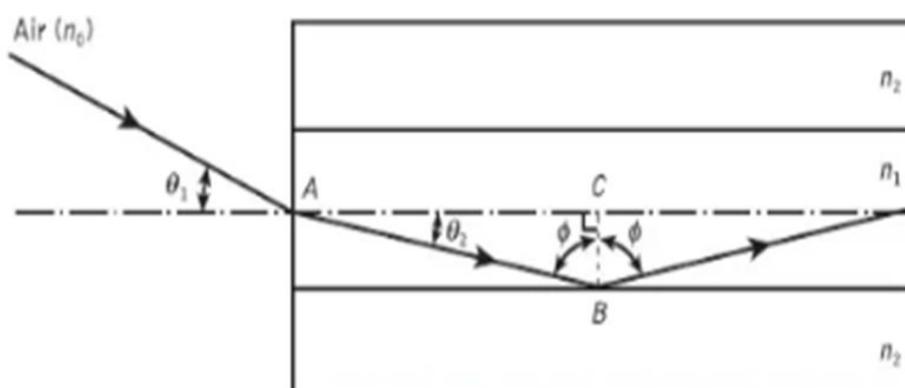


Figure I-17 : Trajet du rayon d'un rayon méridional lancé dans une fibre optique dans l'air à un angle d'entrée inférieur à l'angle d'acceptation de la fibre (Senior & Jamro, 2009).

milieu (air) d'indice de réfraction n_0 , et le cœur de fibre a un indice de réfraction n_1 , qui est légèrement supérieur à l'indice de réfraction de la gaine n_2 . En supposant que la face d'entrée au cœur de la fibre soit normale à l'axe, on considère alors la réfraction à l'interface air-cœur et en utilisant la loi de Snell donnée par Eq. (I.6) (Senior & Jamro, 2009) :

$$n_0 \sin \varphi_1 = n_1 \sin \varphi_2 \quad (\text{I.8})$$

Si l'on considère le triangle rectangle ABC indiquée à la figure I-17, alors (Senior & Jamro, 2009) :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi_2 \quad (\text{I.9})$$

Où φ est supérieur à l'angle critique à l'interface cœur-gaine. Ainsi, Eq. (I.8) devient (Senior & Jamro, 2009) :

$$n_0 \sin \varphi_1 = n_1 \cos \varphi \quad (\text{I.10})$$

En utilisant la relation trigonométrique $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$, Eq. (I.10) peut être écrit sous la forme (Senior & Jamro, 2009):

$$n_0 \sin \varphi_1 = n_1 (1 - \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.11})$$

Lorsque l'on considère le cas limite de la réflexion interne totale, φ devient égal à l'angle critique pour l'interface cœur-gainage et est donné par Eq. (I.7). De même, dans ce cas limitatif, θ_1 devient l'angle d'acceptation de la fibre θ_a . Combinaison de ces cas limitatifs en Eq. (I.11) donne (Senior & Jamro, 2009):

$$n_0 \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.12})$$

L'équation (I.12), outre qu'elle relie l'angle d'acceptation aux indices de réfraction, sert de base à la définition du paramètre important de la fibre optique, l'ouverture numérique (ON). Par conséquent, l'ON est définie comme suit (Senior & Jamro, 2009):

$$ON = n_0 \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.13})$$

Puisque le ON est souvent utilisé avec la fibre dans l'air où n_0 est l'unité, il est simplement égal à $\sin \theta_a$. On peut également noter que les rayons méridiens incidents sur la plage $0 \leq \theta_1 \leq \theta_a$ seront propagés dans la fibre (Senior & Jamro, 2009).

I.13. Le choix de la fréquence

I.13.1. Ondes électromagnétiques

Les ondes radio et la lumière sont des ondes électromagnétiques. La vitesse à laquelle ils alternent en polarité est appelée leur fréquence (f) et est mesurée en Hertz (Hz), où $1\text{Hz} = 1$ cycle par seconde. La célérité de la lumière (c) dans l'espace libre est d'environ $3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$. Le terme « ms^{-1} » signifie mètres par seconde. La distance parcourue au cours de chaque cycle, appelée longueur d'onde (λ), peut être calculée par la relation (Crisp & Elliott, 2005):

$$\text{longueur d'onde} = \frac{\text{la célérité de la lumière}}{\text{fréquence}}$$

Dans les symboles, c'est :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{I.14})$$

I.13.2. Spectre électromagnétique

Dans les premiers temps de la transmission radio, lorsque l'information transmise était principalement limitée au code Morse et à la parole, les basses fréquences (ondes longues) étaient utilisées. La gamme de fréquences pouvant être transmises, appelée

largeur de bande, était très faible. Cela nous limitait inévitablement à la transmission de données à faible vitesse et à une transmission de mauvaise qualité figure I-18 (Crisp & Elliott, 2005).

Dans la fibre optique, nous trouvons plus pratique d'utiliser la longueur d'onde de la lumière au lieu de la fréquence (Crisp & Elliott, 2005).

La conversion est la suivante :

$$\text{longueur d'onde} = \frac{\text{Vitesse de la lumière dans l'espace libre}}{\text{fréquence}}$$

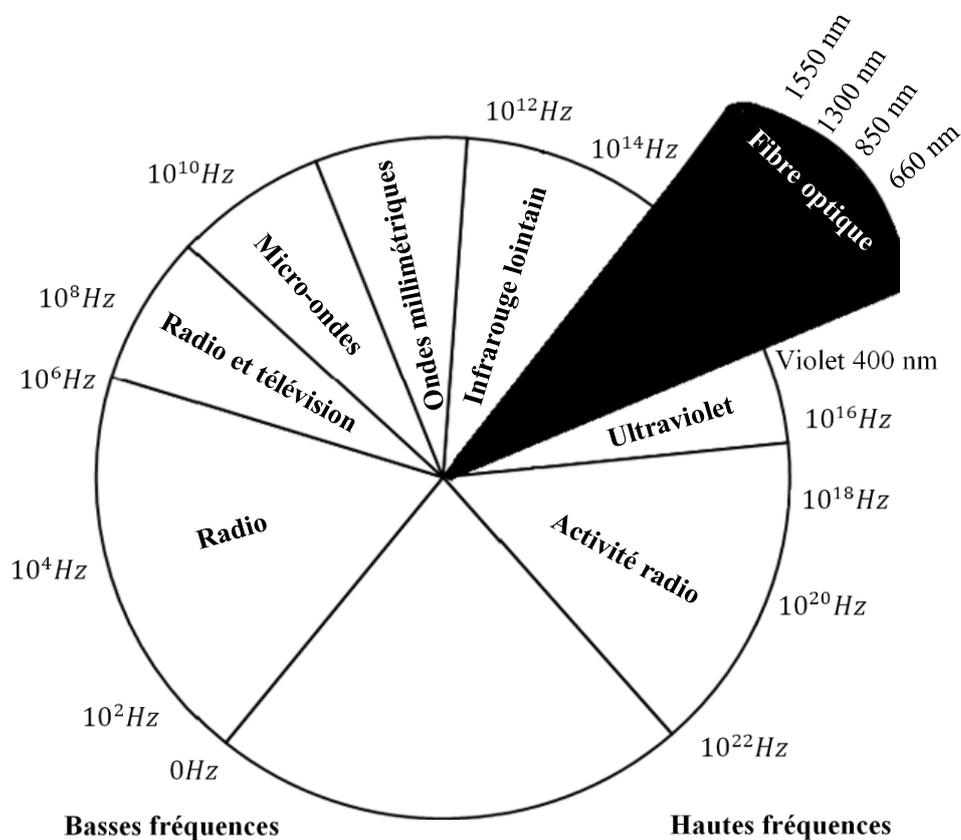


Figure I-18 : La fibre optique utilise la lumière visible et infrarouge.

Au fil du temps, nous avons eu besoin d'une bande passante plus large pour envoyer des informations plus complexes et améliorer la vitesse de transmission. Pour ce faire, nous

avons dû augmenter la fréquence du signal radio utilisé. La bande passante utilisable est limitée par la fréquence utilisée – plus la fréquence est élevée, plus la bande passante disponible est importante. Lorsque la télévision a été développée, nous avons à nouveau besoin d'une bande passante plus large et nous avons réagi de la même manière – en augmentant la fréquence. Et soit continué (Crisp & Elliott, 2005).

Besoin de plus de bande passante ? Utilisez une fréquence plus élevée. Pendant environ soixante ans, c'est devenu une réponse établie – nous avons trouvé la réponse ! Jusqu'à ce que la fibre optique fasse exploser tout cela. Les premières expériences ont montré que la transmission de la lumière visible était possible et nous avons exploré le spectre visible pour trouver la meilleure fréquence lumineuse à utiliser (Crisp & Elliott, 2005). La promesse de la fibre optique était la possibilité d'augmenter les taux de transmission. L'ancienne solution indiquait l'utilisation de la fréquence la plus élevée mais ici nous métra vrai problème. Nous avons constaté que les pertes de transmission augmentaient très rapidement. En fait, les pertes ont augmenté par la quatrième puissance. Cela signifie que si la fréquence lumineuse doublait, les pertes augmenteraient d'un facteur de 2^4 ou 16 fois. Nous avons rapidement compris qu'il ne valait pas la peine de rechercher des fréquences de plus en plus élevées afin d'obtenir des bandes passantes plus élevées si cela signifiait que nous ne pouvions transmettre les données que sur de très courtes distances (Crisp & Elliott, 2005).

La largeur de bande d'un système léger était si élevée qu'une fréquence relativement faible pouvait être tolérée afin d'obtenir des pertes plus faibles et donc une plus grande portée de transmission. Nous avons donc exploré la fréquence inférieure ou l'extrémité rouge du spectre visible, puis encore plus bas dans l'infrarouge. Et c'est là où nous en sommes à l'heure actuelle (Crisp & Elliott, 2005).

La lumière infrarouge couvre une gamme assez large de longueurs d'onde et est généralement utilisée pour toutes les communications par fibre optique. La lumière visible est normalement utilisée pour la transmission à très courte portée utilisant une fibre plastique ou peut-être pour les tests de défaut où une fuite de lumière visible peut être une aide au diagnostic (Crisp & Elliott, 2005).

I.13.3. Les fenêtres

Ayant décidé d'utiliser la lumière infrarouge pour (presque) toutes les communications, nous ne sommes toujours pas laissés avec une main entièrement libre. Nous avons besoin de sources lumineuses pour les systèmes de communication et certaines longueurs d'onde sont plus faciles et moins coûteuses à fabriquer que d'autres. Il en va de même pour les photodétecteurs situés à l'extrémité réceptrice du système. Certaines longueurs d'onde ne sont pas souhaitables : $1380nm$ par exemple. Les pertes à cette longueur d'onde sont très élevées en raison de l'eau dans le verre. C'est une vraie surprise de constater que le verre n'est pas totalement étanche. L'eau sous forme d'ions hydroxyle est absorbée dans la structure moléculaire et absorbe de l'énergie avec une longueur d'onde de $1380nm$. Lors de la fabrication, il est donc très important de garder le verre aussi sec que possible avec une teneur en eau aussi faible que 1 partie sur 10^9 . Il est commercialement logique de se mettre d'accord sur des longueurs d'onde standard pour garantir la compatibilité des équipements de différents fabricants. Ces longueurs d'onde standard ont appelé fenêtres et nous optimisons les performances des fibres et des sources lumineuses afin qu'elles fonctionnent au mieux dans l'une de ces fenêtres (Crisp & Elliott, 2005).

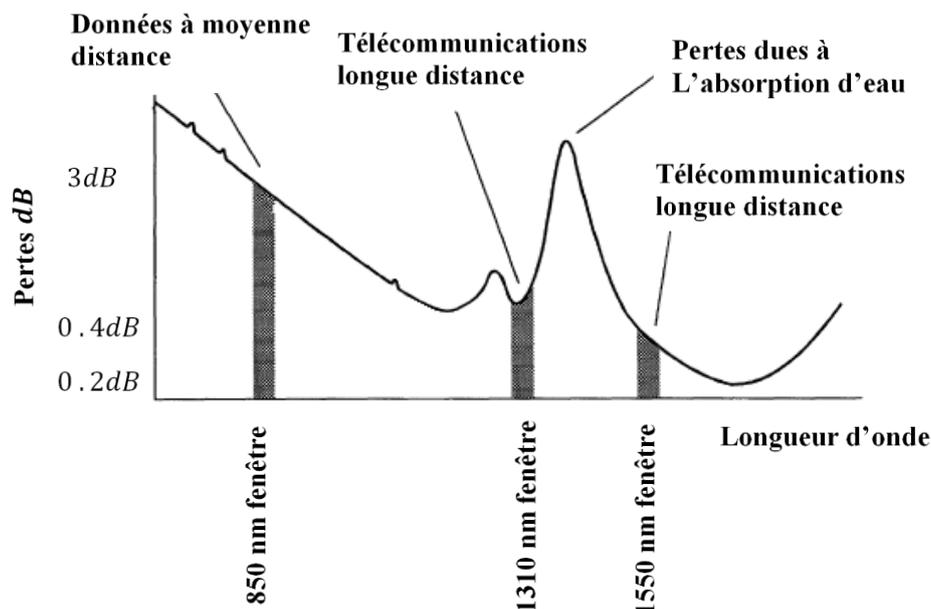


Figure I-19 : Les fenêtres infrarouges utilisées en fibre optique (*Crisp & Elliott, 2005*).

Les fenêtres de 1300 nm et 1550 nm ont des pertes beaucoup plus faibles et sont utilisées pour les communications longues distance, bien que nous ayons commencé à voir leur introduction dans les réseaux locaux et les réseaux de campus en raison de la bande passante plus élevée disponible lors de l'utilisation de lasers (plutôt que de LED) à ces longueurs d'onde plus longues. La fenêtre de longueur d'onde plus courte centrée autour de 850 nm a des pertes plus élevées et est utilisée pour les transmissions de données à plus courte portée et les réseaux locaux (LAN), peut-être jusqu'à 10 km environ. La fenêtre de 850 nm reste utilisée car le système est moins coûteux et plus facile à installer (*Crisp & Elliott, 2005*).

I.14. Les avantages et les inconvénients de la fibre optique

I.14.1. Les avantages

Les avantages de la fibre optique peuvent être divisés en :

- Performances de transmission : atténuation extrêmement faible, bande passante extrêmement élevée, Possibilité de multiplexage (longueur d'onde) (Boutelli & Bentouati, 2021).

- Mise en œuvre : très faible encombrement, grande souplesse, faible poids (Boutelli & Bentouati, 2021).
- Sécurité électrique : isolation complète entre les bornes, utilisable dans l'environnement explosif ou sous haute pression (Boutelli & Bentouati, 2021).
- Sécurité électromagnétique : insensible aux interférences, ne produit aucune interférence, inviolable La quasi-totalité d'entre eux (Boutelli & Bentouati, 2021).
- Economique : Ces avantages font de la fibre optique un support économique par rapport aux autres technologies (Boutelli & Bentouati, 2021).

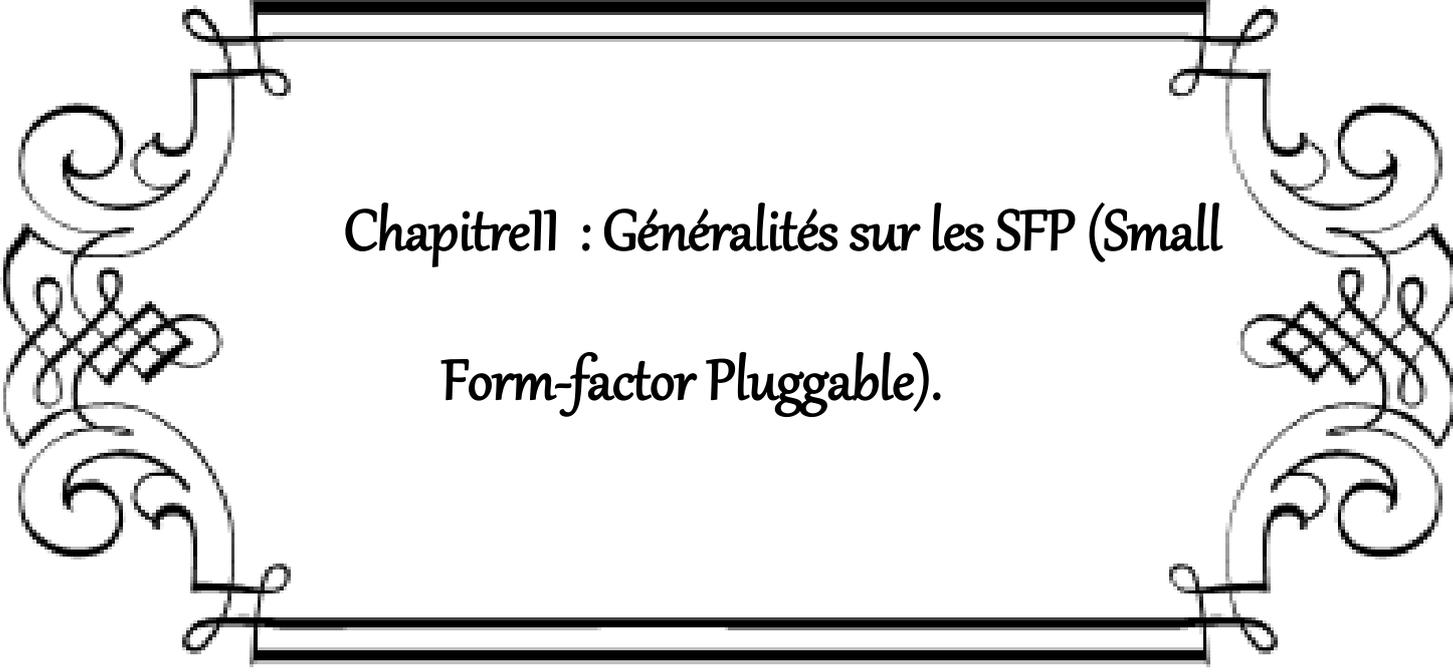
I.14.2. Les inconvénients

- Des pertes peuvent être causées par des courbures du câble, des connecteurs mal positionnés ou sales, des inhomogénéités dans le verre de la fibre (Boutelli & Bentouati, 2021).
- Difficultés d'adaptation avec les transducteurs optoélectroniques (Boutelli & Bentouati, 2021).
- Exigences micromécaniques importantes (connexions, alignement) (Boutelli & Bentouati, 2021).

I.15. Conclusion

Ce chapitre nous a initiés aux concepts fondamentaux des fibres optiques, qui sont des vecteurs de transmission de la lumière employés dans les réseaux de télécommunications et de données. Nous avons appréhendé que les fibres optiques sont constituées d'un cœur et d'une gaine, dont les indices de réfraction assurent le confinement de la lumière par réflexion totale interne. Nous avons aussi élucidé les divers modes de propagation de la lumière dans les fibres optiques, selon le diamètre du cœur et la longueur d'onde du signal. Nous avons différencié les fibres monomodes, qui ne véhiculent qu'un seul mode, des fibres multimodes, qui en véhiculent plusieurs. Nous avons enfin exposé les caractéristiques principales des fibres optiques, comme l'atténuation, la dispersion, la bande passante, ainsi que les différents types de fibres optiques existants selon leur structure, leur matériau ou leur application. Dans le

chapitre suivant, nous nous pencherons sur les modules SFP (Small Form-factor Pluggable), qui sont des émetteurs-récepteurs compacts et interchangeables qui se branchent aux ports des équipements réseau et qui transforment les signaux électriques en signaux optiques et inversement. Nous examinerons quels sont les avantages et les inconvénients des modules SFP par rapport aux interfaces fixes, ainsi que les différents standards et normes qui encadrent leur fonctionnement.



*Chapitre 1 : Généralités sur les SFP (Small
Form-factor Pluggable).*

II.1. Introduction

Dans le domaine des réseaux de télécommunication et de communication de données, il est souvent nécessaire de connecter des équipements entre eux à l'aide de différents types de supports, tels que des câbles à fibre optique ou des câbles en cuivre. Pour cela, il existe des modules émetteurs-récepteurs qui convertissent les signaux électriques en signaux optiques, ou inversement, selon le support utilisé. Ces modules doivent être compatibles avec les standards de communication et les interfaces des équipements. Parmi les formats de modules les plus utilisés, on trouve le Small Form-factor Pluggable (SFP) dont l'architecture interne est présentée en figure II-1. C'est un module compact et insérable à chaud, c'est-à-dire qu'il peut être branché ou débranché sans éteindre l'équipement. Le SFP est un format populaire dans l'industrie, qui a remplacé le Gigabit Interface Converter (GBIC) plus volumineux dans la plupart des applications. Le SFP peut supporter des vitesses allant jusqu'à 4 Gbit/s et des distances allant jusqu'à 120 km selon le type de transceiver choisi. Il existe également des versions améliorées du SFP, comme le SFP+ et le SFP28, qui peuvent supporter des vitesses allant jusqu'à 25 Gbit/s. Le SFP offre une grande flexibilité et une faible consommation d'énergie pour les applications de réseau.

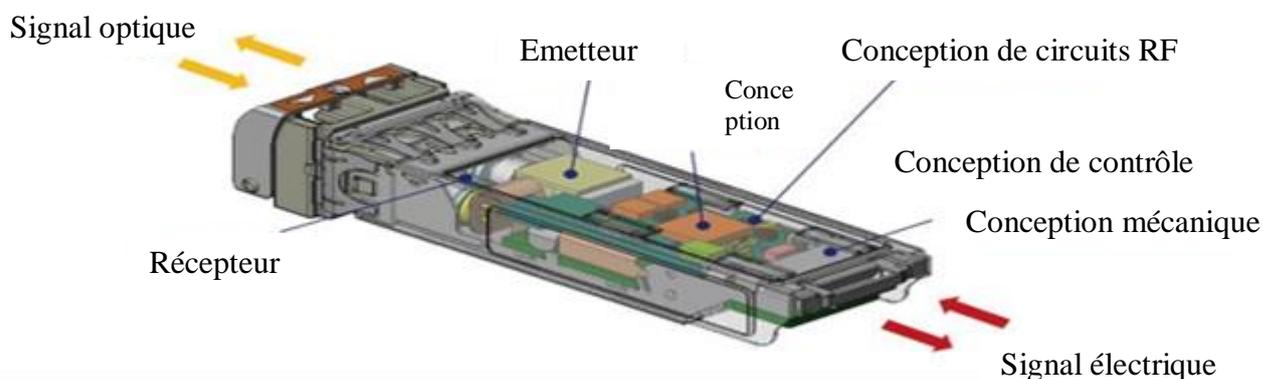


Figure II-1 : composition interne de SFP (*Alibaba.com, s.d.*)

II.2. Types de modules SFP

II.2.1. Modules SFP pour fibres multimodes

Les modules SFP pour fibres multimodes sont des émetteurs-récepteurs optiques qui

utilisent une longueur d'onde de 850 nm et prennent en charge des débits de données allant jusqu'à 1 Gbps ou 10 Gbps. Ils peuvent fonctionner sur des câbles à fibres optiques multimodes avec connecteurs LC et atteindre des distances allant jusqu'à 550 m. Ils sont compatibles avec la norme IEEE 802.3z 1000BASE-SX et peuvent prendre en charge jusqu'à 1 km sur un câble fibre multimode optimisé pour le laser de 50 μm . Ils conviennent aux applications à courte distance telles que les réseaux de campus, les centres de données et les réseaux métropolitains. Quelques exemples sont Cisco SFP-1G-SX1 (Cisco, 2023), Cisco SFP-10G-SR2 (Cisco, Cisco SFP Modules for Gigabit Ethernet Applications Data Sheet (PDF), 2023) et Cisco SFP-10G-SR-S2 (Cisco, Cisco SFP Modules for Gigabit Ethernet Applications Data Sheet (PDF), 2023).



Figure II-2 : SFP pour fibres multimodes (*D-Link, s.d*).

II.2.2. Modules SFP pour fibres monomodes

Les modules SFP pour fibres monomodes sont des émetteurs-récepteurs optiques qui utilisent une longueur d'onde de 1310 nm ou 1550 nm et prennent en charge des débits de données allant jusqu'à 1 Gbps ou 10 Gbps. Ils peuvent fonctionner sur des câbles à fibre optique monomodes avec connecteurs LC et atteindre des distances allant jusqu'à 10 km, 40 km ou 70 km selon le type de module. Ils sont compatibles avec la norme IEEE 802.3z 1000BASE-LX et peuvent fonctionner sur toutes les fibres multimodes jusqu'à 550 m lorsqu'ils sont couplés via un câble de raccordement de conditionnement de mode. Ils conviennent aux applications longue distance telles que les réseaux interurbains, les réseaux longue distance et les réseaux sous-marins. Quelques exemples sont Cisco SFP-1G-LX1 (Cisco, 2023), Cisco SFP-10G-LR2 (Cisco, Cisco SFP Modules for Gigabit Ethernet Applications Data Sheet (PDF), 2023) et Cisco SFP-10G-ZR2 (Cisco, Cisco SFP Modules for Gigabit Ethernet Applications Data Sheet (PDF), 2023).



Figure II-3 : SFP pour fibres monomodes.

II.2.3. Modules SFP bidirectionnels

Les modules SFP bidirectionnels sont des émetteurs-récepteurs optiques qui utilisent la technologie WDM (wavelength division multiplexing) pour transmettre et recevoir des données sur un seul brin de fibre en utilisant différentes longueurs d'onde. Ils prennent en charge des débits de données allant jusqu'à *1 Gbps* ou *10 Gbps* et peuvent fonctionner sur des câbles à fibre optique monomodes avec des connecteurs LC simplex. Ils peuvent atteindre des distances allant jusqu'à *10 km*, *20 km* ou *40 km* selon le type de module. Ils sont compatibles avec la norme IEEE 802.3ah 1000BASE-BX10 et peuvent économiser des ressources en fibre en utilisant une seule fibre au lieu de deux. Ils conviennent aux applications où la disponibilité de la fibre est limitée ou coûteuse, telles que les réseaux d'accès, la fibre optique jusqu'au domicile (FTTH) et les réseaux optiques passifs (PON). Quelques exemples sont Cisco SFP-1G-BX10-D1 (Cisco, 2023), Cisco SFP-1G-BX20-U1 (Cisco, 2023) et Cisco SFP-1G-BX40-D1 (Cisco, 2023).

II.2.4. Modules SFP CWDM et DWDM

Les modules SFP CWDM et DWDM sont des émetteurs-récepteurs optiques qui utilisent la technologie CWDM (multiplexage par répartition en longueur d'onde grossière) ou DWDM (multiplexage par répartition en longueur d'onde dense) pour multiplexer plusieurs signaux sur un seul brin de fibre en utilisant différentes longueurs d'onde. Ils prennent en charge des débits de données allant jusqu'à *1 Gbps* ou *10 Gbps* et peuvent fonctionner sur des câbles à fibre optique monomodes avec des connecteurs

LC. Ils peuvent atteindre des distances allant jusqu'à 80 *km* ou plus en fonction du type de module et du budget de liaison optique. Ils sont compatibles avec le réseau CWDM de l'UIT-T G.694.2 ou le réseau DWDM de l'UIT-T G.694.1 et peuvent augmenter la capacité de bande passante d'une seule fibre en transportant simultanément plusieurs canaux de données. Ils conviennent aux applications nécessitant une bande passante élevée, telles que les réseaux fédérateurs, les réseaux de stockage (SAN) et les systèmes de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM). Quelques exemples sont Cisco SFP-GE-Z1 (Cisco, 2023), Cisco SFP-10G-CWDM-S2 (Cisco, Cisco SFP Modules for Gigabit Ethernet Applications Data Sheet (PDF), 2023) et Cisco SFP-10G-DWDM-S2 (Cisco, Cisco SFP Modules for Gigabit Ethernet Applications Data Sheet (PDF), 2023).

II.3. SFP Simplex et SFP Duplex

SFP Simplex et SFP Duplex sont deux types d'émetteurs-récepteurs utilisés pour connecter des périphériques dans des réseaux Gigabit Ethernet. Ils diffèrent par le nombre de fibres qu'ils utilisent pour la transmission et la réception.

SFP Simplex, également connu sous le nom de SFP bidirectionnel (BiDi), n'utilise qu'une seule fibre pour la transmission et la réception. Il y parvient en utilisant deux longueurs d'onde différentes, une pour chaque direction, sur la même fibre. Par exemple, un SFP BiDi peut utiliser 1310 *nm* pour l'amont et 1550 *nm* pour l'aval, ou vice versa. Cela permet une utilisation plus efficace des ressources en fibre optique et réduit le coût du câblage.

SFP Duplex, d'autre part, utilise deux fibres pour la transmission et la réception, une pour chaque direction. Il utilise la même longueur d'onde sur les deux fibres, généralement 1310 *nm* ou 1550 *nm*. Cela permet une bande passante plus élevée et une distance de transmission plus longue que SFP Simplex. Cependant, cela nécessite également plus d'infrastructure de fibre optique et plus d'espace dans le panneau de brassage.

SFP Simplex et SFP Duplex sont disponibles dans différentes normes et spécifications, telles que 1000BASE-SX, 1000BASE-LX, 1000BASE-LX10, etc., en fonction du débit de données, de la longueur d'onde et de la distance qu'ils prennent en charge (Optace, 2019) (Community, s. d). Ils sont également compatibles avec différents types de câbles à fibre, tels que la fibre monomode (SMF) ou la fibre multimode (MMF).

Le choix entre SFP Simplex et SFP Duplex dépend des exigences du réseau, du budget et de la disponibilité des ressources fibre. D'une manière générale, SFP Simplex est plus adapté aux applications à courte distance et à faible bande passante, tandis que SFP Duplex est plus adapté aux applications longue distance et à large bande passante.



Figure II-4 : SFP duplex avec double port fibre et SFP simplex avec port fibre unique (*Alibaba.com, s.d*).

II.4. Applications des modules SFP

II.4.1. Transmission de données à grande vitesse

Les modules SFP peuvent atteindre des débits de données allant de 100 *Mbps* à 10 *Gbps* ou plus, ce qui les rend adaptés pour les réseaux à large bande et les centres de données (Cisco, Cisco 10GBASE SFP+ Modules Data Sheet, 2023) (Modules, 2023). Ils offrent une faible latence, une faible consommation d'énergie et une grande flexibilité dans le choix du type de fibre optique ou de câble en cuivre (Modules, 2023).

II.4.2. Caméras de sécurité

Les modules SFP peuvent fournir une connexion fiable et sécurisée entre les caméras et les enregistreurs vidéo en réseau, en utilisant la fibre optique ou le câble en cuivre selon la distance et le budget (Cisco, Cisco 10GBASE SFP+ Modules Data Sheet [PDF file], 2023). Ils permettent de transmettre des images de haute qualité avec une faible perte de signal et une résistance aux interférences (Cisco, Cisco 10GBASE SFP+ Modules Data Sheet [PDF file], 2023).

II.4.3. Réseaux de télécommunications

Les modules SFP peuvent être utilisés pour transmettre des signaux optiques sur de longues distances, en utilisant des technologies comme CWDM ou DWDM pour augmenter la capacité du réseau (Cisco, Cisco 10GBASE SFP+ Modules Data Sheet,

2023) (Modules, 2023). Ils permettent de réduire les coûts d'infrastructure et de maintenance en utilisant des fibres optiques existantes ou partagées (Modules, 2023).

II.4.4. Systèmes d'automatisation industrielle

Les modules SFP peuvent être utilisés pour connecter des capteurs, des actionneurs, des contrôleurs et des machines dans des environnements difficiles, en offrant une résistance aux interférences électromagnétiques et aux vibrations. Ils permettent de transmettre des données en temps réel avec une haute précision et une haute fiabilité.

II.5. Les avantages des modules SFP

- Ils sont connectables à chaud, ce qui signifie qu'ils peuvent être insérés ou retirés sans éteindre l'appareil ou perturber le réseau.
- Ils sont interchangeable, ce qui signifie qu'ils peuvent prendre en charge différents types de câbles et de protocoles en changeant uniquement le module, pas la carte d'interface entière.
- Ils sont flexibles, ce qui signifie qu'ils peuvent prendre en charge différentes distances de transmission et longueurs d'onde en choisissant différents types de modules SFP, tels que monomode, multimode, cuivre, CWDM, DWDM, etc.
- Ils sont compatibles, ce qui signifie qu'ils suivent un accord standard (MSA) qui assure l'interopérabilité entre les différents fournisseurs et appareils (Vincent, 2021) (VERSITRON, 2019).

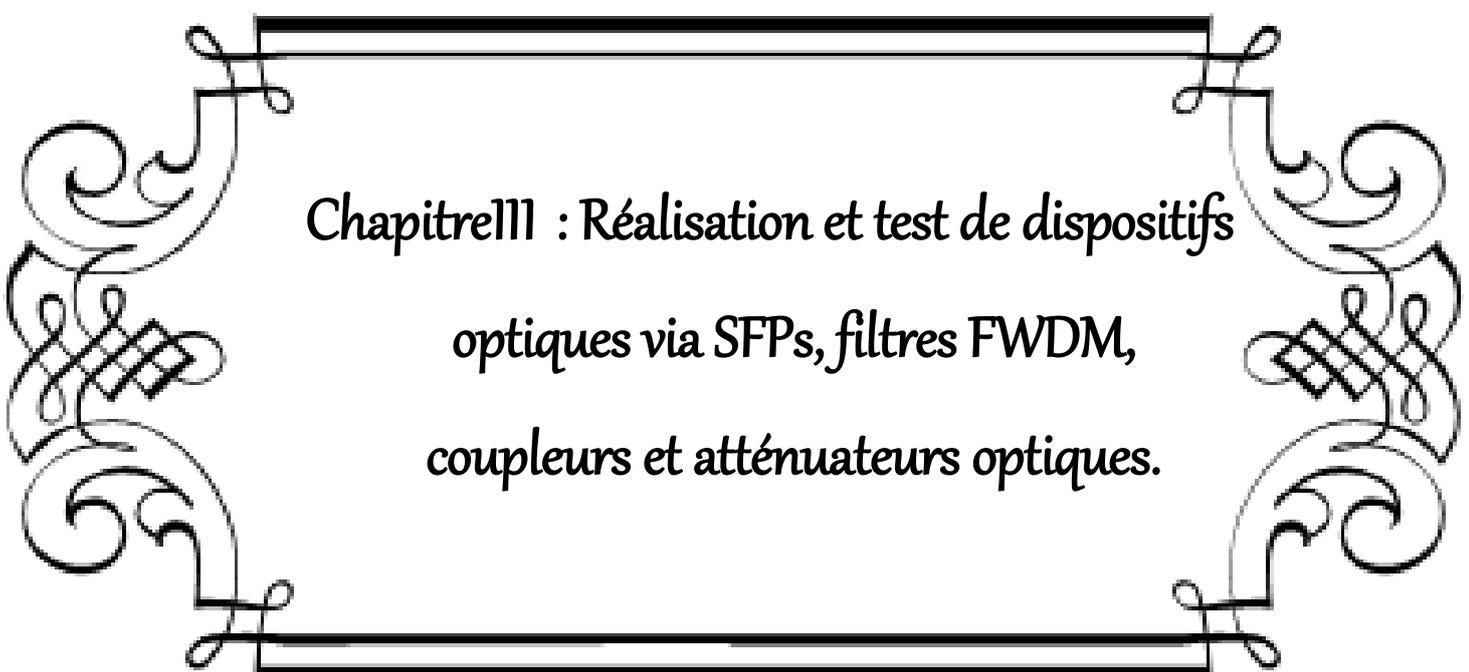
II.6. Les inconvénients des modules SFP

- Ils ont une vitesse de transmission limitée, ce qui signifie qu'ils ne peuvent prendre en charge que jusqu'à 1 *Gbps* ou 10 *Gbps* selon le type de module SFP. Pour des vitesses plus élevées, des versions plus récentes telles que SFP+ ou QSFP sont nécessaires.
- Ils ont une distance de transmission limitée, ce qui signifie qu'ils ne peuvent atteindre que 120 *km* selon le type de module SFP. Pour les distances plus longues, des amplificateurs ou des répéteurs peuvent être nécessaires.
- Ils ont une densité de ports limitée, ce qui signifie qu'ils ne peuvent tenir qu'un

- certain nombre de modules SFP sur une seule carte d'interface. Pour une densité de ports plus élevée, des versions plus petites telles que SFP28 ou QSFP28 sont nécessaires (Vincent, 2021) (VERSITRON, 2019).

II.7. Conclusion

Les modules SFP (Small Form-factor Pluggable) sont des périphériques d'interface réseau polyvalents et compacts qui peuvent prendre en charge diverses normes de communication et types de supports. Ils peuvent être échangés à chaud et mélangés port par port, offrant flexibilité et évolutivité pour la conception et l'exploitation du réseau. Les modules SFP peuvent fonctionner à différentes vitesses, allant de 100BASE à 1000BASE, et peuvent couvrir différentes distances, en fonction du câble fibre ou cuivre utilisé. Les modules SFP sont largement utilisés dans les applications de télécommunication et de communication de données, telles que les commutateurs, les routeurs et les réseaux optiques. Dans ce chapitre, nous avons discuté des types, des applications, de l'installation, de la maintenance et des conseils pour choisir le bon module SFP. Nous avons également souligné les avantages et les inconvénients des modules SFP. Nous espérons que ce chapitre vous a fourni des informations et des idées utiles sur les modules SFP et leur rôle dans la connectivité réseau.



*Chapitre III : Réalisation et test de dispositifs
optiques via SFPs, filtres FWDM,
coupleurs et atténuateurs optiques.*

III.1. Introduction

Ce chapitre expose les travaux pratiques effectués au laboratoire de télécommunications (LTEC). L'objectif de ces travaux de fin d'étude est de réaliser et tester une liaison bidirectionnelle (BIDI) à 1 *Gbit/s* avec des SFPs (Small Factor Form Pluggable), Ainsi, nous allons réaliser et analyser un multiplexeur optique 2x1 à l'aide de filtres FWDM (Filter Wavelength Division Multiplexing) , un modulateur/démodulateur ASK-2 (Amplitude Shift Keying) et un switch optoélectronique basés sur des atténuateurs optiques variables (VOA) et coupleurs de type PLC (Planar Lightwave Circuit)/FBT (Fused Biconical Taper).

En premier lieu, nous allons commencer par réaliser et tester une liaison à fibre avec des media converters BIDI, qui permettent de convertir les signaux électriques (câble RG-45) en signaux lumineux (sur fibre), et vice versa. Ensuite, nous allons étudier un filtre FWDM, qui est un composant optique qui sépare ou combine des longueurs d'onde spécifiques dans une fibre optique. Puis, nous allons réaliser un multiplexeur 2x1, qui est un dispositif qui combine deux signaux optiques en un seul signal. Ceci permet d'augmenter le débit et combiner plusieurs abonnés sur une seule ligne. Après, nous allons réaliser et tester un modulateur ASK-2 à base d'atténuateurs optiques variables (VOA). Ce modulateur est un dispositif qui modifie l'amplitude d'un signal optique en fonction d'un signal électrique binaire. Enfin, nous allons réaliser et tester un switch 1x2 à base d'atténuateurs optiques variables (VOA) et des coupleurs 1x2. Ce dispositif permet de router un signal optique vers deux sorties possibles, en fonction du signal électrique de données.

III.2. Définitions

Un convertisseur de média BIDI est un émetteur récepteur optique (SFP) qui transforme un signal électrique en un signal optique et inversement, en utilisant une fibre optique unique pour envoyer et recevoir des données dans les deux sens (Community, s. d).

Un FWDM (Filter Wavelength Division Multiplexing) est un dispositif optique qui sépare ou associe des signaux optiques de différentes longueurs d'onde.

Un multiplexeur 2x1 est un dispositif qui fusionne (combine) deux signaux optiques en un signal optique unique.

Un modulateur ASK-2 (Amplitude Shift Keying) est un dispositif qui module l'amplitude d'un signal optique selon un signal électrique binaire. Un switch 1X2 est un dispositif qui commute un signal optique entre deux sorties possibles.

Un atténuateur optique variable (VOA) est un dispositif qui ajuste le niveau de puissance d'un signal optique. Un coupleur 1X2 est un composant qui divise un signal optique en deux signaux optiques égaux ou inégaux.

III.3. Manipulation

III.3.1. Réalisation et Test d'une liaison à fibre avec des media Converters BIDI

En première partie de notre travail, nous avons réalisé et testé une liaison optique à 1Gbps sur une distance de 2 Km en utilisant des convertisseurs de données (media converter en Anglais, MC), qui contiennent deux SFPs bidirectionnelles (voir Figure III.1). Pour cette réalisation, nous avons utilisé une fibre optique de 2 Km, deux ordinateurs, deux convertisseurs de données, un filtre FWDM, un wattmètre optique (power meter en Anglais), des adaptateurs FC/PC (Ferrule Connector/ Physical Connector), SC/UPC (Subscriber Connector / Ultra Physical Contact), des atténuateurs 3dB, 5dB, 8dB, 15dB, 25dB et des logiciels de supervision de la liaison : Duktur6, Roadkils CommTest.



Figure III-1 : Media converter.

Les SFPs utilisées dans notre manipulation sont de type BIDI, elles utilisent une fibre monomode. Ces SFPs présentent un seul port optique de type SC/UPC. Les boîtes MCs qui protègent ces SFPs travaillent par paire, c'est-à-dire si un MC nommé "A" émet sur la longueur d'onde de 1310 nm et reçoit sur 1550 nm. L'autre MC nommé "B" fonctionne à l'inverse : il reçoit sur 1310 nm et émet sur 1550 nm. Ces MCs transforment un signal électrique de 10 Mbps/100 Mbps ou bien 1000 Mbps en un signal optique avec un débit de 100 Mbps ou bien 1000 Mbps et vice versa.

Pour identifier les MCs, c'est-à-dire savoir qui est le "A" (Tx 1310 /Rx 1550) et qui est le B (Tx1550/ Rx 1310), nous connectons un filtre FWDM au MC suivant le schéma de la figure III-2. Nous avons réalisé ce schéma pratiquement au laboratoire, il est montré sur la figure III-3. Un filtre FWDM est constitué d'un port COM, où tous les signaux sont multiplexés dans ce port y compris les longueurs d'onde 1310, 1490 et 1550 nm. Ce filtre présente en sortie deux ports ; le port PASS qui filtre la longueur d'onde 1550 nm et le port REF, qui sélectionne les longueurs d'onde 1310 et 1490 nm.

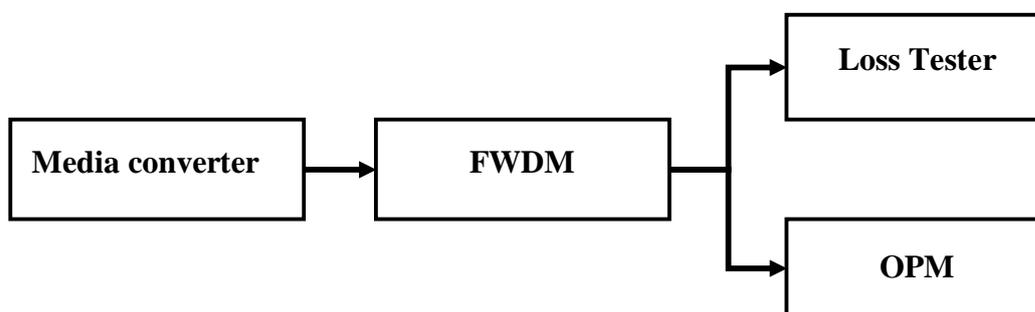


Figure III-2 : Méthode d'identification du media convertisseur.

Pour faire l'identification, on connecte le port du MC "A" au port COM du filtre et le port REF du filtre au premier wattmètre optique (OPM) et le port PASS au deuxième OPM. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux III-1, III-2, III-3 et III-4.

Tableau III-1 : Mesures obtenues sur le MC 'A', port FWDM REF.

<i>La longueur d'ondes λ(nm)</i>	<i>Les puissances dBm</i>
850	2,73
1625	-7,79
1550	-7,91
1310	-7,60
1490	-7,86

Tableau III-2 : Mesures obtenues sur le MC 'A', port FWDM PASS.

<i>La longueur d'ondes λ(nm)</i>	<i>Les puissances dBm</i>
850	-50,77
1625	-60,96
1550	0 (-50)
1310	0 (-50)
1490	0 (-50)

Tableau III-3 : Mesures obtenues sur le MC 'B', port FWDM PASS.

<i>La longueur d'ondes λ(nm)</i>	<i>Les puissances dBm</i>
850	-4,12
1625	-6,42
1550	-6,56
1310	-6,21
1490	-6,43
1300	-6,15

Tableau III-4 : Mesures obtenues sur le MC 'B', port FWDM REF.

<i>La longueur d'ondes λ(nm)</i>	<i>Les puissances dBm</i>
850	-10,99
1625	-24
1550	-24,42
1310	-22,70
1490	-23,42
1300	-21,22

La puissance la plus élevée indique la longueur d'onde d'émission du convertisseur

de média. Par exemple, le convertisseur de média de type B émet à 1550nm, car la puissance obtenue sur le port PASS (1550) du filtre FWDM égale à -6,56 dbm à cette longueur d'onde (voir Tableau III-3). Dans l'autre port REF (1310/1490) du filtre FWDM, les puissances reçues sont relativement faibles (de l'ordre de -23 dBm) (voir Tableau III.4), ce qui justifie que le MC "B" reçoit sur 1310 nm. On applique le même principe pour identifier le convertisseur de média de type A.

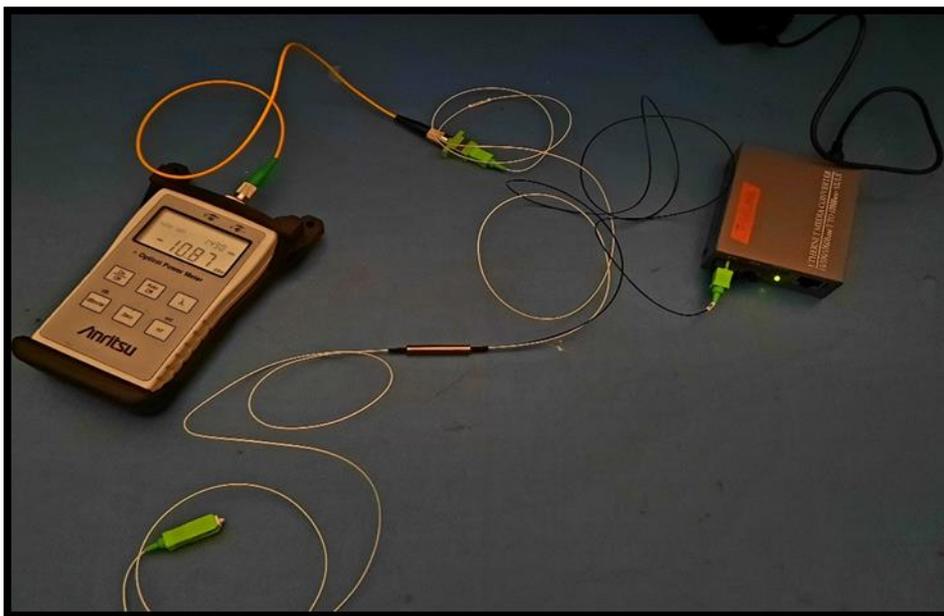


Figure III-3 : Identification pratique du media converter.

Une fois nous avons identifié les deux MCs, nous allons en deuxième partie de ce travail de réaliser une liaison optique de 2Km, en connectant les deux MCs A et B. Pour vérifier si la liaison optique est bonne, on vérifie le voyant FX. S'il est allumé ça veut dire que la liaison optique est bonne. S'il est éteint ça veut dire qu'il y a une coupure quelque part dans la liaison (voir figure III-4).

Pour avoir une liaison de deux kilomètres, nous avons connecté deux fibres de 1 Km entre elle avec un adaptateur SC/UPC. La liaison est bidirectionnelle. Chaque fibre est connectée au port TX d'un MC et au port RX de l'autre. Le voyant "FX" s'allume sur les deux MCs, ce qui signifie que la connexion optique est établie correctement.



Figure III-4 : Connexion de deux MCs et vérification des voyants.

Après, nous avons connecté les deux MCs aux ordinateurs portables via des câbles Rj45 et installer les deux logiciels : dukto-r6 et Roadkil's CommTest. Nous avons remarqué l'allumage du voyant TX, ce qui signifie que la liaison Ethernet entre les deux laptops est établie et bonne (voir figure (III-4)). Nous remarquons sur la figure III-4 que le voyant "1000" est éteint, ça veut dire que le débit du signal optique transmis sur la fibre égal à 100 Mbps. Si le voyant était allumé vert, nous concluons que le débit du signal lumineux avoisine les 1000 Mbps (1 Gbps).

Pour tester notre liaison, nous avons installé les deux logiciels dukto-r6 et Roadkil's CommTest pour faire des échanges de fichiers vidéos et vérifier le débit Ethernet entrant et sortant. Pour faire ce test, il faut tout d'abord entrer les adresses IP des deux laptops. Les adresses IP attribuées aux ordinateurs du réseau LAN sont les suivantes : Adresse IP du premier PC : 192.168.100.4, Adresse IP du deuxième PC : 192.168.100.6. Après, nous avons appuyé sur le bouton "Connecter" du logiciel Roadkil's CommTest.

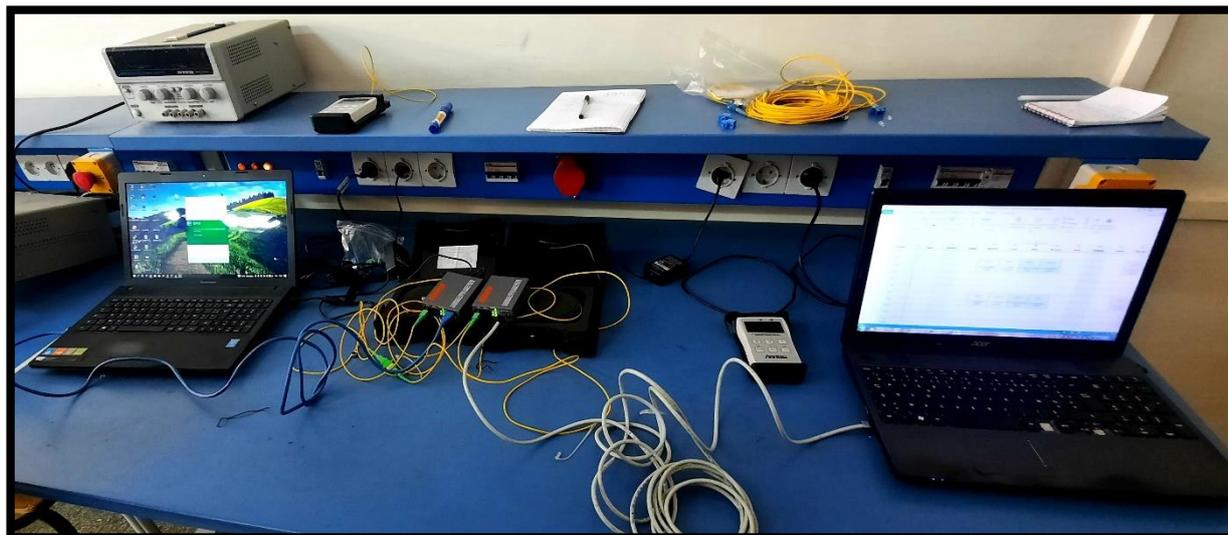


Figure III-5: Montage pratique complet de notre liaison optique de 2Km avec un débit de 100 Mbps.

La figure III-5 montre que le débit des données transmises coté Ethernet avoisine les 11 Mbps et le débit des données sur la fibre optique est de : 100Mbit/s.

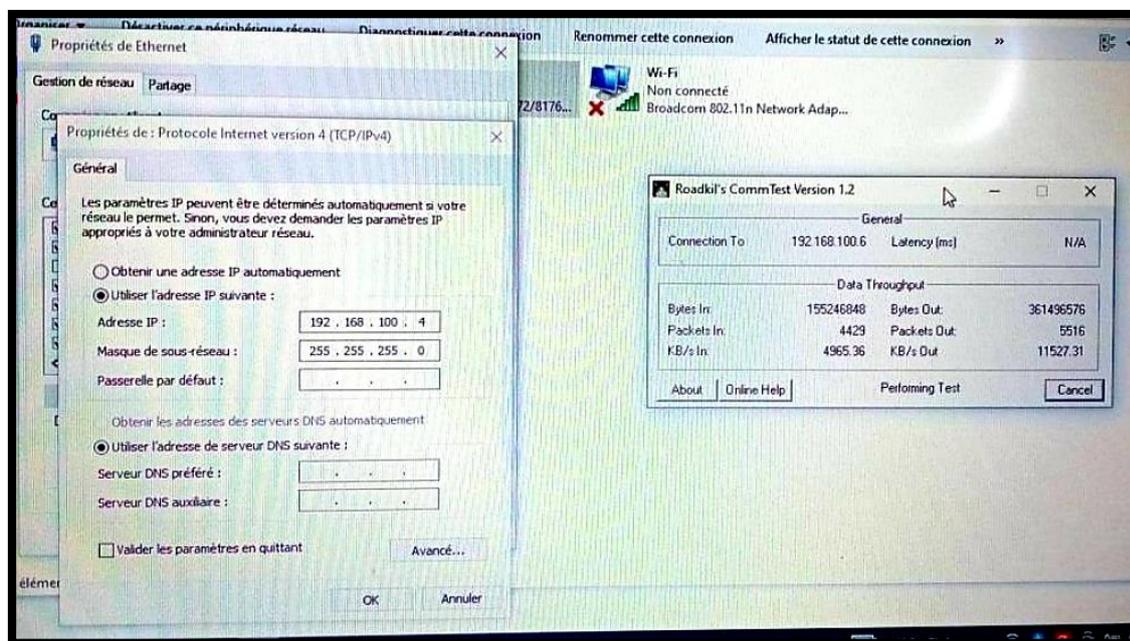


Figure III-6 : Résultat de test de liaison avec le logiciel Roadkil's CommTest.

Une fois nous avons vérifié les débits de transmission, après nous avons lancé le logiciel Dukto-R6 et échanger des fichiers volumineux au minimum d'un 1 Go entre

les deux laptops et nous avons vérifié le débit réel instantané côté Ethernet (voir figure III-7).

Le volume du fichier envoyé égal à $3575,3 \text{ Mbit}$. La durée de transmission calculée par un chronomètre est de : $5\text{min}24\text{s}$ soit $300 (5 \times 60) + 24 = 324 \text{ sec}$. Après un calcul théorique, nous avons confirmé le débit réel : $(3575,3) \text{ Mbit} / 325 \text{ s} = 11 \text{ Mbit/s}$.

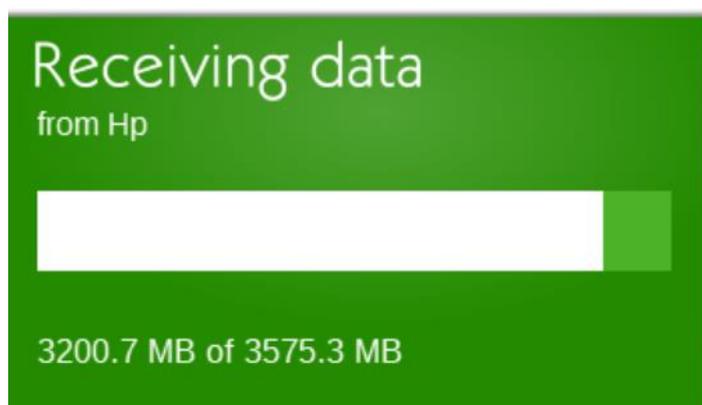
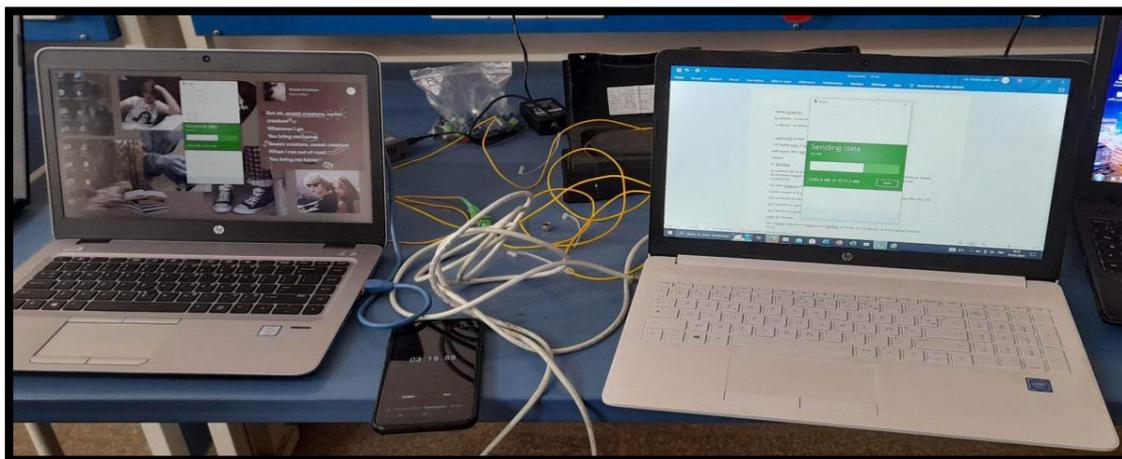


Figure III-7 : Echange de données vidéo entre les laptops avec Dukto-R6.

Dans la dernière partie de ce test de liaison, nous allons vérifier la portée maximale que peut atteindre les SFPs 1G utilisées dans ces MCs. Rappelons que le débit optique atteint sur 2km est 100 Mbps . Nous allons vérifier qu'elle est la distance maximale qu'on peut atteindre avec ce débit de 100 Mbps . Pour cela nous avons utilisé des atténuateurs optiques fixes $3\text{dB}/5\text{dB}/8\text{dB}/15\text{dB}$ et 25 dB . La figure III-8 montre un exemple d'atténuateur 25 dB avec connecteur FC/APC. La figure III-9 montre le montage complet réalisé. La méthode utilisée est que à chaque fois on insère un atténuateur et on vérifie le voyant FX du MC. Si le voyant est toujours allumé avec une couleur verte ça veut

dire que la SFP reçoit et émet les données normalement, sinon, la puissance reçue a dépassé le seuil de sensibilité du SFP. Nous avons inséré en premier lieu un atténuateur de 3 dB ce qui correspond à une fibre de 12 Km. Pour calculer la perte totale de la liaison, on doit ajouter la perte linéique de 0.25 dB des deux fibres utilisées de 1 Km chacune. A chaque fois, nous avons ajouté un atténuateur optique fixe et nous avons vérifié le voyant vert jusqu'à ce qu'il s'est éteint au-delà de 46 Km. D'après les résultats obtenus illustrés en Tableau III-5, nous pouvons conclure que ces deux MC peuvent échanger les données sur 45 Km, avec un débit de transmission optique de 100 Mbps. Nous avons utilisé ces relations pour déterminer la distance maximale permise.

$$L_{max} = (Att/\alpha) + \alpha \times 2 \quad (III.1)$$

Avec Att la valeur de l'atténuateur optique fixe, $\alpha = 0.25\text{dB}/\text{km}$ (par 1km on perd 0.25dB), le coefficient d'atténuation.

Tableau III-5 : Mesures obtenues avec les différents atténuateurs optiques fixes.

Atténuateurs optiques	L_{max}	Fx et Tx	la qualité d'une liaison en fonction du débit.
3dB	$3\text{dB}/(0.25\text{dB}/\text{Km})$ $= 12\text{Km}$ L_{max} $= (12\text{Km}) + 2\text{Km}$ $= 14\text{km}$	FX : ON veut dire : 100 Mbit/s (sur fibre optique) TX : ON d'après le logiciel : 10Mbit/s (Ethernet sur paires torsadées)	D = 100 Mbps donc la liaison est bonne
5dB	$5\text{dB}/(0.25\text{dB}/\text{Km})$ $= 20\text{Km}$ L_{max} $= (20\text{Km}) + 2\text{Km}$ $= 22\text{km}$	FX : ON veut dire : 100 Mbit/s (sur fibre optique) TX : ON d'après le logiciel : 10Mbit/s (Ethernet sur paires torsadées)	D = 100 Mbps donc la liaison est bonne
8dB	$8\text{dB}/(0.25\text{dB}/\text{Km})$ $= 34\text{Km}$ L_{max} $= (34\text{Km}) + 2\text{Km}$ $= 36\text{km}$	FX : ON veut dire : 100 Mbit/s (sur fibre optique) TX : ON mesure d'après le logiciel : 10Mbit/s (Ethernet sur paires torsadées)	D = 100 Mbps donc la liaison est bonne

<p>11dB (8dB + 3dB)</p>	<p>11dB/(0.25dB/Km) = 44km <i>Lmax</i> = (34Km) + 2Km = 46km</p>	<p>FX : ON veut dire : 100 Mbit/s (sur fibre optique) TX : ON d'après le logiciel : 10Mbit/s (Ethernet sur paires torsadées)</p>	<p>D = 100 Mbps donc la liaison est bonne liaison. Donc la longueur qu'on peut atteindre est de Lmax = 46km</p>
-------------------------	--	--	--

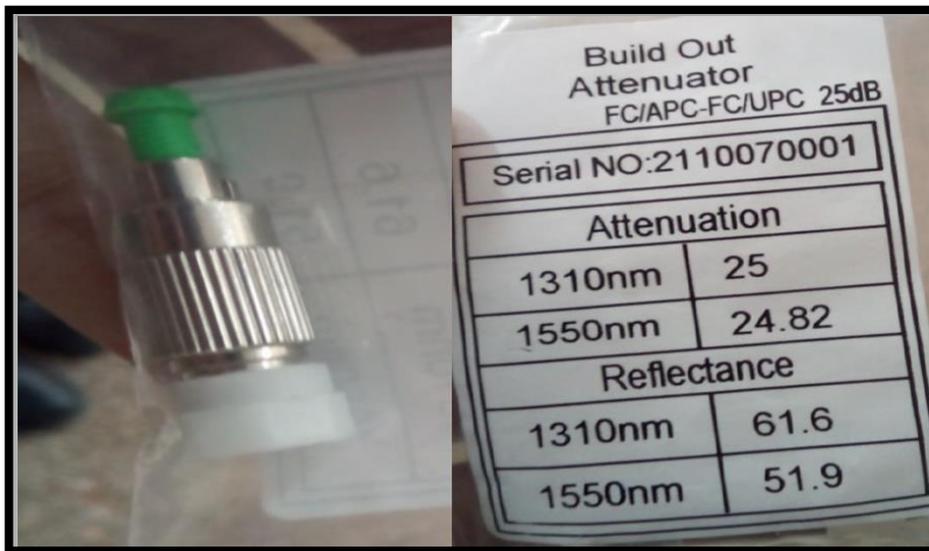


Figure III-8 : Atténuateur 25 dB avec connecteur FC/APC.



Figure III-9 : Montage complet réalisé avec des atténuateurs optiques fixes.

III.3.2. Réalisation et Test d'un multiplexeur 2x1 basé sur des filtres FWDM et coupleurs optiques

III.3.2.1. Etude d'un filtre FWDM

Quand le signal optique passe par le filtre FWDM, il perd une partie de sa puissance. Cette perte se calcule en décibels (dB) et varie selon la longueur d'onde du signal. Par exemple, à 1550 nm , si le signal est injecté dans le port COM avec une puissance de -4.11 dBm et on reçoit une puissance $-6,56\text{ dBm}$ sur le port PASS, la perte d'insertion (ou bien appelée en Anglais Insertion loss(IL)) s'écrit comme suit :

$$IL = |P_{out} - P_{in}| = |-6,56 - (-4.11)| = 2,45\text{ dBm} \quad (\text{III.2})$$

Le niveau d'isolation du filtre est la capacité du filtre FWDM à bloquer les signaux indésirables par rapport à d'autres longueurs d'onde dans sa bande passante. Il se mesure également en décibels (dB) et indique la différence entre la puissance d'un signal filtré et la puissance d'un signal non filtré. Par exemple, si un signal filtré sur 1550 nm a une puissance de $-6,56\text{ dBm}$ et un autre signal en sortie de ce filtre mesuré dans l'autre

port a une puissance de $-24,42 \text{ dBm}$ sur la longueur d'onde 1310. Nous définissons le niveau d'isolation comme la différence entre les deux puissances, soit $|-24,42 + 6,56| = 17,86 \text{ dBm}$. L'isolation d'un filtre est acceptable si elle dépasse 30 dB .

III.3.2.2. Réalisation et test d'un multiplexeur 2x1

La figure III-10 montre le schéma synoptique d'un multiplexeur 2x1, basé sur deux filtres FWDM et un coupleur PLC 2x1.

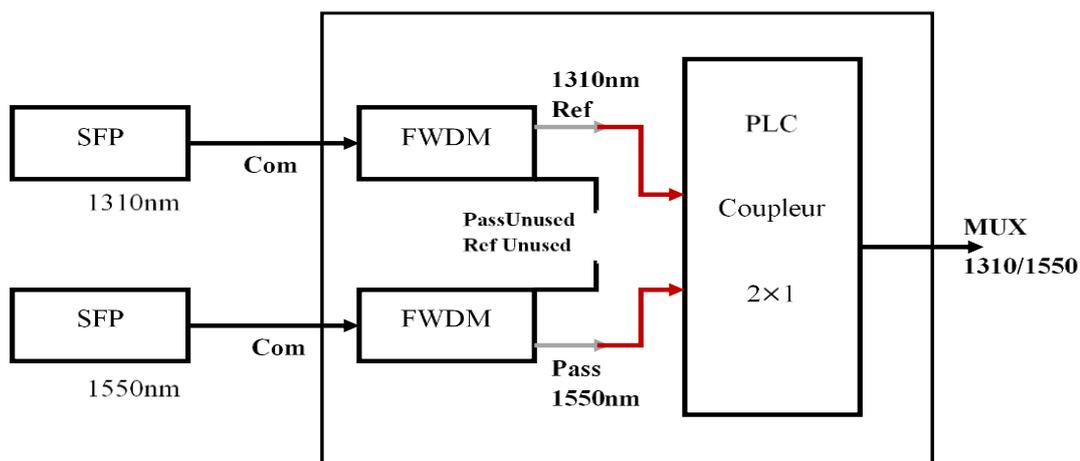


Figure III-10 : Schéma synoptique du multiplexeur 2x1.

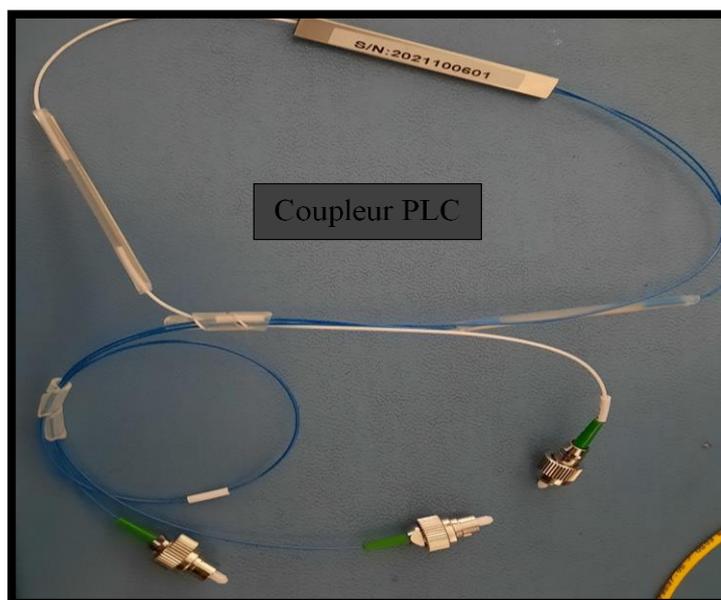


Figure III-11 : Coupleur PLC 2x1.

Nous avons choisis de combiner deux signaux 1310 et 1550 issus des MCs A et B utilisés en première partie de ce travail. Pratiquement, tous les multiplexeurs contiennent des filtres qui sélectionnent les longueurs d'onde utilisées. Donc, pour sélectionner la longueur d'onde 1550 nm, nous avons utilisé le port PASS du filtre FWDM et le port REF d'un autre filtre FWDM pour filtrer la longueur 1310 nm (voir figure III-10). Et puis, pour l'opération de multiplexage, nous avons injecter les signaux filtrés dans un coupleur passif 2x1 de type PLC. L'avantage du coupleur PLC du coupleur FBT, est que le premier produise deux signaux avec des puissances quasi-égales dont la différence est presque nulle. En plus, la technologie PLC est non encombrante et supporte les hautes températures.

La réalisation pratique complète de ce multiplexeur est présentée en figure III-12. Pour évaluer la performance de ce multiplexeur, on doit calculer sa perte d'insertion et l'isolation des signaux multiplexés dans la bande.

Sachant que la puissance d'entrée du multiplexeur égale à -4.11 dBm , la puissance mesurée du signal multiplexé sur le port de sortie MUX égale à -6.66 dBm . La perte d'insertion est calculée comme suit :

$$IL = |P_{out} - P_{in}| = |-6,66 + 4,11| = 2,55 \text{ dB} \quad (\text{III.3})$$

Nous remarquons que la perte d'insertion obtenue est acceptable. Après, nous avons vérifié le niveau d'isolation des canaux multiplexés 1310/1550 dans la bande. Nous avons pris les résultats obtenus du filtre FWDM. Pour le port PASS, la puissance centrée sur 1550 nm égale à -6.98 dBm , alors que la puissance mesurée sur le port REF à la longueur d'onde 1310 nm égale à -6.66 dBm . L'isolation est calculée comme suit :

$$Isolation = |P_{in}(1550\text{nm}) - P_{in}(1310\text{nm})| = |-6,98 + 6,66| = 0,32 \text{ dB} \quad (\text{III.4})$$

Dans un signal multiplexé, l'isolation des signaux doit être nulle pour minimiser le phénomène diaphonie dans la bande (crosstalk). Par contre, dans un signal démultiplexé,

l'isolation doit être grande pour éviter la diaphonie (interférences) en dehors de la bande. Dans notre cas, l'isolation dans la bande est très faible (0.32 dB), ce qui est acceptable.

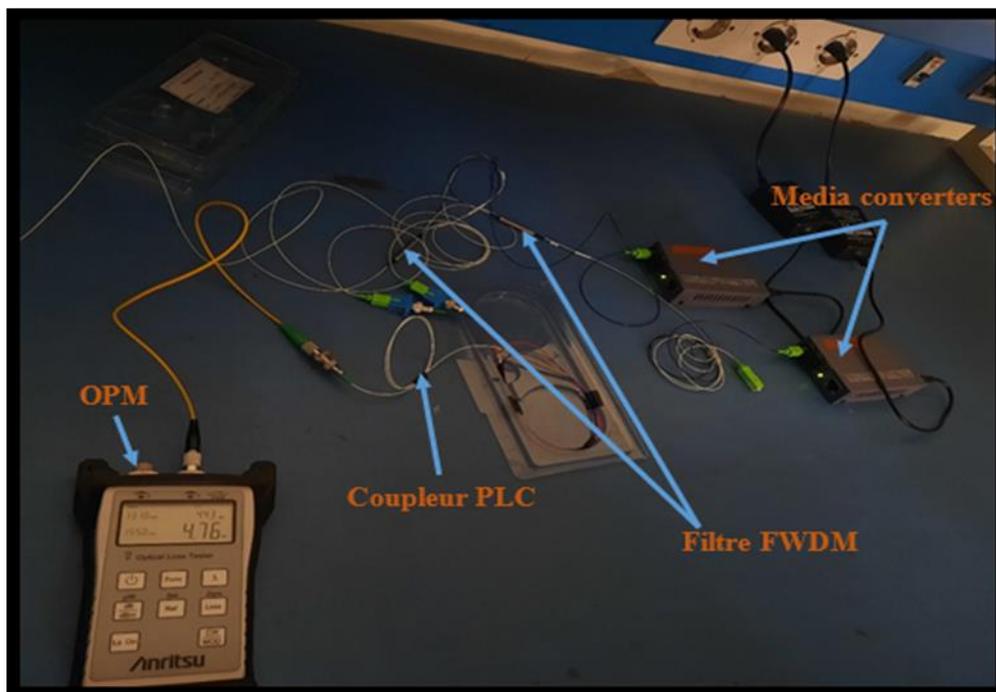


Figure III-12 : Réalisation d'un multiplexeur optique 2x1.

III.3.3. Réalisation et test d'un modulateur ASK-2 à base d'atténuateurs optiques variables (VOA)

Dans cette partie, nous avons utilisé un atténuateur optique variable (VOA) pour réaliser une modulation numérique d'amplitude de type ASK-2 (Amplitude Shift Keying). La figure III-13 présente cet atténuateur. Ce dispositif atténue au maximum (de l'ordre de 25 dB) la puissance d'un signal optique lorsqu'on lui applique une tension continue de 5V, alors qu'il devient transparent (laisse passer le signal) si aucune tension continue (0V) n'est appliquée.



Figure III-13 : Atténuateur optique variable (VOA).

La figure III-14 montre la caractéristique de ce VOA sur différentes longueurs d'onde, or dans notre étude, nous avons choisis de travailler sur la longueur d'onde 1550 nm le fait que nos SFPs fonctionnent sur la 1550 nm.

Pour réaliser une modulation numérique d'amplitude à deux états (bit 1 et 0) avec ce VOA, nous devons l'alimenter non pas avec une alimentation continue, mais plutôt alternative. Donc, nous avons utilisé un GBF, on nous avons alimenter le VOA avec la sortie TTL (5V) en choisissant une faible fréquence de l'ordre de 1.5 Hz afin de visualiser les variations de puissance sur l'OPM. Le montage présenté en figure III-15 illustre notre méthode de test de ce dispositif. Les mesures prises sur l'OPM avec les variations des tensions de l'horloge TTL sont les suivantes :

- 5V (bit "0") $\rightarrow P_{\text{modulateur}} = -57 \text{ dBm}$.
- 0V (bit "1") $\rightarrow P_{\text{modulateur}} = -11,80 \text{ dBm}$.

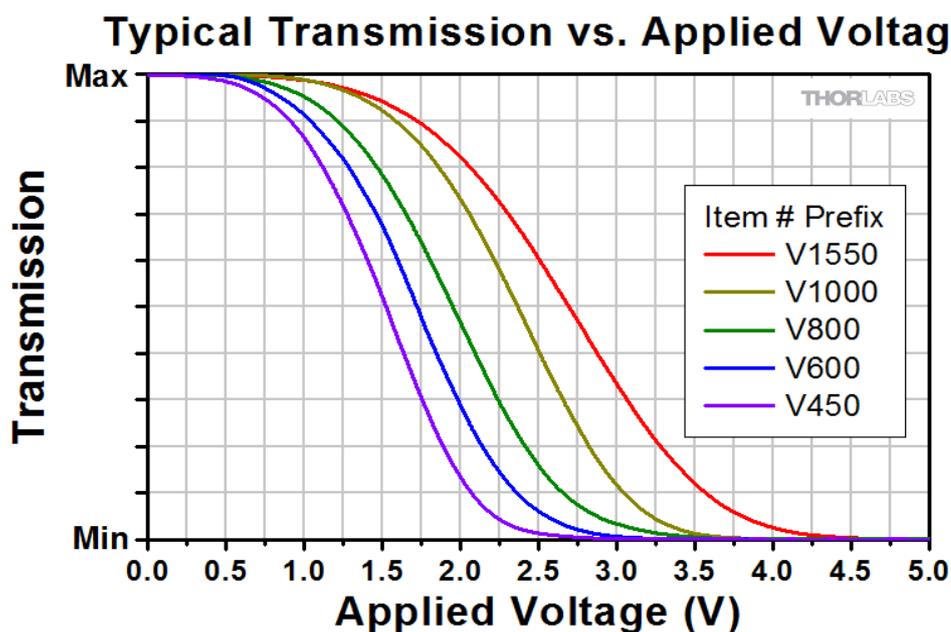


Figure III-14 : Caractéristique du VOA.

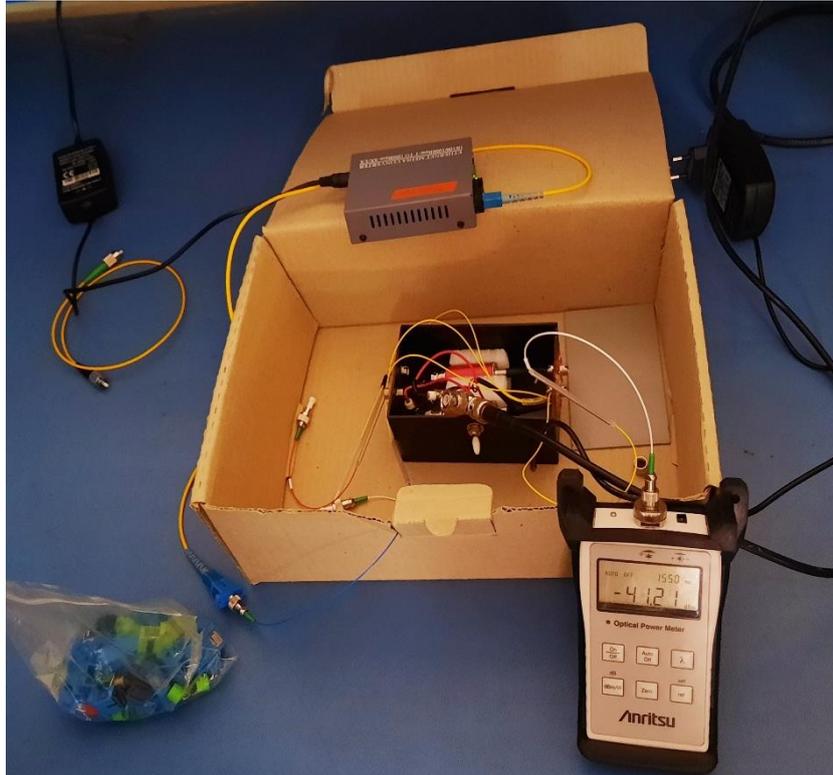


Figure III-15 : Test d'un modulateur ASK-2 à base de VOA.

Puisque la fréquence F de l'horloge égale à $1,5 \text{ Hz}$, sa période T égale à (voir figure III-16) :

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{1,5} = 0,66 \text{ s.} \quad (\text{III .5})$$

Nous concluons que la durée d'un bit Tb égal à la moitié de la période de l'horloge T (voir figure III-16).

$$Tb = \frac{T}{2} = \frac{0,66}{2} = 0,33 \text{ s} \quad (\text{III .6})$$

Le débit binaire est l'inverse de la durée d'un bit :

$$D = Rb = \frac{1}{Tb} = \frac{1}{0,33} = 3 \text{ bit/s.} \quad (\text{III.7})$$

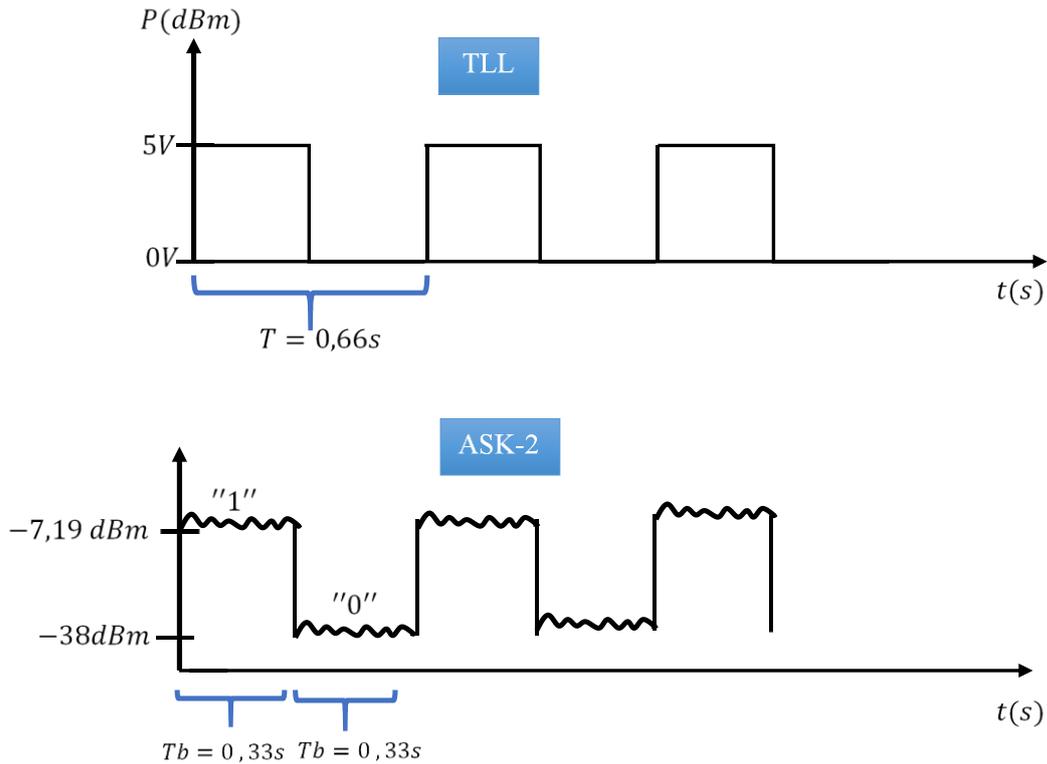


Figure III-16 : Signal modulé de sortie ASK-2.

La figure III-17 présente le schéma théorique de notre méthode utilisée pour la démodulation du signal ASK-2. Nous avons donc utilisé un photo-détecteur PIN (voir figure III-18) qui présente un port d'entrée optique ou il reçoit le signal, après ce signal est divisé avec une proportion de 95% vers un autre port optique de sortie et La 5% de lumière restante est convertie en un courant électrique très faible de l'ordre de μA . Nous avons utilisé un multimètre de table pour mesurer les courants électriques démodulés (voir figure III-19).

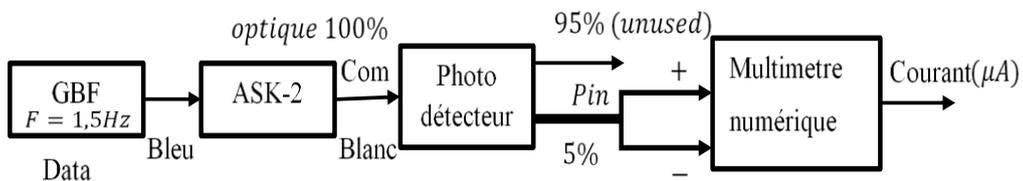


Figure III-17 : Schéma du démodulateur.

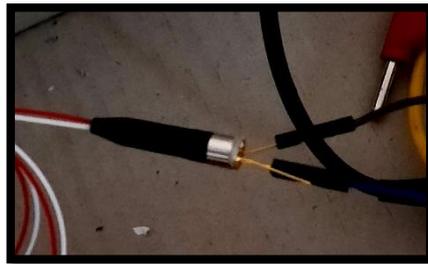


Figure III-18 : photo-détecteur PIN.

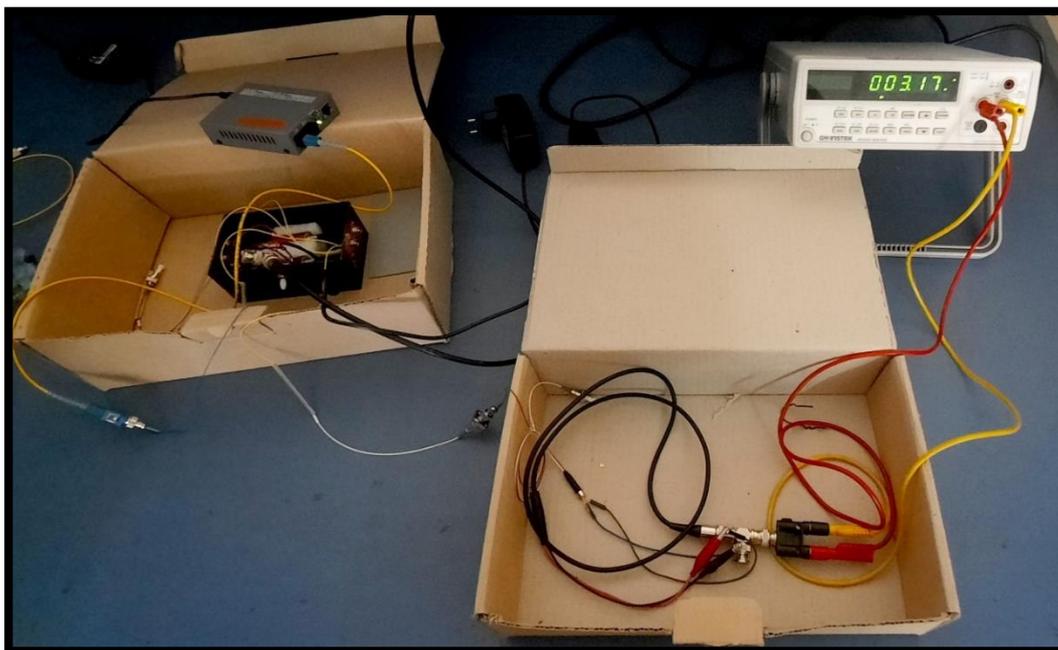


Figure III-19 : Montage de démodulation du signal ASK-2.

A l'aide du multimètre, nous avons pu mesurer les courants issus du photo-détecteur (PD) en lui connectant au VOA. Le signal porteur optique est délivré par le MC de type B. Les résultats de mesure sont représentés sur la figure III-19.

- Pour le bit "0" $\rightarrow I_{PD}=4\mu A$
- Pour le bit "1" $\rightarrow I_{PD}=6\mu A$

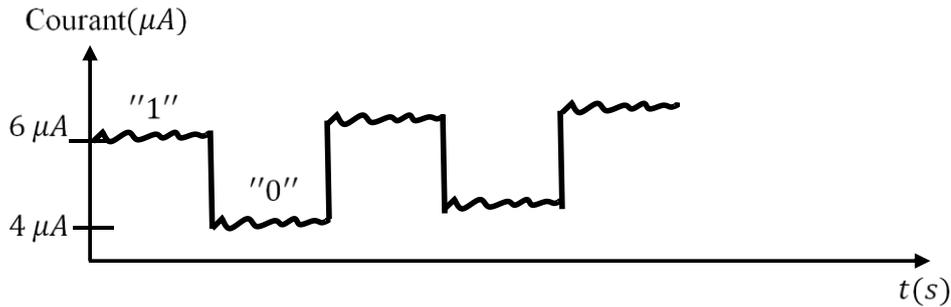


Figure III-20 : Représentation du signal démodulé.

III.3.4. Réalisation et Test d'un switch 1X2 à base d'atténuateurs optiques variables (VOA) et coupleurs 1X2

Dans la dernière partie de notre projet de fin d'études, nous avons réalisé et testé un routeur optique 1x2, basé principalement sur deux VOAs et un coupleur 2x1. Le schéma synoptique est donné en figure III-21.

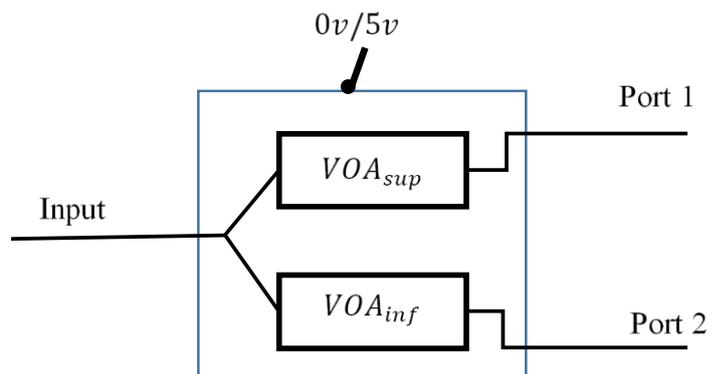


Figure III-21 : Schéma synoptique du switch optique 1X2.

Pour réaliser l'opération de routage, il faut que l'un des VOAs soit transparent (laisse passer le signal), tandis que l'autre, il faut qu'il produise une atténuation maximale sur le signal entrant. Pour que le signal à l'entrée passe simultanément sur les deux VOAs, nous insérons à l'entrée du routeur un splitter 1x2. Pratiquement, pour que les deux VOAs fonctionnent de cette façon, nous avons modifié leur alimentation électrique de telle sorte que lorsque le VOA de haut est alimenté par 5V, l'autre VOA reçoit 0V. Avec un levier situé sur la boîte VOA, on peut switcher entre ces tensions continues et changer par conséquent la direction du signal optique commuté.

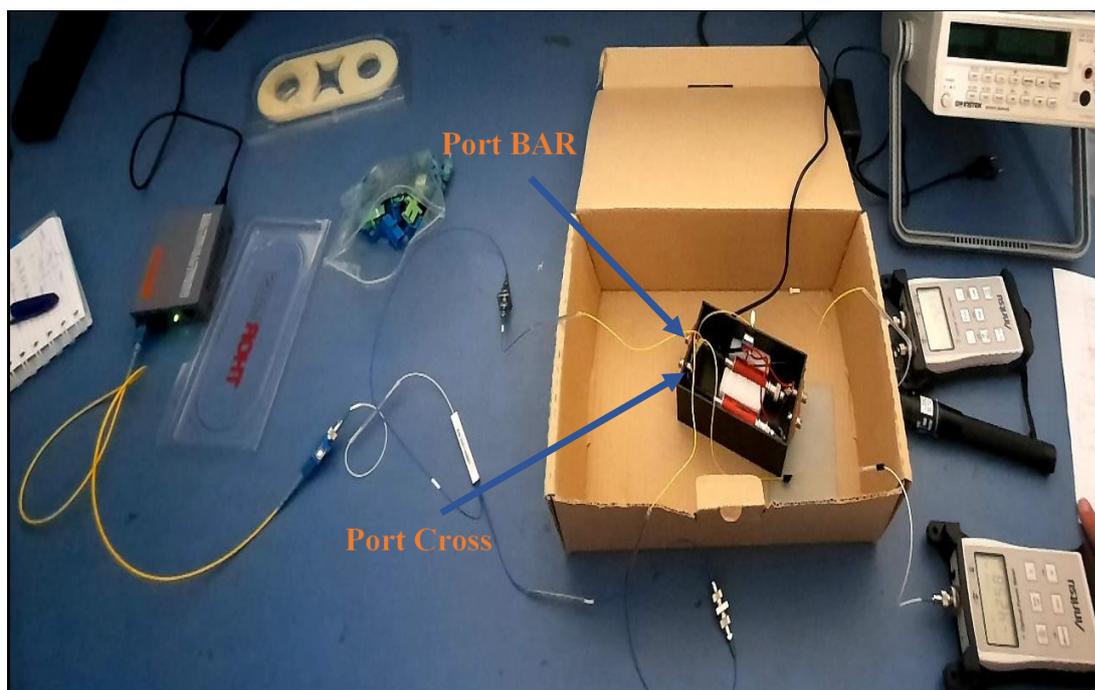


Figure III-22 : Réalisation d'un switch 1x2 à l'aide de VOAs.

Avant de vérifier la fonctionnalité et la performance de ce switch, tout d'abord, nous avons vérifié l'atténuation des deux VOAs. On va prendre chaque VOA et mesurer sa puissance de sortie en appliquant les deux tensions continues 0 V et 5 V. L'atténuation sera la différence entre ces deux puissances. Les résultats obtenus sont comme suit :

Pour le VOA supérieur :

- Pour 5V $\rightarrow P = -8\text{dBm}$.
- Pour 0V $\rightarrow P = -40\text{dbm}$.

Donc, l'atténuation du $VOA1_{sup}$ est : $-40 - (-8) = 32\text{ dB}$.

Cette valeur indique que le $VOA1_{sup}$ peut atténuer le signal optique de 32 dB quand il est alimenté par 5V.

Pour le VOA inférieur :

- Pour 0V $\rightarrow P = -41\text{dBm}$.
- Pour 5V $\rightarrow P = -10,41\text{dBm}$.

Donc, l'atténuation du $VOA1_{inf}$ est : $-41 - (-10,41) = 30,59\text{ dB}$.

Pour réaliser l'opération de routage manuel, nous changeons la position du levier d'alimentation. En mettant le switch en première position, nous avons obtenu les résultats suivants :

- (VOA_{sup}) Pour 5V → -12,5 dBm. (port BAR)
- (VOA_{inf}) Pour 0V → -47,26 dBm. (port CROSS)

En mettant le switch en deuxième position nous avons obtenu les résultats suivants :

- (VOA_{sup}) Pour 0V → -43,34 dBm (port BAR)
- (VOA_{inf}) Pour 5V → -15,96 dBm (port CROSS)

D'après les résultats cités ci-dessus, en position "1", le signal est routé vers le port BAR (voir figure III-22). En deuxième position, le signal optique est routé vers le port CROSS.

Pour déterminer la perte d'insertion de ce routeur, nous avons calculé la différence entre la puissance routée soit vers le port BAR ou bien CROSS et la puissance injectée ($P_e = -4.11 \text{ dBm}$)

- Position 1 → $IL_{BAR} = |P_{in} - P_{out}| = |-12,15 + 4,11| = 5,04 \text{ dB}$.
- Position 2 → $IL_{CROSS} = |P_{in} - P_{out}| = |-15,96 + 4,11| = 8,85 \text{ dB}$.

Les pertes d'insertion obtenues sont acceptables. Nous remarquons que la perte d'insertion correspondante au deuxième VOA est légèrement plus grande ($IL_{CROSS} = 8.85 \text{ dB}$) que la première correspondante au port BAR. Ceci est dû à un mauvais connecteur utilisé dans ce deuxième VOA.

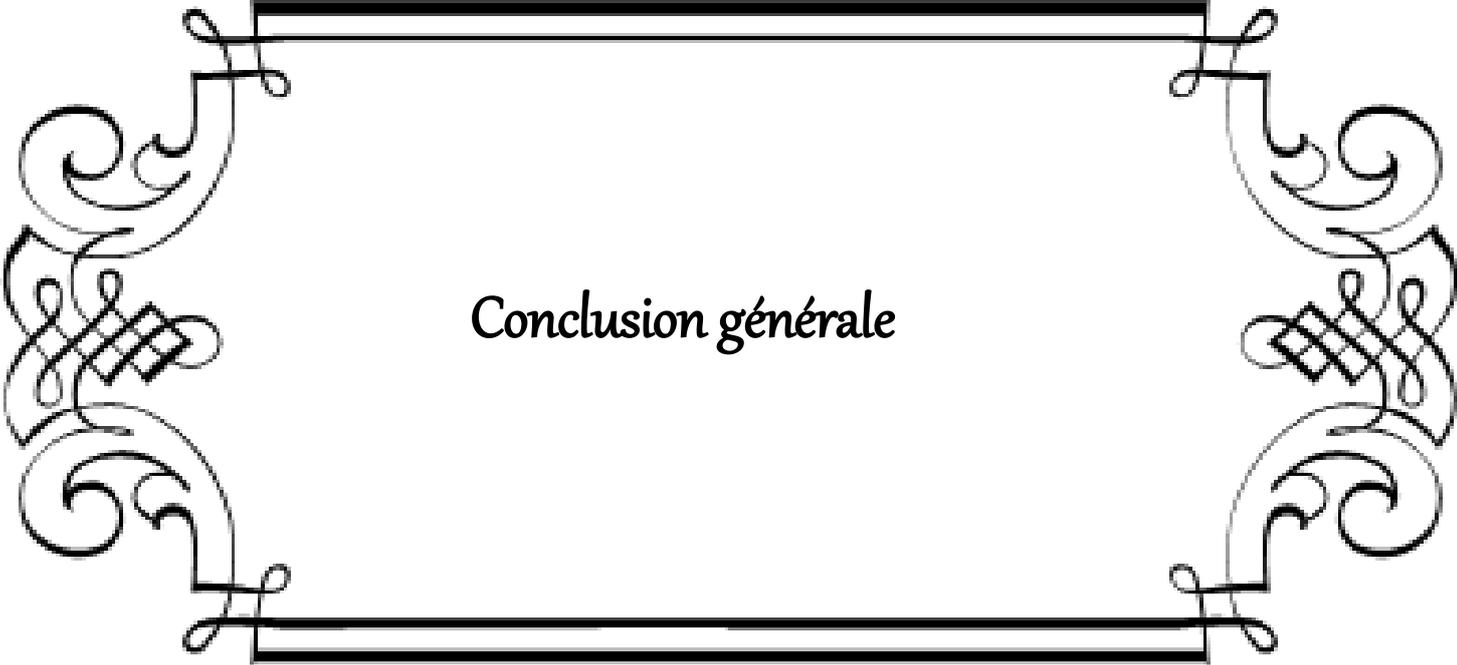
Pour évaluer la performance de commutation de ce dispositif, nous calculons le rapport de suppression (ou bien Extinction Ratio (ER) en Anglais). Le rapport de suppression est la différence entre la puissance du signal commuté vers le port BAR et la puissance du signal non-commuté présent en port CROSS. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Position 1 → $ER = |P_{in} - P_{out}| = |-47,26 + 12,5| = 35,11 \text{ dB}$.
- Position 2 → $ER = |P_{in} - P_{out}| = |-43,34 + 15,96| = 27,38 \text{ dB}$.

D'après les résultats obtenus nous pouvons dire que le switch optique étudié présente une bonne performance, car il présente un rapport de suppression élevé (minimum 30 dB) et des pertes d'insertion acceptables (en moyenne 7 dB) .

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé et testé une liaison bidirectionnelle à 1G avec des SFPs sur une distance de 2 Km. Nous avons aussi réalisé, testé et analysé différents dispositifs optiques pour convertir, séparer, combiner, moduler et commuter des signaux optiques. Nous avons évalué les performances de ces dispositifs en termes d'atténuation de puissance optique, d'isolation, de perte d'insertion et de taux d'extinction. Nous avons constaté que la qualité de la transmission optique dépend de plusieurs facteurs tels que l'alignement des fibres, la longueur d'onde, les types de connecteurs et adaptateur utilisés et le réglage des VOAs. Ces travaux pratiques nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes de communication optique et de développer nos compétences expérimentales.



Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire avait pour objectif de réaliser , tester et analyser divers dispositifs optiques comme les multiplexeurs, les modulateurs et les switches optiques. Sans doute, nous ne pouvions pas tester ces dispositifs sans leur insertion dans une liaison optique où l'échange des données a été fait via des émetteurs récepteurs optiques SFPs. La SFP utilisée dans notre travail était de type Ethernet 10/100/1000 *Mbps* vers 1*Gbps* optique ou nous avons utilisé une liaison de 2 *Km* disponible au laboratoire de télécommunications (LTEC) de la faculté de Technologie.

En chapitre 2, nous avons présenté en général ces modules SFPs, leurs caractéristiques, types, avantages et inconvénients. Enfin, en chapitre 3, nous avons exposé plusieurs réalisations et tests pratiques liés à la fibre optique, aux modules SFP et à quelques dispositifs optiques de base. Nous avons réalisé une liaison à fibre avec des media converters BIDI (Bidirectional), nous avons aussi étudié un filtre FWDM (Fiber Wavelength Division Multiplexing). Après, nous nous sommes intéressés à la réalisation d'un multiplexeur 2x1 basé sur des filtres FWDM et coupleurs passifs. En manipulant des atténuateurs optiques variables (VOA) nous avons réalisé et testé un switch 1X2 et un modulateur numérique optique ASK-2 à basse fréquence.

Nos résultats ont permis de répondre à la problématique de notre mémoire, en identifiant les paramètres clés qui affectent la qualité du signal optique, tels que la perte linéique, la perte d'insertion, l'isolation et le rapport de suppression.

Ce mémoire nous a permis d'approfondir nos connaissances théoriques et pratiques sur la fibre optique, les modules SFP et des dispositifs optiques.

Références bibliographiques

- Boullier, D. (2014). Internet est maritime : les enjeux des câbles sous-marins. *Revue internationale et stratégique*, pp. 95(3),149-158. Cairn.info.
- Crisp, J., & Elliott, B. (2005). Introduction to fiber optics(3e éd). Newnes.
- Alibaba.com. (s.d). *XFP 10G WDM BIDI Simplex Duplex LC Connector 10Gbps 10km 20km 40km 80km Fiber Optic Transceiver Module*. Récupéré sur Alibaba.com: https://www.alibaba.com/product-detail/XFP-10G-WDM-BIDI-Simplex-Duplex_62315926393.html
- Azadeh, M. (2009). *Fiber Optics Engineering*. Springer.<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0304-4> .
- Bailey, D., & Wright, E. (2003). *Practical Fiber Optics*. Oxford: Newnes.
- Boutelli, K., & Bentouati, B. (2021). Étude et conception des fibres optiques microstructurées. *Mémoire de master*. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Cisco. (2023). *Cisco SFP Modules for Gigabit Ethernet Applications Data Sheet*. Récupéré sur Cisco: URL : <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/gigabit-ethernet-gbic-sfp-modules/datasheet-c78-366584.html>
- Cisco. (2023). *Cisco 10GBASE SFP+ Modules Data Sheet*. Récupéré sur Cisco: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/transceiver-modules/data_sheet_c78-455693.html
- Cisco. (2023). *Cisco 10GBASE SFP+ Modules Data Sheet [PDF file]*. Récupéré sur Cisco: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/transceiver-modules/data_sheet_c78-455693.pdf
- Cisco. (2023). *Cisco SFP Modules for Gigabit Ethernet Applications Data Sheet (PDF)*. Récupéré sur Cisco: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/gigabit-ethernet-gbic-sfp-modules/datasheet-c78-366584.html>
- Community, F. (s. d). *Combien de types de modules SFP connaissez-vous ?* Récupéré sur FS Community: <https://community.fs.com/fr/blog/how-many-types-of-sfp-transceivers-do-you-know.html>
- Compufirst. (s.d). *Composition d'une fibre optique [Illustration]*. Récupéré sur Compufirst: https://imgsite.compufirst.com/images/www/images/main/pages_magasins/le-lab/fibre-optique/composition-fibre.jpg

- D-Link. (s.d). *DGS-1210-10P*. Récupéré sur D-Link: <https://www.dlink.ru/am/products/1/2254.html>
- Drouet, R. (2009). *Transmission sur fibres optiques*. Récupéré sur IGM: http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/types.html
- Duris, P. (s.d). *Types de fibres optiques*. Récupéré sur IGM - Université Gustave Eiffel: http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/types.html
- ElettroAmici. (s.d). *Fibre optique*. Récupéré sur ElettroAmici: <https://www.elettroamici.org/fr/fibra-ottica/>
- FS. (2018). *Step-index multimode fiber vs graded-index multimode fiber*. Récupéré sur FS: <https://community.fs.com/fr/blog/step-index-multimode-fiber-vs-graded-index-multimode-fiber.html>
- Modules, F. O. (2023). *SFP Fiber Optic Modules: An Overview of Design, Types, Applications and Advantages*. Récupéré sur Fiber Optic Modules: URL : <https://www.fiber-optic-modules.com/sfp-fiber-optic-modules/>
- Optace. (2019, juillet 1). *Understanding Fiber Optics – Your Quick Guide to SFP Transceivers*. Récupéré sur Optace: <https://optace.co.ke/blog/understanding-fiber-optics-your-quick-guide-to-sfp-transceivers/>
- optique, P. d. (s. d). *Propagation de la lumière dans une fibre optique*. Récupéré sur Nantes Université: http://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/dioptres/fibre_optique.php
- Senior, J., & Jamro, M. (2009). *Optical fiber communications : Principles and practice (3rd ed)*. Prentice Hall.
- Studocu, O. 1.-P.-U. (s.d). *Optique 1) Nature de la lumière - Physique - UPS - Studocu*. Récupéré sur Studocu: URL : <https://www.studocu.com/fr/document/universite-toulouse-iii-paul-sabatier/physique/optique-1-nature-de-la-lumiere/18687370>
- VERSITRON. (2019). *Everything You Should Know About the SFP Module*. Récupéré sur VERSITRON: <https://www.versitron.com/blog/everything-you-should-know-about-the-sfp-module>
- Vincent. (2021, septembre 29). *Qu'est-ce qu'un module SFP et comment en choisir un ?* Récupéré sur Communauté FS: <https://community.fs.com/blog/sfp-module-what-is-it-and-how-to-choose-it.html>

Résumé

La fibre optique est sans doute le meilleur support de transmission actuellement, et ceci est dû aux différents avantages qu'elle présente. Pour exploiter la fibre optique en transmission, il faut sans doute étudier sa connectique, les émetteurs/récepteurs optiques et les dispositifs largement utilisés dans les réseaux optiques haut-débits. Dans ce mémoire de fin d'études, nous avons testé et analysé des émetteurs/récepteurs (SFPs) à 1 Gbps dans une liaison optique de 2 Km. Ainsi, nous avons réalisé, testé et analysé différents dispositifs optiques expérimentalement, tel que : un multiplexeur optique basé sur des filtres FWDM et coupleurs passifs, un modulateur optique numérique ASK-2 et un routeur 1 × 2 basés sur des atténuateurs optiques variables.

Mots-clés : Fibre optique ; SFP ; coupleur ; connecteur ; modulateur ; filtre FWDM ; multiplexeur ; routeur ; atténuateur (VOA).

Abstract

Optical fiber is probably the best transmission medium today, and this is due to the different advantages it presents. To exploit optical fiber in transmission, it is probably necessary to study its connectivity, optical transceivers and devices widely used in high-speed optical networks. In this dissertation, we tested and analyzed transceivers (SFPs) at 1 Gbps in a 2 km optical link. Thus, we realized, tested and analyzed different optical devices experimentally, such as: an optical multiplexer based on FWDM filters and passive couplers, an ASK-2 digital optical modulator and a 1 × 2 router based on variable optical attenuators.

Keywords : Optical fiber; SFP; coupler; connector; modulator; FWDM filter; multiplexer; router; attenuator (VOA).

الملخص

ربما تكون الألياف الضوئية هي أفضل وسيلة نقل اليوم، ويرجع ذلك إلى المزايا المختلفة التي تقدمها. لاستغلال الألياف الضوئية في الإرسال، ربما يكون من الضروري دراسة توصيلها وأجهزة الإرسال والاستقبال الضوئية والأجهزة المستخدمة على نطاق واسع في الشبكات الضوئية عالية السرعة. في هذه الأطروحة، قمنا باختبار وتحليل أجهزة الإرسال والاستقبال (SFPs) بسرعة 1 جيجا بت في الثانية في وصلة بصرية بطول 2 كم. وهكذا، أدركنا واختبرنا وحللنا أجهزة بصرية مختلفة تجريبياً، مثل: مضاعف إرسال بصري يعتمد على مرشحات FWDM وقارنات التوصيل السلبية، ومعدل بصري رقمي ASK-2 وجهاز توجيه 1 × 2 يعتمد على مخففات بصرية متغيرة.

الكلمات المفتاحية: الألياف الضوئية؛ سبب. مقرنه؛ موصل؛ المغير؛ مرشح FWDM ؛ متعدد؛ موجة؛ المخفف (VOA).