

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Option : Réseaux et Télécommunications

Par: MAHMOUDI Ahlem & MEDJAHDI Nor El Houda

THEME

*Etude d'un système OFDM optique basé sur WDM
avec détection cohérente*

Soutenu publiquement le 22/06/2023 devant le jury composé de :

Mr. FEHAM Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr. BENDIMERAD.M. Yacine	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr. BORSALI Ahmed Riad	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Avant tout Nous remercions « ALLAH » le tout puissant, de nous avoir accordé le courage, la patience et la volonté pour mener à terminer nos études et réaliser ce travail.

À travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promoteur **Mr. BORSALI Ahmed Riad** pour l'intéressante documentation qu'il a mis à notre disposition, pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apporté durant notre étude et réalisation de ce projet.

Nous tenons aussi à remercier les membres de jury **Mr. FEHAM Mohammed**, et **Mr. BENDIMERAD.M.Yacine** qui ont accepté d'évaluer et de Juger le présent travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Nous remercions très chaleureusement toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace



Bien que le début du chemin ait été difficile, la fin a été la réalisation d'un rêve. Les départs tristes peuvent conduire à des fins heureuses, et tout début doit avoir une fin. Après des années d'efforts, mon rêve est enfin devenu réalité....

J'ai l'honneur de Didier ce modeste travail comme un témoignage d'amour et de respect à :

À ce lui qui m'a entouré avec tous espoirs dans la vie, À mon haut symbole de ma vie À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ” Maman “ que j'adore.

À mon chère sœur Ikram, À mes adorables frères Ilyes et Sohaib, je les souhaite le bonheur, et toute la réussite dans la vie.

À ma très chère binôme et copine Mlle « Medjahdi Nor El Houda ».

À tout ma famille : merci pour votre confiance

À tous ceux qui m'ont encouragé.

À tous ceux qui m'ont aidé et soutenu. Tout au long de ce travail.

AHLEM



Dédicace

Avec mes sentiments de gratitude et de reconnaissance les plus profonds je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études. Votre encouragement indéfectible m'a donné la force de persévérer et de réaliser mes objectifs.

A mon père, qu'Allah lui fasse miséricorde. J'espère pouvoir faire votre fierté comme vous faites la mienne.

A mes très chers frères : Sami et Lotf Errahmen que ALLAH les protège.

A toute ma famille sans oublier mes tantes et oncles, ainsi qu'à toutes mes cousines et cousins.

A ma chère copine et binôme Mahmoudi Ahlem, et à tous mes amis et tous ceux qui m'aiment...

A toute personne dans mon cœur de près Ou de loin.

Nour El Houda♥



Résumé

La fibre optique est actuellement le support de transmission le plus couramment utilisé dans les télécommunications optiques haut-débit.

Avec la demande croissante de services de télécommunications sans fil à grande vitesse, la technique de modulation multi-porteuses OFDM est devenue de plus en plus populaire. L'OFDM présente des avantages importants, tels que sa capacité à gérer les interférences causées par les trajets multiples et sa grande efficacité de transmission. En raison de ses performances exceptionnelles, l'OFDM est largement utilisé dans les normes actuelles et futures des systèmes sans fil.

Ce mémoire de fin d'études présente une étude sur un système de transmission optique OFDM qui utilise la détection cohérente pour améliorer les performances de transmission. Ce système est basé sur le multiplexage WDM et des simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel optisystem.

L'analyse des résultats obtenus, en se basant sur le taux d'erreur binaire et le facteur de qualité, démontre que l'utilisation de la détection cohérente améliore considérablement les performances de transmission.

Mot clé : OFDM, WDM, BER, Facteur Q, Détection Cohérente.

Abstract

Optical fiber is currently the most commonly used transmission medium in high-speed optical telecommunications.

With the increasing demand for high-speed Wireless telecommunications services, the OFDM multi-carrier modulation technique has become increasingly popular. OFDM has important advantages, such as its ability to handle interference caused by multipaths and its high transmission efficiency. Due to its outstanding performance, OFDM is widely used in current and future wireless system standards.

This thesis presents a study on an OFDM optical transmission system that uses coherent detection to improve transmission performance. This system is based on WDM multiplexing and simulations have been carried out using the optisystem software.

The analysis of the results obtained, based on the bit error rate and the quality factor, demonstrates that the use of coherent detection considerably improves the transmission performance.

Key Word : OFDM, WDM, BER, Q Factor, Coherent Détection.

ملخص

الألياف الضوئية حالياً هي وسيلة النقل الأكثر استخداماً في الاتصالات الضوئية عالية السرعة. مع الطلب المتزايد على خدمات الاتصالات اللاسلكية عالية السرعة، أصبحت تقنية متعددة الناقل ذات شعبية متزايدة. OFDM لديها مزايا هامة، مثل قدرتها على التعامل مع التداخل الناتج عن مسارات متعددة وكفاءة انتقال عالية. نظراً لأدائها المتميز، OFDM يستخدم على نطاق واسع في معايير النظام اللاسلكي الحالية والمستقبلية.

تقدم هذه المذكرة دراسة عن نظام الإرسال البصري OFDM الذي يستخدم الكشف المتماسك لتحسين أداء الإرسال. ويستند هذا النظام على تعدد الإرسال WDM وتم تنفيذ المحاكاة باستخدام برنامج Optisystem. يوضح تحليل النتائج التي تم الحصول عليها، بناءً على معدل خطأ البت وعامل الجودة، أن استخدام الكشف المتماسك يحسن أداء الإرسال بشكل كبير.

الكلمات المفتاحية: OFDM, WDM, BER, العامل Q, الكشف المتماسك.

Tables des matières

Remerciement.....	I
Dédicaces	II
Résumé.....	IV
Tables des matières	V
Listes des figures.....	X
Listes des tableaux.....	XIII
Listes des acronymes.....	XIV
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Etude d'une liaison optique

1.1	Introduction.....	3
1.2	Définition d'une liaison par fibre optique	3
1.3	Définition d'une fibre optique	4
1.3.1	Structure de la fibre optique	5
1.3.2	Le principe de fonctionnement de la fibre optique	6
1.3.3	Différents types de fibres optiques	6
	1.3.3.1 Fibre optique multimode	7
	a) Fibre multimode à saut d'indice.....	7
	b) La fibre à gradient d'indice.....	8
	1.3.3.2 La fibre monomode	8
1.4	Atténuation.....	9
1.5	La dispersion dans la fibre optique	10
1.5.1	Dispersion modale	10
1.5.2	Dispersion chromatique	11
	1.5.2.1 Dispersion de matière	11
	1.5.2.2 Dispersion des fibres	11

1.6	Avantages et inconvénients des fibres optiques.....	12
1.7	Partie émission.....	13
1.7.1	La source optique	13
1.7.2	La diode DEL (électroluminescentes).....	13
1.7.3	Diode laser DL	13
1.7.4	La différence entre la diode DL et la diode LED	14
1.8	La partie réception.....	14
1.8.1	Le récepteur optique	14
1.8.2	Le photodétecteur.....	15
	A- Principe de fonctionnement de la photo-détection	15
	B- Caractéristiques de photodétecteur	15
	1.8.2.1 La photodiode PIN	16
	1.8.2.2 Le photodétecteur à avalanche (APD).....	16
1.9	L'amplificateur optique	17
1.9.1	Fonctions de l'amplificateur optique	18
1.9.2	Les types d'amplificateurs optiques	19
	1.9.2.1 Amplificateur optique à semi-conducteur (SOA).....	19
	1.9.2.2 Amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA)	19
	1.9.2.3 Comparaison des amplificateurs.....	19
1.10	principes techniques de la communication optique cohérente	20
1.11	Conclusion	22

Chapitre 2 : Techniques d'accès multiple

2.1	Introduction	24
2.2	Multiplexeur/Démultiplexeur	24

2.2.1	Le multiplexeur.....	25
2.2.2	Le démultiplexeur	25
2.3	Techniques de multiplexage	25
2.3.1	Le multiplexage temporel TDM.....	25
2.3.1.1	Optique (OTDM).....	26
2.3.1.2	Electronique (ETDM)	27
2.3.2	Le multiplexage temporel FDM	27
2.3.3	Le multiplexage temporel CDM.....	28
2.3.4	Principe de WDM.....	29
2.3.4.1	Fonctionnement du WDM.....	29
2.3.4.2	Types de systèmes WDM	30
a)	DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)	30
b)	CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)	30
2.4	Le développement des capacités	30
2.4.1	Augmentation du débit par canal	30
2.4.2	Augmentation du nombre de canaux.....	31
2.5	Les composants d'un système WDM.....	31
2.5.1	Les multiplexeurs terminaux optiques (Optical Terminal Multiplexer ou OTM)	32
2.5.2	Les multiplexeurs à insertion/extraction optique (Optical Add Drop Multiplexer ou (OADM).....	32
2.5.3	Les brasseurs optiques (Optical Cross Connect ou OXC)	32
2.6	Convertisseurs optiques	33
a)	Conversion optoélectronique	33
b)	Conversion tout optique	34

2.7 Applications de la technologie WDM	34
2.8 Multiplexage OFDM	35
2.8.1 Définition de La Technique OFDM	35
2.9 Canal multi-trajets	36
2.10 Modulation de chaque sous-porteuse du signal OFDM	37
2.10.1 Binary phase shift keying (BPSK)	37
2.10.2 Modulation QPSK	37
2.10.3 Modulation QAM.....	38
2.11 Notion d'orthogonalité	39
2.12 Principe et fonctionnement de l'OFDM	40
2.12.1 Principe de la modulation dans un système OFDM	42
2.12.2 Principe de la démodulation dans un système OFDM.....	43
2.13 Problèmes des interférences	43
2.13.1 L'interférence entre symboles (IES)	43
2.13.2 L'interférence entre porteuses (IEP).....	44
2.14 L'intervalle de gardes.....	44
2.14.1 Préfixe cyclique.....	44
2.15 Accès multiple par répartition de fréquences optique.....	45
2.16 Avantages et inconvénients de l'OFDM	46
2.17 Conclusion.....	47

Chapitre 3 : Etude d'un système OFDM basé sur WDM avec détection cohérente

3.1 Introduction	49
3.2 Présentation du logiciel de simulation Optisystem	49

3.2.1 interface optisystem.....	50
3.2.2 Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem	51
3.3 Application d’OptiSystem.....	52
3.4 Avantages du logiciel Optisystem	52
3.5 Critères de qualité d’une transmission	52
3.5.1 Taux d’erreur binaire (Bite Error Rate BER).....	53
3.5.2 Facteur de qualité	53
3.5.3 Diagramme de l’œil.....	53
3.6 Le système de transmission OFDM.....	54
3.6.1 Partie émission	56
3.6.2 Partie transmission.....	58
3.6.3 Partie réception.....	58
3.6.4 Résultat de simulation	62
3.7 Effet de variation d’espacement en longueur d’onde	64
3.8 Conclusion	68
Conclusion générale	70
Références bibliographiques	72

Listes des figures

Figure 1.1 :	Schéma d'une liaison optique.	4
Figure 1.2 :	Câble de fibre optique.	5
Figure 1.3 :	Structure de la fibre optique.....	5
Figure 1.4 :	Compositions de la fibre Optiques	6
Figure 1.5 :	Angle d'acceptance.....	6
Figure 1.6 :	Profil d'indice de réfraction et vue en coupe d'une fibre optique multimode à saut d'indice.....	7
Figure 1.7 :	Profil d'indice de réfraction et vue en coupe d'une fibre optique Multimode à gradient d'indice.....	8
Figure 1.8 :	La propagation du signal dans une fibre monomode.	8
Figure 1.9 :	Les pertes de propagation de la fibre optiques... ..	9
Figure 1.10 :	Phénomène de la dispersion dans une fibre optique.....	10
Figure 1.11 :	Dispersion modale, propagation d'un mode rapide et d'un mode lent.....	11
Figure 1.12 :	La dispersion chromatique.....	12
Figure 1.13 :	Schéma d'un récepteur de données à détection directe	15
Figure 1.14 :	Structure de base d'une photodiode PIN.....	16
Figure 1.15 :	Photodiode a avalanche.....	17
Figure 1.16 :	Schéma d'une liaison qui contient des amplificateurs optiques	18
Figure 1.17 :	Transmetteur optique (modulation cohérente)	20
Figure 1.18 :	Récepteurs optique (détection hétérodyne)	21
Figure 1.19 :	Classifications de la communication optique cohérente.....	22
Figure 2.1 :	Multiplexeur/Démultiplexeur en longueur d'onde.....	25
Figure 2.2 :	La technique d'accès multiple TDM.....	26
Figure 2.3 :	Réseau local à répartition temporelle.	26
Figure 2.4 :	Schéma de principe du multiplexage ETDM.....	27
Figure 2.5 :	La technique d'accès multiple FDM.....	28

Figure 2.6:	La technique d'accès multiple CDM.	28
Figure 2.7:	Transport de plusieurs longueurs d'onde sur une seule fibre.....	29
Figure 2.8:	Principe d'une liaison WDM.....	29
Figure 2.9:	Les composants d'un système WDM.	31
Figure 2.10:	Multiplexeur à insertion/extraction.	32
Figure 2.11:	Schéma de principe d'un brasseur optique.....	33
Figure 2.12:	Convertisseur de longueur d'onde Optoélectronique.....	34
Figure 2.13:	Schéma de principe de trajets multiples.....	36
Figure 2.14:	Constellation de la modulation de phase QPSK.....	38
Figure 2.15:	Constellation de la modulation d'amplitude 16-QAM.....	38
Figure 2.16:	Principe d'orthogonalité des sous porteuses en OFDM.....	40
Figure 2.17:	Répartition fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM.....	41
Figure 2.18:	Schéma principal du l'OFDM.	42
Figure 2.19:	Schéma de principe du modulateur OFDM.....	42
Figure 2.20:	Schéma de principe du démodulateur OFDM.....	43
Figure 2.21:	Insertion du préfixe cyclique.....	45
Figure 2.22:	Technique d'accès multiple OFDMA.....	45
Figure 3.1:	Schéma de l'interface Optisystem	51
Figure 3.2:	Diagramme de l'œil.....	54
Figure 3.3:	Schéma général de la liaison OFDM basé sur WDM.....	55
Figure 3.4:	Schéma en bloc d'émission.....	56
Figure 3.5:	Schéma en bloc canal de transmission.....	58
Figure 3.6:	le schéma en bloc de la partie réception.....	59
Figure 3.7:	Schéma en bloc du sous-système dans la partie réception.....	60
Figure 3.8:	Le schéma en bloc de la détection cohérente dans la partie réception..	61
Figure 3.9:	Représentation fréquentielle du signal de sortie du multiplexeur.....	63
Figure 3.10:	Représentation temporelle du signal de sortie du multiplexeur.....	63
Figure 3.11:	Variation du facteur du qualité Q(dB) en fonction du débit (Gbit/s) pour canal 2	64

Figure 3.12 : Variation du facteur du qualité $Q(\text{dB})$ en fonction de la distance
(Km).....65

Figure 3.13 : Variation du facteur du qualité $Q(\text{dB})$ en fonction de la distance
(Km).....66

Figure 3.14 : Le diagramme de l'œil du canal 1.....67

Figure 3.15: Le diagramme de l'œil du canal 2.....67

Listes des tableaux

Tableau 1.1 : Les avantages et les inconvénients de la fibre optique12

Tableau 1.2 : La différence entre la diode DL et la diode LED.....14

Tableau 1.3 : Comparaison des caractéristiques des photodiodes PIN et à avalanche.....17

Tableau 3.1 : Les paramètres primaires.....62

Listes des acronymes

A

APD Avalanche photodiode

B

BER Bite Error Rate

BPSK Binary phase shift keying.

C

CATV Cable Télévision.

CDM Code Division Multiplexing.

CDMA Code Division Multiplexing Access.

CP Préfixe cyclique

CW Laser Continuous Wave Laser

CWDM Coarse Wavelength Division Multiplexing

D

DEMUX Démultiplexeur.

DFB Distributed Feed-Back

DFT Discret Fourier Transform

Di Dispersion intermodale.

DL Diode Laser.

DSL Digital Subscriber Line.

DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing

E

EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier

ETDM Electronic Time Division Multiplexing

F

FDM Frequency Division Multiplexing.

FFT Fast Fourier Transform.

FSO Free Space Optics.

G

Gb Gigabit

I

ICI Inter Carrier Interférence

IEP Interférences Entre Porteuse

IES Interférences Entre Symboles.

IFFT Inverse Fast Fourier Transform

IM-DD Intensity Modulation Direct Detection

IP Internet Protocol.

ISI Inter Symbol Interference

L

LED Light Emitting Diode

LO Local Oscillator

Linb-MZM Linb-Mach zender Modulator

M

MAN	Metropolitan Area Network.
MB	Méga Bit
MUX	Multiplexeur
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MZ	Mach-Zender

N

NRZ	No Return to Zero
-----	-------------------

O

OADM	Optical Add Drop Multiplexing
OCH-DPRING	Optical Channel Dedicated Protection Ring
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OMS-SPRING	Optical Multiplex Section-Shared Protection Ring.
ON	Ouverture Numérique
OSA	Optical Spectrum Analyzer
OTDM	Optical Time Division Multiplexing
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer
OTM	Optical Terminal Multiplexer
OXC	Optical Cross Connect

P

PBS	Polarization Beam Splitter
PBC	Polarization Beam Combiner
PIN	Positive Intrinsic Negative
PLC	Planar Lightwave Circuit
PON	Passive Optical Network
PRBS	Pseudo-Random Bit Sequence
PSK	Phase Shift Keying.

Q

Q	Facteur de Qualité
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying

R

RZ	Return to Zero
----	----------------

S

SDH	Synchronous Digital Hierarchy.
SiO ₂	Dioxyde de silicium
SMF	Single Mode Fiber
SOA	Semiconductor Optical Amplifier

T

TDM	Time Division Multiplexing
TEB	Taux d'Erreur Binaire

U

U-DWDM Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing
UWB Ultra-Wide Band

V

VOA Variable Optical Attenuator

W

WDM Wavelength Division Multiplexing
WLAN Wireless Local Area Network
WWDM Wide Wavelength Division Multiplexing.



Introduction générale

Introduction générale

Le rôle des télécommunications réside dans la transmission d'informations sur de longues distances, facilitant ainsi la communication entre individus, organisations et systèmes informatiques. Les télécommunications impliquent l'échange d'informations à grande distance, tandis que la fibre optique permet spécifiquement la transmission de lumière à travers des câbles en verre ou en plastique.

La fibre optique est devenue une technologie largement adoptée en raison de sa capacité à transmettre de grandes quantités de données à des vitesses élevées. Comparée aux câbles en cuivre traditionnels, elle présente de nombreux avantages tels qu'une plus grande capacité de transmission, une meilleure qualité de signal et une plus grande immunité aux interférences électromagnétiques.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre décrit les trois composantes d'une liaison fibre optique, en commençant par une brève définition de la liaison optique. Ensuite, nous définissons la fibre optique, son fonctionnement, ses différents types, ainsi que ses avantages et inconvénients. Nous abordons ensuite la partie émission, en fournissant des définitions simples des sources lumineuses et en comparant deux types de diodes (DL et LED). La section réception présente ensuite une définition simple de deux types de photodiodes (APD et Avalanche PIN). Nous concluons ce chapitre en présentant les amplificateurs optiques, leur fonctionnement et les différents types disponibles.

Le deuxième chapitre se focalise sur l'étude d'un ensemble de techniques de multiplexage utilisées dans les systèmes de transmission optique, en particulier le multiplexage par répartition en longueur d'onde WDM, (Wavelength Division Multiplexing), ainsi que les diverses solutions pour augmenter la capacité d'un système WDM. Nous abordons également les convertisseurs optiques et les différentes applications de la technologie WDM. Ensuite, nous examinons la technique de modulation OFDM et le concept de multi porteuse, d'intervalle de garde, etc.

Le dernier chapitre est dédié à la présentation du logiciel Optisystem. Nous procédons ensuite à la simulation de la technologie OFDM basée sur WDM avec une détection cohérente, en fournissant les résultats du taux d'erreur binaire (BER), du facteur de qualité et du diagramme de l'œil pour évaluer la qualité de transmission par canal.



Chapitre 1

Etude d'une liaison optique

1.1 Introduction

Les systèmes de communication optique peuvent être classés en deux catégories distinctes : les systèmes non guidés, où un signal optique est émis depuis un émetteur vers un récepteur en se propageant dans l'espace libre, et les systèmes guidés, qui utilisent un support (principalement la fibre optique) pour acheminer le signal optique de l'émetteur au récepteur.

L'apparition de la fibre optique a engendré une révolution dans le domaine des télécommunications. Cela a entraîné une perturbation du réseau de télécommunications existant, nécessitant la construction de nouvelles infrastructures.

Ce chapitre se concentre sur les différents composants optiques et optoélectroniques qui constituent une liaison optique. Il explique leur fonction et leurs limites de fonctionnement, tout en décrivant les différentes méthodes utilisées pour la modulation du signal.

1.2 Définition d'une liaison par fibre optique

La communication optique est basée sur la transmission d'informations d'un point à un autre sous forme de lumière à travers des guides d'ondes diélectriques. Un émetteur (source laser) est utilisé pour convertir l'information à transmettre d'un signal électrique en un signal optique, qui est ensuite injecté dans une fibre optique. A la réception, le signal est traité en sens inverse, c'est-à-dire qu'il est converti de lumière en lumière à l'aide d'un récepteur (photodétecteur).

Pour les longues distances, des amplificateurs optiques (régénérateurs) sont utilisés pour maintenir les niveaux de signal nécessaires à la récupération de l'information.

Pour transmettre les photons qui composent un signal, l'utilisation d'une fibre optique nécessite une double conversion :

Au départ, le signal électrique est converti en signal lumineux et injecté dans la fibre optique, le cheminement du signal étant assuré par divers équipements tels

que commutateurs, coupleurs, dérivateurs, etc. Avec l'arrivée, le signal lumineux affaibli est reconverti en signal électrique [1].

Dans figure1.1 on trouve une liaison point à point comme dans un réseau :

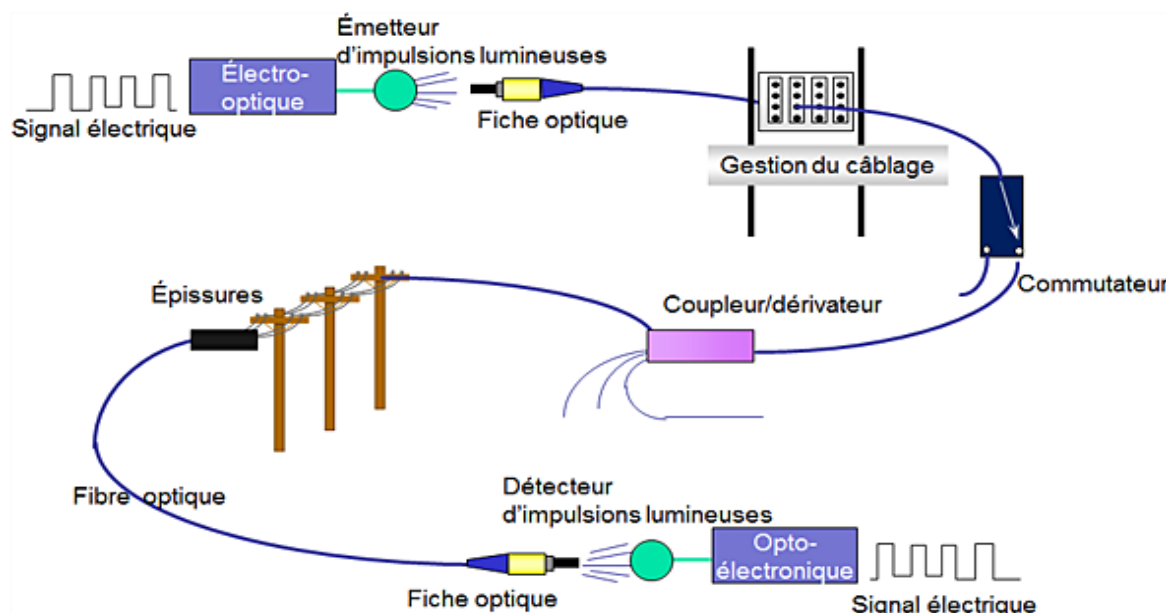


Figure1.1 : Schéma d'une liaison optique [1].

1.3 Définition d'une fibre optique

Une fibre optique est un fil extrêmement fin, fabriqué en verre ou en plastique, qui présente la particularité de pouvoir conduire la lumière. Elle est utilisée pour transmettre des données à l'aide de la lumière. Les débits de données qu'elle permet sont bien supérieurs à ceux du câble coaxial, ce qui en fait un support idéal pour les réseaux à large bande passante, sur lesquels transitent la télévision, le téléphone, la vidéoconférence et les données informatiques. Les fibres optiques offrent la possibilité de transporter la lumière sur de longues distances, atteignant parfois plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres. Les signaux optiques, qui sont encodés par des variations d'intensité, sont capables de transmettre d'importantes quantités d'informations. La fibre optique est devenue un élément essentiel de la révolution des télécommunications en permettant des communications à des vitesses inégalées sur de très longues distances [2].

La figure 1.2 présente câble de fibre optique.

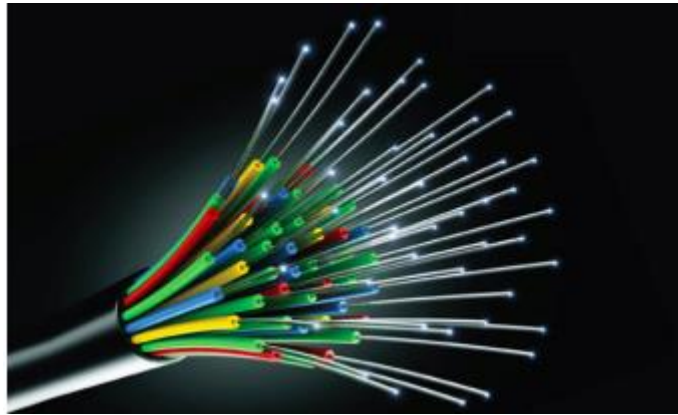


Figure 1.2 : Câble de fibre optique.

1.3.1 Structure de la fibre optique

Une fibre optique est un guide d'onde cylindrique en verre. Constituée d'une partie centrale appelée cœur d'indice de réfraction cœur n_1 entourée d'une autre partie appelée gaine d'indice de réfraction n_2 gaine plus faible. Le guidage de la lumière n'est possible que lorsque l'indice de réfraction n_1 du cœur est supérieur à l'indice de réfraction n_2 de la gaine.

La structure d'une fibre optique est présentée dans la figure 1.3 ci-dessous :

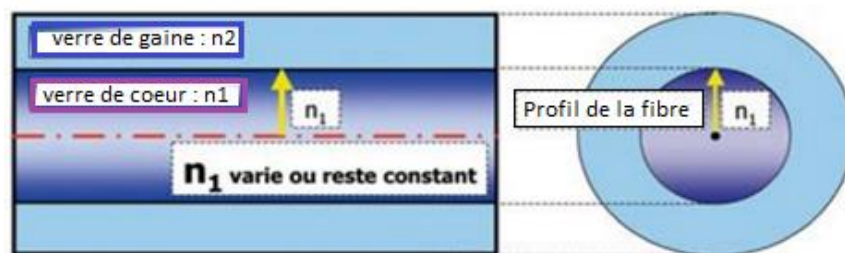


Figure1.3 : Structure de la fibre optique.

Classiquement une fibre est constituée de 3 parties :

- **Le cœur** : C'est la partie centrale de la fibre qui permet aux ondes lumineuses d'indice de réfraction n_1 de se propager.
- **La gaine** : C'est une couche entourant le cœur de la fibre d'indice de réfraction n_2 , généralement inférieur à celui du cœur, qui permet une réflexion totale et permanente des modes à l'interface cœur-gaine.

- **Le revêtement (le fourreau) :** Une couche de protection mécanique en plastique, isole des agents corrosifs du milieu extérieur et lui confère une grande souplesse [3].

La figure 1.4 montre les composants de ce conducteur :

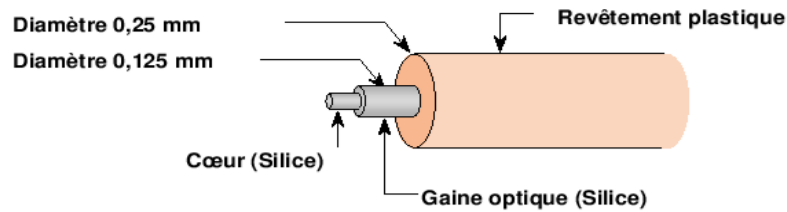


Figure 1.4 : Compositions de la fibre optique.

1.3.2 Le principe de fonctionnement de la fibre optique

Le principe de fonctionnement d'une fibre optique est basé sur multiples réflexions totales internes de la lumière à la surface de séparation des deux milieux [4]. Si $n_2 > n_1$ le rayon s'écarte de la normale et si $\theta_1 > \arcsin(n_2/n_1)$, il y a réflexion totale. Ce principe a été démontré par SNELL-DESCARTES qui a établi la relation suivante :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.1)$$

La figure 1.5 ci-dessous présente le rayon lumineux incident avec l'axe de la fibre pour rester guidé dans celle-ci.

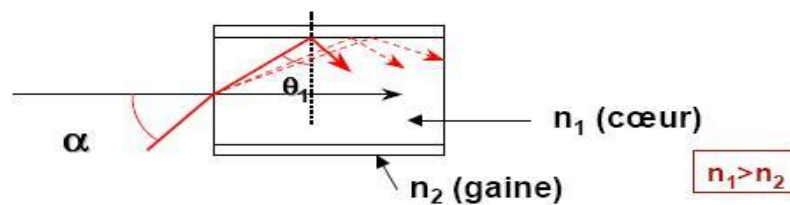


Figure 1.5 : Angle d'acceptance.

L'angle d'incidence maximal (α_{max}) à l'entrée d'une fibre c'est-à-dire l'ouverture numérique est définie par la relation suivante : [5]

$$ON = \sin \alpha_{max} = n_1 \left(\sin \frac{\pi}{2} - \theta_{lim} \right) = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (1.2)$$

1.3.3 Différents types de fibres optiques

Les fibres optiques peuvent être divisées en deux catégories qui sont : Fibres multimodes et fibres monomodes.

1.3.3.1 Fibre optique multimode

La fibre multimode est un type de câble optique qui permet à plusieurs signaux lumineux de passer en même temps grâce à son grand diamètre. Cela signifie que plusieurs informations peuvent être transmises à travers ces câbles, mais elles peuvent arriver à la fin du câble à des moments différents en fonction de la façon dont elles se déplacent à l'intérieur de la fibre.

Elle est principalement utilisée pour des distances courtes et est souvent utilisée dans les réseaux privés. La fibre multimode comprend deux types : la fibre à gradient d'indice (qui a une limite de vitesse de 1 Gb/s) et la fibre à saut d'indice (qui a une limite de vitesse de 50 Mb/s) [6].

a) Fibres multimodes à saut d'indice

La fibre multimode à saut d'indice est le type de fibre le plus utilisé pour faire passer beaucoup de lumière en la faisant rebondir à l'intérieur. Le nombre de rebonds dépend de l'angle d'entrée de la lumière. La lumière rebondit à l'intérieur grâce aux différences entre les indices de réfraction du cœur (partie centrale de la fibre) et de la gaine (enveloppe extérieure de la fibre), avec un indice de réfraction plus élevé dans le cœur. Les rayons lumineux arrivent au récepteur avec des délais différents, ce qui peut entraîner une dispersion de l'énergie du signal sur de longues distances.

Ces informations concernent principalement les caractéristiques de la fibre et n'indiquent pas de valeurs quantitatives spécifiques. Les longueurs d'onde utilisées dans ce type de fibre sont généralement de 850 nm et 1300 nm.

La figure 1.6 montre une très grande variation entre l'indice de réfraction du cœur et de la gaine optique.

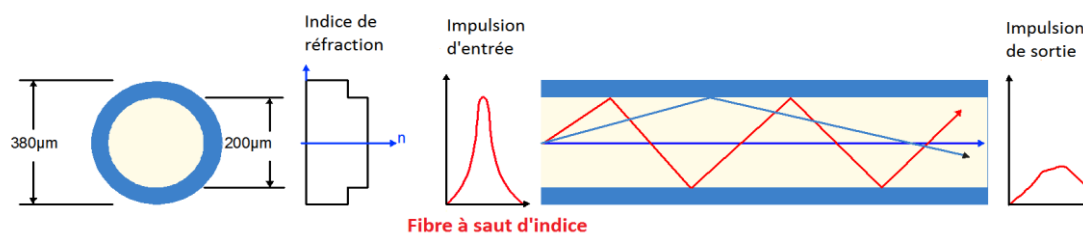


Figure 1.6 : Profil d'indice de réfraction et vue en coupe d'une fibre optique multimode à saut d'indice [7].

b) La fibre à gradient d'indice

Fibre à gradient d'indice multimode : La fibre à gradient d'indice a un cœur de taille moyenne, qui est également utilisée dans les réseaux locaux, et se caractérise par un petit diamètre de cœur. Les rayons lumineux à l'intérieur de la fibre à gradient d'indice se déplacent le long d'un trajet sinusoïdal. La variation de l'indice de réfraction du cœur est très faible autour de la valeur n_1 de $1,48 \mu\text{m}$, ce type de fibre permet de minimiser le transfert de mode [3].

La figure 1.7 montre les trajets sinusoïdaux de la fibre à gradient d'indice :

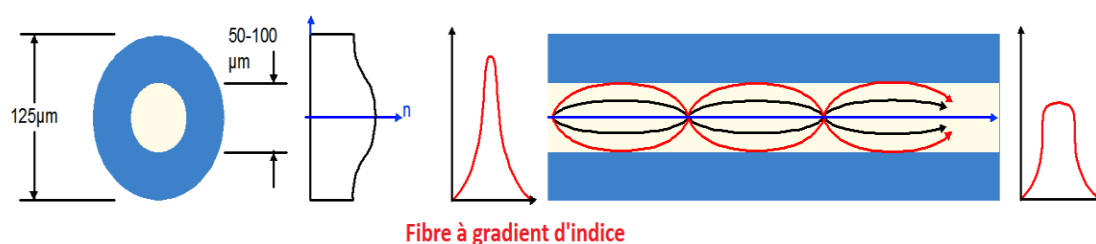


Figure1.7 : Profil d'indice de réfraction et vue en coupe d'une fibre optique

Multimode à gradient d'indice [7].

1.3.3.2 La fibre optique monomode

Fibre optique dans laquelle un seul mode de propagation peut être maintenu à une longueur d'onde donnée. Diamètre de revêtement identique à la norme multimode $125 \mu\text{m}$ et valeur de cœur d'environ $9 \mu\text{m}$. La fibre monomode a une portée jusqu'à 50 fois plus longue que la fibre multimode, ainsi qu'une bande passante beaucoup plus élevée. Pour cette raison, le trajet du faisceau lumineux ne change pas, pour ainsi dire. Peu de rebonds, donc peu de pertes. Pour cette raison, ce type de fibre est souvent réservé à la transmission sur de très longues distances [7].

La figure 1.8 montre le chemin unique emprunté par les rayons lumineux.

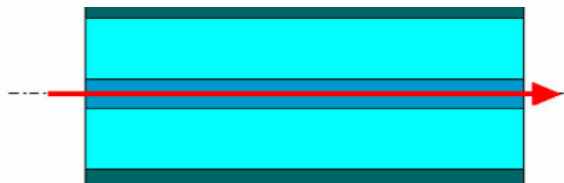


Figure1.8 : La propagation du signal dans une fibre monomode [8].

1.4 Atténuation

La perte de signal dans les fibres optiques est causée par différents mécanismes. Tout d'abord, l'absorption du matériau utilisé augmente rapidement les pertes aux longueurs d'onde courtes. Les impuretés présentes peuvent également créer des zones d'absorption supplémentaires. Dans le cas de la silice pure, les pertes devraient être minimales, atteignant 0,14 dB/km autour de la longueur d'onde 1,55 μm . De plus, les irrégularités involontaires de la structure entraînent des pertes par diffusion (diffusion Rayleigh). Les pertes peuvent également être causées par les conditions d'utilisation des fibres. Les courbures trop prononcées provoquent des pertes par rayonnement. Les micro-courbures, bien que très faibles, sont fréquentes et incontrôlables, dues à la manipulation des fibres dans les câbles. Ces pertes s'ajoutent aux pertes intrinsèques mais sont négligeables pour les fibres standard utilisées dans les télécommunications normales. Enfin, les fibres sont utilisées par tronçons de longueur limitée, qui sont connectés les uns aux autres. Chaque connexion peut provoquer une perte de signal [9].

L'allure typique de l'atténuation intrinsèque des fibres optiques, due aux phénomènes de diffusion et d'absorption, en fonction de la longueur d'onde est indiquée par la figure 1.9 :

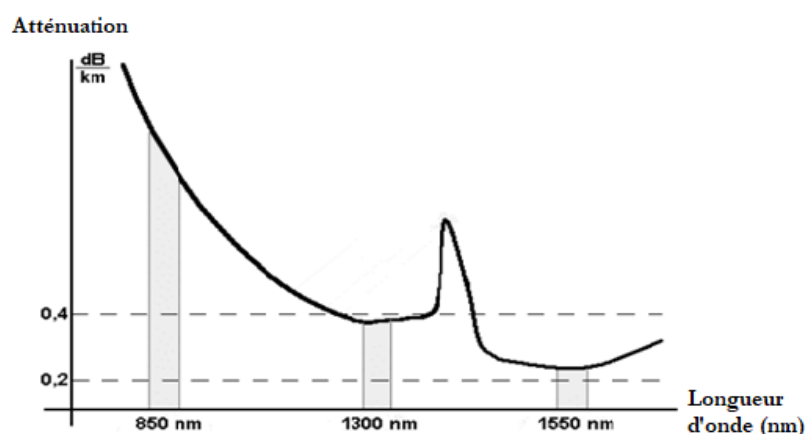


Figure 1.9 : les pertes de propagation de la fibre optiques [9].

L'atténuation minimale de 0,22 dB/km se rapproche du minimum théorique pour la silice. Cependant, cette différence s'explique par le fait qu'il n'est pas possible

d'utiliser de la silice pure. Il est nécessaire d'ajouter des dopants soit dans le cœur, soit dans la gaine de la fibre, ce qui entraîne des fluctuations de composition et donc une augmentation des pertes par diffusion [9].

1.5 La dispersion dans la fibre optique

La dispersion est un phénomène qui se produit lorsque la lumière se propage dans une fibre optique sous forme d'impulsions lumineuses. Lorsque ces impulsions de lumière se propagent sur de longues distances, elles ont tendance à s'élargir et à s'affaiblir. Cet élargissement limite la bande passante utile de la fibre optique. En d'autres termes, la dispersion est le phénomène qui cause la détérioration des signaux lumineux lors de leur transmission à travers la fibre optique [4].

Le schéma de la figure 1.10 ci-dessous représente les effets de la dispersion dans une fibre optique.

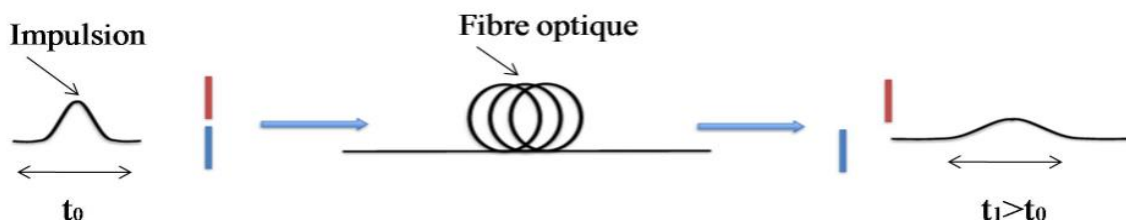


Figure 1.10 : Phénomène de la dispersion dans une fibre optique [10].

Il existe plusieurs phénomènes qui provoquent l'élargissement des impulsions lumineuses, parmi lesquels on compte la dispersion modale et la dispersion chromatique.

1.5.1 Dispersion modale

Le mode de dispersion est le mode principal, du fait de la dispersion dans les fibres multimodes, il limite la distance de propagation et la vitesse de transmission des informations. Intrinsèquement associé à la fibre multimode, il ne se produit pas avec la fibre monomode. La dispersion modale résulte de la différence de temps de transit de la lumière dans la fibre optique en fonction du chemin parcouru. Cela est dû à la différence de temps entre les trajets du rayon axial (mode rapide) et du rayon critique réfléchi (mode lent) comme le montre la figure 1.11 [10].

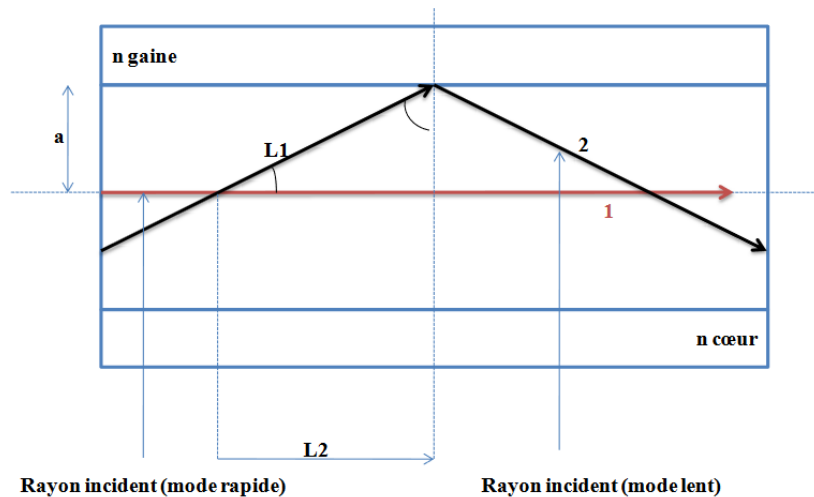


Figure 1.11 : Dispersion modale, propagation d'un mode rapide et d'un mode lent.

La dispersion intermodale D_i est définie par l'élargissement temporel maximum τ d'une impulsion par unité de longueur de fibre.

$$D_i = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} = \frac{\tau}{L} \quad (1.3)$$

Où t_{\max} et t_{\min} sont respectivement le temps de parcours du mode le plus lent et celui du mode le plus rapide .

1.5.2 Dispersion chromatique

Dans les fibres optiques monomodes dont le profil est à symétrie de révolution, la dispersion chromatique est la cause principale de l'élargissement d'impulsion. Elle résulte de la somme de deux effets : la dispersion propre au matériau D_{mat} et la dispersion du guidage D_{guidage} .

$$D_{\text{chrom}} = D_{\text{mat}} + D_{\text{guide}} \quad (1.4)$$

1.5.2.1 Dispersion de matière

Dans ce cas, le grossissement est dû au fait que l'indice de réfraction du verre n'est pas le même pour toutes les longueurs d'onde. Ce type de dispersion se produit dans la fibre monomode ou multimode.

1.5.2.2 Dispersion des guidages

Ceci est particulièrement important avec les fibres optiques monomodes car une partie de la lumière pénètre dans la gaine sous différents angles et à différentes

profondeurs. Cela est dû à la différence d'indice relative, qui dépend également de la longueur d'onde.

Le signal électrique est ensuite analysé pour déterminer la quantité de dispersion chromatique dans la fibre optique. Cette analyse peut être effectuée à l'aide d'un oscilloscope, qui permet de visualiser la forme d'onde de l'impulsion lumineuse déformée, ou à l'aide d'un analyseur de spectre optique, qui permet de mesurer la séparation temporelle entre les différentes composantes spectrales de l'impulsion.

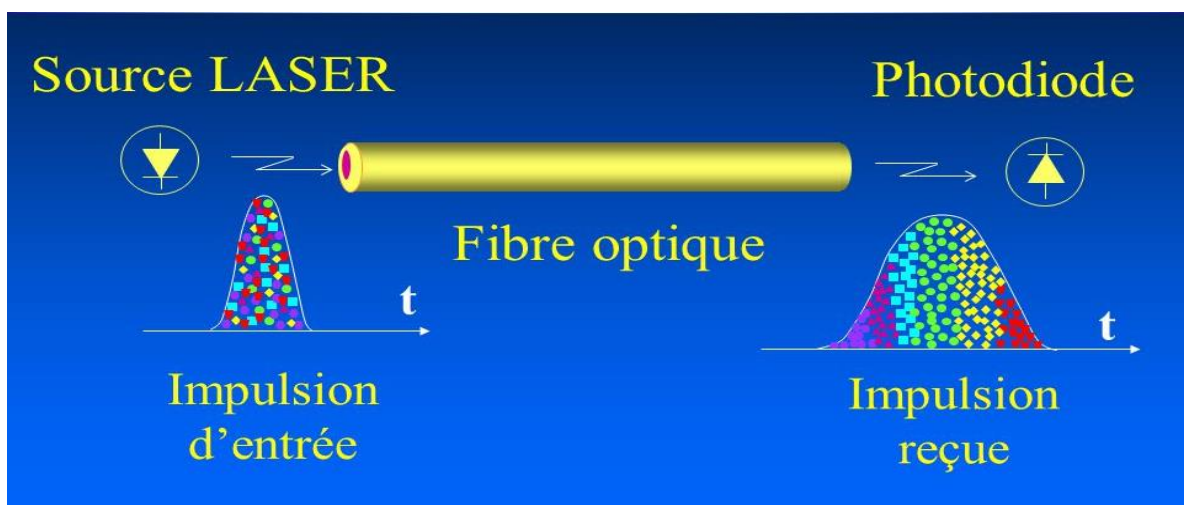


Figure 1.12 : La dispersion chromatique.

1.6 Avantages et inconvénients des fibres optiques

Le tableau 1.1 ci-dessous montre les avantages et les inconvénients de ce conducteur :

Les avantages	Les inconvénients
<ol style="list-style-type: none"> 1. Débits binaires élevés. 2. Large bande passante. 3. Affaiblissements minimisés. 4. Sécurité dans la transmission contre les intrus, facilement détectable. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coût d'exploitation élevé. 2. La difficulté de raccordements. 3. Le câble ne doit pas dépasser une certaine longueur. 4. Perte de raccordement entre différents composants optiques du système.

Tableau 1.1 : les avantages et les inconvénients de la fibre optique [11].

1.7 Partie émission d'une liaison optique

Son rôle est de fournir à la fibre optique un signal sur lequel des données sont enregistrées. Plus précisément, il contient une source lumineuse (généralement un laser) et un système de modulation.

1.7.1 La source optique

Les sources optiques sont des composants actifs des communications par fibre optique. Leur fonction de base est la conversion de l'énergie électrique en énergie optique (conversion électro-optique).

Dans les télécommunications optiques, la nécessité d'utiliser des bandes de plus en plus larges nécessite le choix de sources à bas spectre telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (LED) [12].

1.7.2 La diode DEL (électroluminescentes)

La diode électroluminescente (DEL) ou LED (Light Emitting Diode) est l'élément émetteur le plus simple. C'est une source incohérente et polychromatique, elle a un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directionnel, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes. Il se caractérise par un spectre typique d'émission spontanée, continue et assez large, d'où la grande sensibilité à la dispersion chromatique [12].

1.7.3 Diode laser DL

Diode laser, également appelée rayonnement laser semi-conducteur) Une diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission sur de très longues distances, elle se caractérise par une faible amplitude spectrale et une large bande passante, Le spectre est longitudinal monomode [12].

1.7.4 La différence entre la diode DL et la diode LED

Bien que les LED et les lasers utilisent des jonctions PN et du courant pour émettre des photons et produire de la lumière visible, ils diffèrent sur certains points fondamentaux [12]. Dans le tableau suivant, on a résumé leurs principales différences :

	Diode DEL	Diode DL
Puissance	0.1 mW	1 mW
Puissance dans la fibre	0.01 mW	0.5 mW
Largeur du spectre	50 à 200 nm	1 nm
Rapidité de modulation	100 MHz	10 GHz
Durée de vie	100 ans	10 ans
Refroidissement	Non	Oui

Tableau 1.2 : la différence entre la diode DL et la diode LED [13].

1.8 La partie réception d'une liaison optique

De même que pour les modules d'émission, les modules de réception ont connu des avancées technologiques importantes.

1.8.1 Le récepteur optique

Le rôle du récepteur est de convertir au mieux le signal optique en signal électrique. Ce module se compose généralement de trois parties :

Premier étage : consiste en un photodétecteur avec un préamplificateur conçu pour rendre le photocourant généré suffisamment fort même lorsque le signal reçu est faible ou que le photodétecteur est insensible.

Deuxième étage : se compose d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre de réduction de bruit.

Troisième étage : pour la récupération de données, composé d'un circuit de décision et d'un circuit de récupération d'horloge (circuit de temporisation) (Voir la figure 1.13) [9].

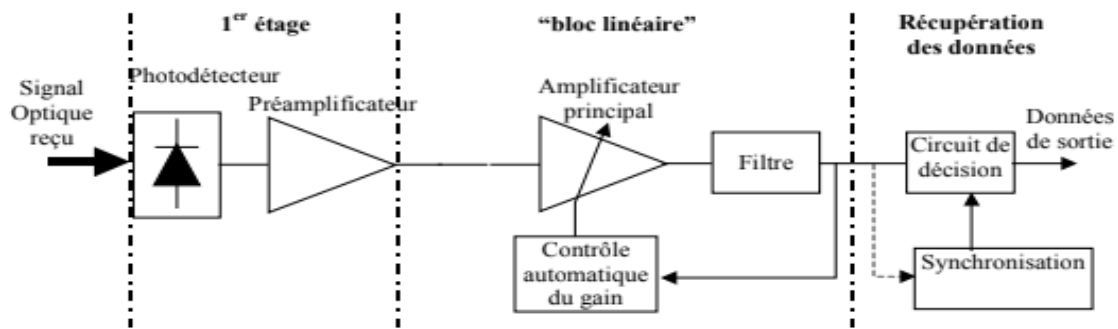


Figure 1.13 : Schéma d'un récepteur de données à détection directe [9].

1.8.2 Le photodétecteur

Le photodétecteur est l'élément le plus important de la chaîne de réception, convertissant le signal optique de la fibre en courant électrique et le traitant pour extraire les données binaires transmises.

Les deux types de photodiodes les plus utilisées dans la chaîne de détection sont les photodiodes à semi-conducteur PIN et APD. Ils ont l'avantage d'être très rapides, faciles à utiliser [9].

A- Principe de fonctionnement de la photo-détection

La photodiode est un composant à base de matériaux semi-conducteurs. Dans son principe, les photons qu'elle reçoit, est absorbée en favorisant des transitions des électrons de la bande de valence du semi-conducteur vers sa bande de conduction [14].

B- Caractéristiques de photodétecteur

Les photodétecteurs se caractérisent par :

- ✓ Coefficient d'absorption α : Il détermine les performances du photodétecteur, il dépend du matériau utilisé et de la longueur d'onde.
- ✓ Efficacité quantique η : C'est le rapport du nombre de paires de porteurs « photo générés et collectés » sur le nombre de photons incidents. Il ne peut pas être supérieur à 1, et il augmente avec l'épaisseur de la zone d'absorption ;
- ✓ Sensibilité S : définit le rapport du photo-courant I_{ph} au flux d'énergie reçu (ou puissance optique P_{opt}), exprimé en ampères par watt (A/W) [15].

1.8.2.1 La photodiode PIN

Le photodétecteur PIN se compose de trois régions, où l'absorbant est la région intrinsèque entre deux régions transparentes dopées respectivement en N et P. Les photodiodes sont utilisées dans les assemblages polarisés en inverse. L'absorption des photons dans cette région produit des paires électron-trou qui se séparent sous l'action d'un champ électrique : les électrons sont transportés vers la région dopée N, et les trous sont transportés vers la région dopée P comme montre la figure 1.14 [14].

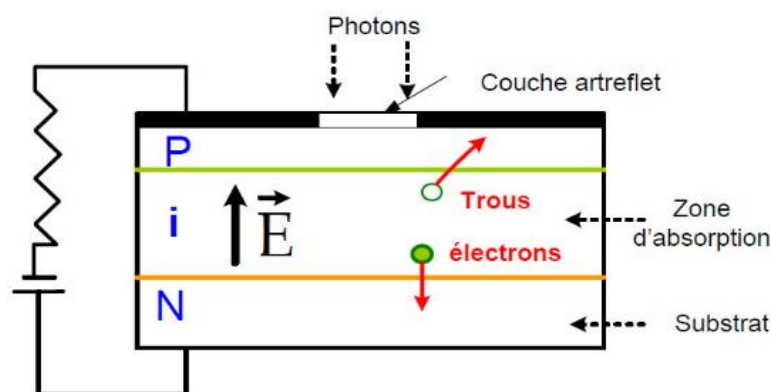


Figure 1.14: Structure de base d'une photodiode PIN [15].

1.8.2.2 Le photodétecteur à avalanche (APD)

Si nous prenons une diode PIN mais que nous lui appliquons une tension inverse élevée, nous obtenons un fort champ électrique dans la région intrinsèque (également appelée région semi-isolante). Si le champ électrique est suffisamment fort, la charge générée dans la région semi-isolante peut acquérir suffisamment d'énergie pour ioniser les atomes neutres. De cette manière, une nouvelle paire électron-trou est créée. Pour chaque paire produite par absorption de photons, on obtient ainsi M paires au total : on dit qu'il y a multiplication des paires électron-trou par avalanche. La figure 1.15 montre le principe d'une photodiode à avalanche [5].

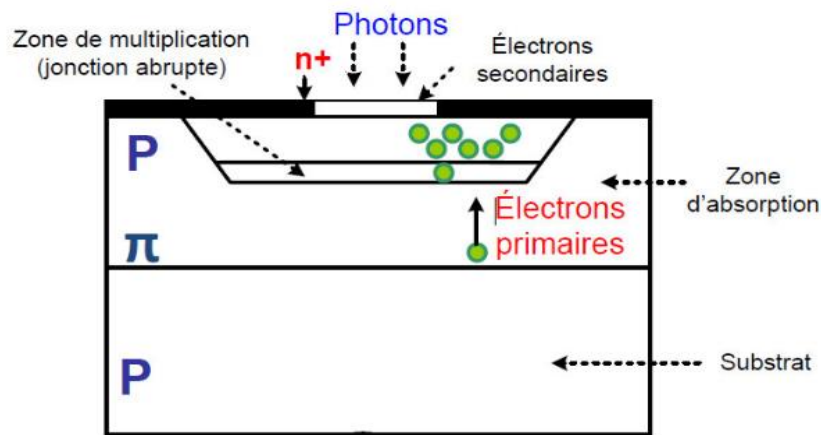


Figure 1.15 : Photodiode à avalanche.

On compare les caractéristiques des photodiodes PIN et à avalanche dans le tableau suivant :

Types de photodiode caractéristiques	Photodiodes	
	PIN	A avalanche
Tension de commande (v)	Faible	Elevé
Fréquence de coupure (GHZ)	>60	Quelque
Rendement quantique (%)	Faible	Elevé
Bande passante (GHZ)	Large	Faible
Longueur d'onde (nm)	1300 et 1550	1300 et 1550

Tableau 1.3 : Comparaison des caractéristiques des photodiodes PIN et à avalanche [16].

1.9 L'amplificateur optique

Il s'agit d'un équipement important pour la communication optique et le déploiement de la physique laser. L'amplificateur optique peut amplifier directement le signal d'éclairage sans avoir besoin de convertir d'abord le signal d'éclairage en un

signal électrique. Il est considéré comme un laser sans cavité optique ou sortant de la cavité vide. Les amplificateurs optiques sont généralement installés par endroits avec des signaux de lumière inférieurs et doivent être améliorés. Cela garantit une transmission stable de signaux optiques dans le reste du câble [17].

1.9.1 Fonctions de l'amplificateur optique

Un amplificateur optique peut être considéré comme un laser sans cavité optique dans laquelle la rétroaction de la cavité est supprimée. Les amplificateurs optiques à fibres sont importants dans la communication optique et la physique des lasers.

Il existe plusieurs mécanismes physiques différents qui peuvent être utilisés pour amplifier un signal lumineux. Ils correspondent aux principaux types d'amplificateurs optiques. Ainsi, dans des amplificateurs à fibre dopée et lasers en vrac, l'émission stimulée dans l'amplificateur de milieu de gain provoque l'amplification optique de la lumière entrante.

Nous avons aussi les amplificateurs optiques semi-conducteurs qui utilisent un semi-conducteur pour fournir le milieu de gain. Il existe des amplificateurs Raman. La diffusion Raman de la lumière entrante avec des phonons dans le réseau du milieu de gain produit des photons cohérents avec les flux de photons entrants. Enfin, les amplificateurs paramétriques utilisent l'amplification paramétrique [16]. Comme le montre la figure 1.16

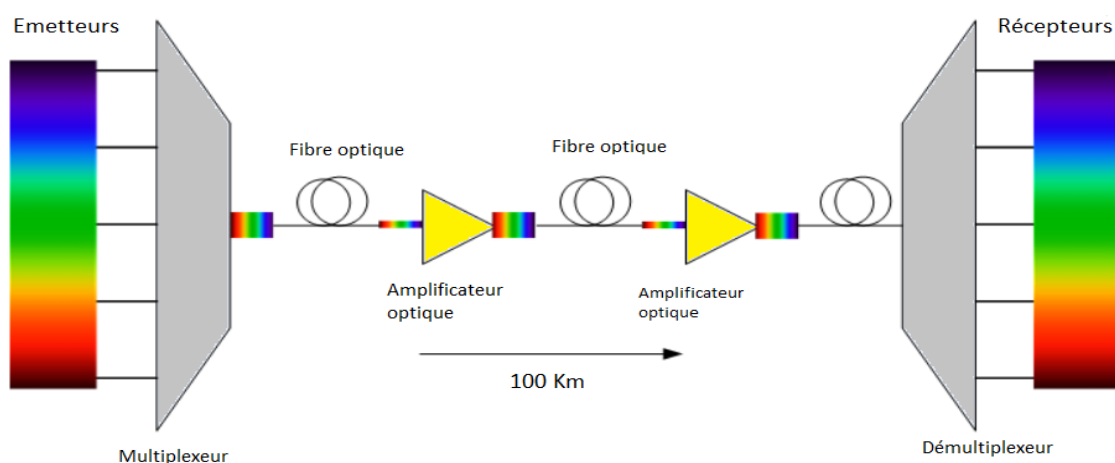


Figure 1.16 : schéma d'une liaison qui contient des amplificateurs optiques

1.9.2 Les types d'amplificateurs optiques

1.9.2.1 Amplificateur optique à semi-conducteur (SOA)

Semi-conducteur ou l'amplificateur optique SOA est un amplificateur optique basé sur le gain de semi-conducteur. La lumière est envoyée par le guide semi-conducteur avec des dimensions transversales. SOA est généralement connecté à la libération du réflecteur 1310 nm pour amplifier le niveau de signal avant d'entrer dans la fibre. Il prend en charge tous les formats de signal de longueur d'onde 1310 nm et est compatible avec tous les flux de données. Par conséquent, SOA est une solution idéale pour l'optique du réseau DWDM.

1.9.2.2 Amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA)

À l'heure actuelle, les amplificateurs de fibres Erbium ou EDFA sont les amplificateurs optiques les plus utilisés pour la communication à longues fibres. Sa fibre optique (généralement des fibres unitaires) est dopée avec des éléments de terres rares pour absorber la lumière à la fréquence et transmettre la lumière à une autre fréquence. Pomper la lumière de la diode laser, la longueur d'onde est d'environ 980 nm, et parfois environ 1480 nm. EDFA a les avantages d'un gain élevé, d'une large largeur de bande, d'une puissance de sortie élevée, d'une livraison élevée de pompe, d'insertion de faibles pertes et d'un état de polarisation ce qui s'avère être une bonne solution pour les applications DWDM, CATV et SDH.

1.9.2.3 Comparaison des amplificateurs

Les amplificateurs de semi-conducteurs sont rarement utilisés dans les systèmes de transmission. En revanche, les amplificateurs EDFA offrent plusieurs avantages pour la communication à une longueur d'onde inférieure à 1,55 μm . Contrairement aux amplificateurs SOA, ils ont des pertes d'insertion plus faibles, une distorsion du signal réduite, un gain plus élevé et ne sont pas sensibles à la polarisation de la lumière. Cependant, leur inconvénient majeur est qu'ils ne peuvent amplifier qu'à environ 1550 nm. Les nouveaux amplificateurs Raman sont une solution pour

résoudre ces problèmes, car ils offrent une amplification puissante et des bandes à faible bruit. [17].

1.10 Principes techniques de la communication optique cohérente

Dans les systèmes de communication optique cohérents, en plus de la modulation d'amplitude de la lumière, une modulation externe peut également être utilisée pour fournir une modulation de fréquence et de phase telle que PSK, QPSK et QAM. L'ajout de ces schémas de modulation permet non seulement d'augmenter la capacité d'information (un symbole peut représenter plusieurs bits), mais il offre également une grande flexibilité pour des applications d'ingénierie variées.

La figure 1.17 détaille un schéma de principe d'une modulation externe :

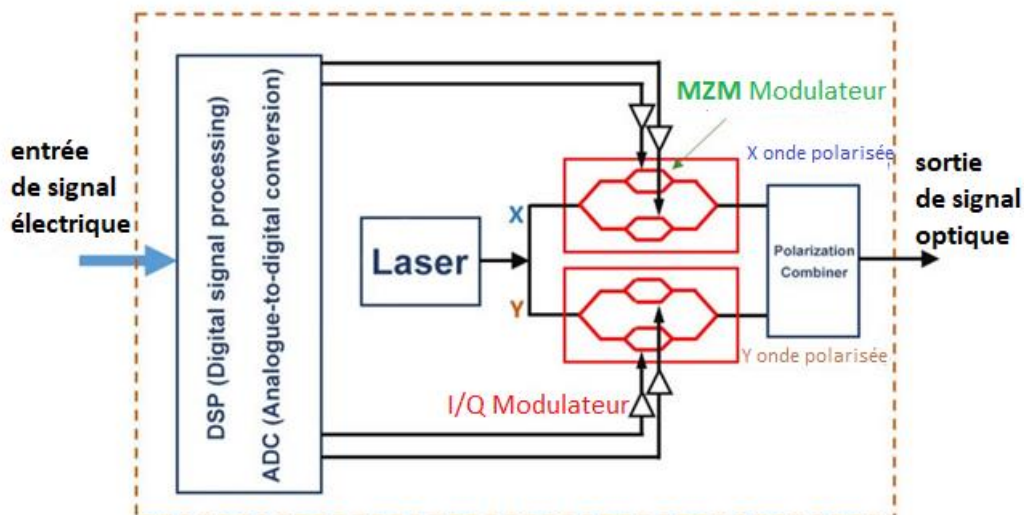


Figure 1.17 : Transmetteur optique (modulation cohérente)

Comme indiqué dans la figure (1.17), du côté de la transmission, on utilise une méthode de modulation externe où un modulateur IQ basé sur un modulateur Mach-Zehnder (MZM) est utilisé pour moduler le signal qui sera ensuite envoyé par le support optique.

C'est une connexion importante lors de l'entrée du côté réception. Tout d'abord, un signal laser (appelé lumière locale) généré par une oscillation locale est mélangé avec le signal optique d'entrée à l'aide d'un mélangeur optique. Cela permet d'obtenir

un signal à fréquence intermédiaire dont la fréquence, la phase et l'amplitude changent de la même manière que le signal optique initial.

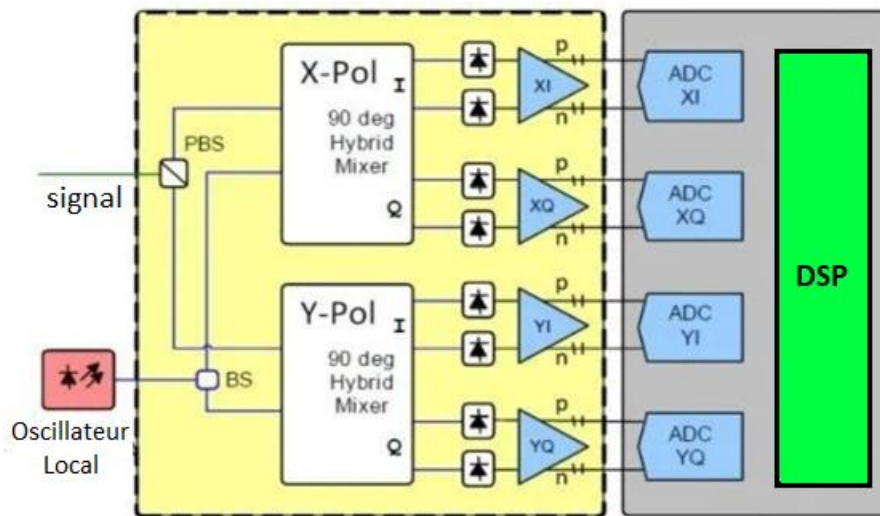


Figure 1.18: Récepteurs optique (détection hétérodyne).

Dans les systèmes de communication optique cohérente, le photocourant de sortie après le mélange cohérent dépend de la puissance optique du signal multipliée par la puissance optique de l'oscillateur local. Étant donné que la puissance de l'oscillateur local est beaucoup plus élevée que celle du signal, le photocourant de sortie est considérablement augmenté, ce qui améliore également la sensibilité de détection. En d'autres termes, dans la communication optique non cohérente, de nombreux amplificateurs sont utilisés pour transmettre et amplifier continuellement le signal tout au long du processus de transmission. En revanche, dans la communication optique cohérente, l'objectif principal est de transmettre directement le faible signal entrant à l'extrémité de réception. Après le mélange, la détection est effectuée à l'aide d'un récepteur symétrique. La communication optique cohérente peut être classée en détection hétérodyne, détection intradyne et détection homodyne en fonction de la relation entre la fréquence du signal optique de l'oscillateur local et la fréquence du signal optique. La figure 1.19 illustre les classifications de la communication optique.

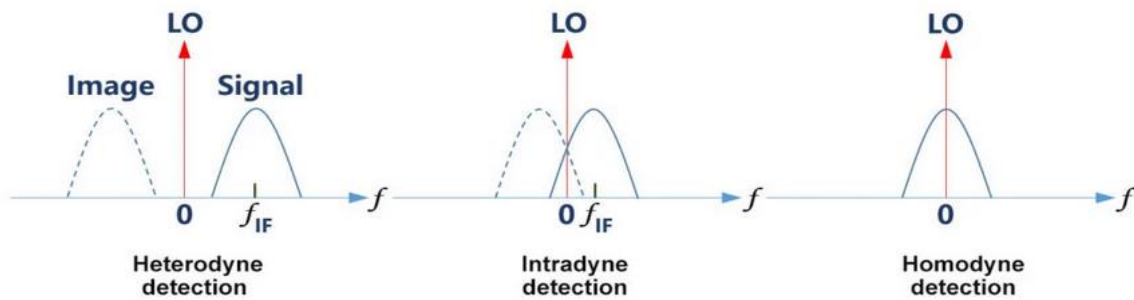


Figure 1.19 : Classifications de la communication optique cohérente.

Dans les systèmes de transmission optique cohérente avec détection hétérodyne, un photodétecteur est utilisé pour obtenir le signal à fréquence intermédiaire. Une deuxième démodulation est nécessaire pour convertir le signal en une forme en bande de base. Les méthodes de détection homodyne et intra-dyne sont les plus couramment utilisées car elles permettent de réduire le bruit et la surcharge de puissance lors du traitement ultérieur du signal numérique, ainsi que les exigences en termes d'équipement. Dans la communication optique cohérente avec détection homodyne, le signal optique est directement converti en signal en bande de base sans nécessiter de démodulation secondaire après avoir traversé le détecteur photoélectrique. Cependant, cela nécessite une correspondance précise entre la fréquence de la lumière locale et celle du signal optique, ce qui implique une synchronisation précise de la phase entre la lumière locale et le signal optique [18].

1.11 Conclusion

Ce chapitre a résumé les différentes strates du réseau de télécommunication par fibre optique. Les différents composants d'une liaison par fibre optique : source optique, fibre optiques (structure, principe de fonctionnement, ses différents types), récepteur optique (photodiode PIN et APD).

Ensuite, nous avons présenté les différents types d'amplificateurs utilisés dans les liaisons optiques, ainsi la détection directe et la détection cohérente.

Par la suite nous allons voir les différentes techniques de multiplexages utilisés dans les transmissions optiques avec leurs caractéristiques fondamentales.



Chapitre 2

Techniques d'accès multiple

2.1 Introduction

Avant l'avènement du multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing), l'augmentation de la capacité de transmission d'une liaison impliquait de multiplier les lignes de transmission et d'empiler les répéteurs-régénérateurs. Le WDM a bouleversé radicalement la situation. Désormais, une seule fibre optique suffit pour transporter simultanément plusieurs signaux sur des canaux différents. L'ensemble des répéteurs-régénérateurs d'un site géographique a été remplacé par un seul équipement : l'amplificateur optique. Ainsi, le WDM évite tous les coûts liés au génie civil et au déploiement de nouvelles fibres optiques.

Les techniques de multi porteuses consistent à envoyer plusieurs signaux numériques en même temps en les modulant sur plusieurs fréquences différentes. Ces techniques existent depuis longtemps et sont utilisées pour regrouper les signaux et les transmettre ensemble.

L'intérêt actuel réside dans l'amélioration de l'efficacité spectrale grâce à l'orthogonalisation des porteuses, ce qui permet d'obtenir une meilleure utilisation du spectre. Pour mettre en œuvre la modulation et la démodulation, on utilise des circuits performants basés sur une méthode mathématique appelée transformée de Fourier rapide (FFT) [19].

Ce chapitre se concentre sur une explication simple de la technique de multiplexage WDM et des principales fonctions des systèmes OFDM. Grâce au principe d'orthogonalité, les systèmes OFDM utilisent efficacement le spectre en répartissant les sous-porteuses. Ensuite, nous expliquerons ce qu'est-là modulation/démodulation OFDM, puis nous présenterons brièvement les caractéristiques principales des systèmes OFDM. Enfin, nous aborderons les avantages et les inconvénients principaux des systèmes OFDM.

2.2 Multiplexeur/Démultiplexeur

Les multiplexeurs et les démultiplexeurs optiques sont des dispositifs qui émettent de gérer simultanément de nombreux signaux optiques proches en fréquence.

2.2.1 Le multiplexeur

Consiste à regrouper sur une seule fibre optique de sortie les signaux optiques transportés par N longueurs d'onde (ou fréquences) optiques différentes, provenant de N fibres optiques d'entrée distinctes.

2.2.2 Le démultiplexeur

Consiste à séparer les N longueurs d'onde (ou fréquences) optiques qui se propagent dans la fibre optique d'entrée et de les distribuer sur N fibres optiques distinctes [20].

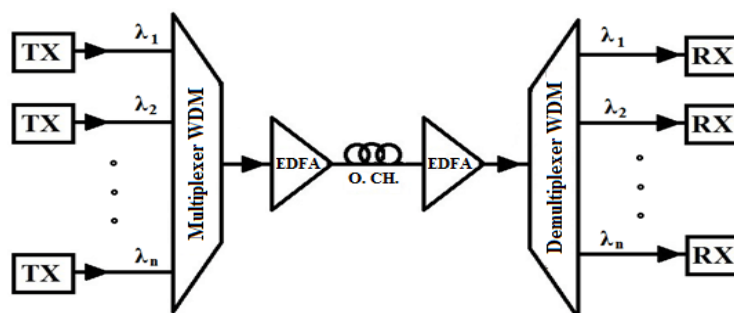


Figure 2.1 : Multiplexeur/Démultiplexeur en longueur d'onde [21].

2.3 Techniques de multiplexage

2.3.1 Le multiplexage temporel TDM

Le multiplexage par répartition dans le temps (TDM - Time Division Multiplexing) est une technique utilisée pour transmettre un signal sur un seul canal de communication en divisant le temps en créneaux - un créneau pour chaque signal de message.

Le multiplexage par répartition dans le temps est principalement utilisé pour les signaux numériques ainsi que pour les signaux analogiques, où plusieurs canaux à bas débit sont multiplexés dans des canaux à haut débit pour la transmission.

Le multiplexage par répartition dans le temps (TDM) est une autre méthode courante pour utiliser efficacement la capacité d'un canal physique.

Chaque utilisateur du canal se voit attribuer un petit intervalle de temps pendant lequel il peut transmettre un message. Ainsi, le temps total disponible dans le canal est divisé et chaque utilisateur se voit allouer un créneau horaire. Les données

de chaque utilisateur sont multiplexées dans une trame qui est transmise sur le canal [22].

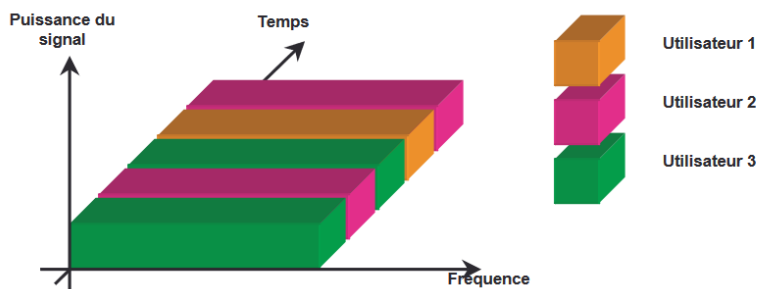


Figure 2.2 : la technique d'accès multiple TDM [23].

2.3.1.1 Optique (OTDM)

Le multiplexage temporel peut être réalisé de manière optique (OTDM, Optical Time Division Multiplexing). L'émetteur est constitué de N sources lumineuses modulées en parallèle à un débit de (bits/s).

Cette technique nécessite que le signal optique soit :

Le type RZ est ensuite codé de sorte que les impulsions codées ont maintenant une durée inférieure à T_b/N et peuvent être optiquement multiplexées sans chevauchement optique.

Le multiplexage temporel optique n'est pas seulement utilisé pour augmenter le débit de données de transmission. Il fournit également une technologie d'accès qui peut être utilisée dans les réseaux locaux. Le temps est partagé entre différents utilisateurs, chacun d'eux disposant d'un créneau horaire pour émettre. Différents signaux sont "combinés" pour être transmis sur une seule porteuse optique (Figure 2.3).

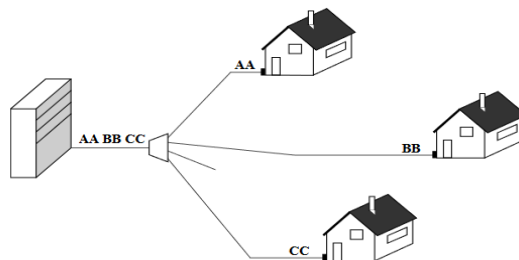


Figure 2.3 : Réseau local à répartition temporelle [9].

2.3.1.2 Electronique (ETDM)

L'OTDM a son équivalent en électronique, l'ETDM (Electronic Time Division Multiplexing). Dans le cas de l'ETDM, le codage RZ et « l'assemblage » des données se fait électriquement.

La vitesse élevée (haut débit) résultante est ensuite utilisée pour moduler le courant de polarisation de la diode laser et une seule lumière de diode est émise. Cette phase est représentée schématiquement sur la figure 2.4 par la présence de trois circuits électroniques et d'un multiplexeur électronique [9].

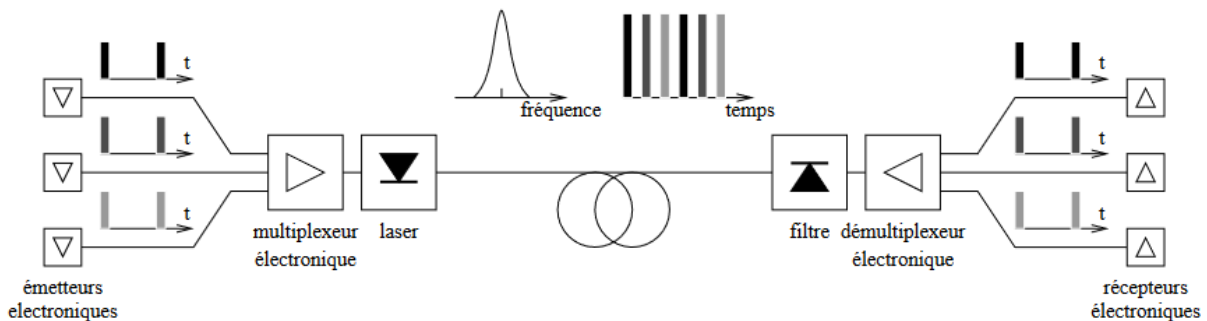


Figure 2.4 : Schéma de principe du multiplexage ETDM [24].

2.3.2 Le multiplexage temporel FDM

Le multiplexage par répartition en fréquence (FDM - Frequency Division Multiplexing) est une technique utilisée pour diviser la bande passante disponible en plusieurs canaux logiques indépendants de faible largeur de bande. Cette méthode consiste à utiliser plusieurs fréquences porteuses, chacune étant modulée par un signal vocal indépendant, ce qui correspond en fait au multiplexage par répartition en fréquence. Le multiplexage par répartition en fréquence (FDM) est également appelé multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM - Wavelength Division Multiplexing) lorsqu'il est utilisé dans les communications optiques où l'accent est mis sur la longueur d'onde plutôt que sur la fréquence [22].

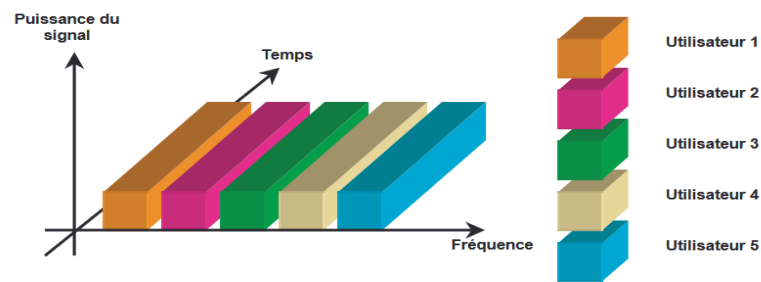


Figure 2.5 : la technique d'accès multiple FDM [23]

2.3.3 Le multiplexage temporel CDM

CDMA (Code Division Multiple Access) utilise la technologie de spectre étalé et un schéma de codage spécial (où chaque émetteur se voit attribuer un code généralement pseudo-aléatoire) pour permettre à plusieurs utilisateurs d'être multiplexés sur le même canal physique.

CDMA est une forme de signalisation à spectre étalé. Le signal codé modulé a une largeur de bande de données beaucoup plus élevée que les données elles-mêmes qui sont communiquées.

Cela permet à davantage d'utilisateurs de communiquer en même temps sur le même réseau que si chaque utilisateur avait attribué une plage de fréquences spécifique.

CDMA est une technologie numérique, donc les signaux analogiques doivent être numérisés avant d'être transmis sur le réseau [22].

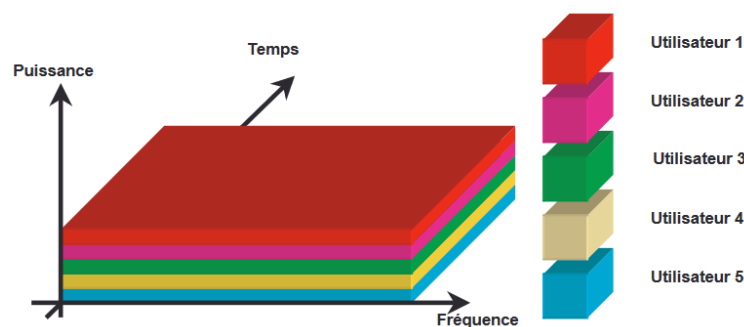


Figure 2.6: la technique d'accès multiple CDM [23].

2.3.4 Principe de WDM

WDM (Wavelength Division Multiplexing) est une technologie qui consiste à aligner simultanément un certain nombre de longueurs d'onde sur la même fibre.

Le principe de base est similaire à celui du multiplexage par répartition en fréquence (FDM). En d'autres termes, plusieurs signaux sont transmis en utilisant différentes fréquences porteuses, occupant des parties distinctes et non chevauchantes d'un spectre de fréquences [25].

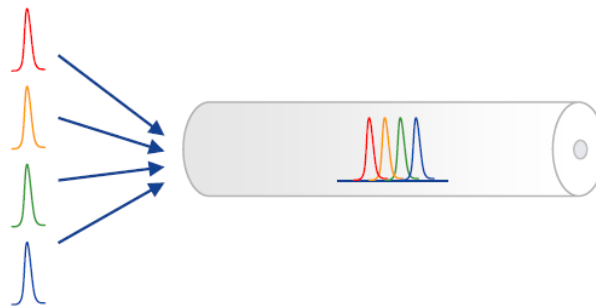


Figure 2.7 : Transport de plusieurs longueurs d'onde sur une seule fibre .

2.3.4.1 Fonctionnement du WDM

Le multiplexage WDM nécessite un réseau de diodes laser émettant à des longueurs d'onde différentes mais assez proches (environ 1550 nm). A la réception, un démultiplexeur optique sépare les différentes longueurs d'onde, ainsi converties en un domaine électronique au moyen de photodiodes. La figure montre un exemple de connexion qui illustre le multiplexage WDM [5].

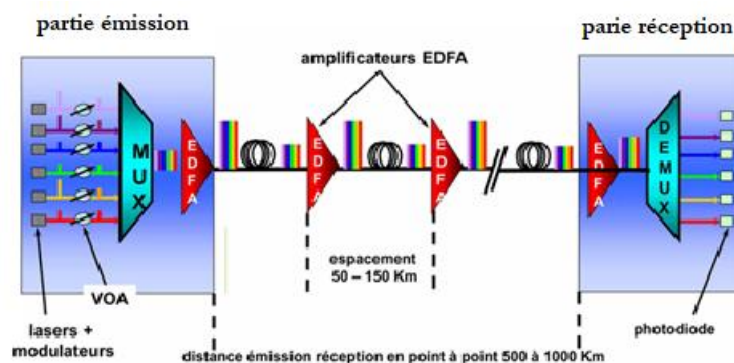


Figure 2.8 : principe d'une liaison WDM [26].

VOA : variable Optical Attenuator.

2.3.4.2 Types de systèmes WDM

a) DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) est une évolution du WDM. Il permet d'augmenter la densité des signaux optiques en combinant jusqu'à 160 longueurs d'onde différentes sur une seule fibre optique. Cela permet d'atteindre des débits de 300 à 400 Gbit/s. Les systèmes avec des espacements de 50 GHz (0,4 nm) et 25 GHz (0,2 nm) offrent respectivement 80 et 160 canaux optiques.

La technologie WDM est considérée comme "dense" lorsque la distance entre deux longueurs d'onde est égale ou inférieure à 100 GHz. Cependant, la technologie DWDM est assez coûteuse et est principalement utilisée pour les transmissions à longue distance. En pratique, cela signifie que de nombreux signaux à des fréquences très proches sont transmis sur la même fibre.

b) CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) utilise des longueurs d'onde allant de 1270 à 1610 nm, espacées régulièrement de 20 nm. Il permet d'utiliser jusqu'à 18 canaux optiques. Cette technologie est plus abordable et est souvent utilisée dans les réseaux locaux (MAN - Metropolitan Area Networks) [5].

2.4 Le développement des capacités

Afin d'accroître la capacité globale d'un système WDM, il est envisageable de manipuler à la fois le débit transporté par chaque canal et le nombre de canaux utilisés, voire les deux simultanément.

2.4.1 Augmentation du débit par canal

Les progrès de l'électronique à grande vitesse, l'intégration de composants électroniques et optiques, permettent un débit de traitement toujours plus élevé dans les dispositifs finaux. Alors que les premiers systèmes WDM fonctionnaient à 2,5 Gbit/s, il est rapidement devenu évident que les transmissions à 10 Gbit/s atteignaient les vitesses actuelles de 40 Gbit/s par canal. Mais cette augmentation du débit rend le signal de plus en plus sensible aux erreurs de propagation, tant linéaires que non linéaires. Ainsi, la dispersion chromatique (environ 16,5 Ps/(nm.km)) à 1550 nm pour

la fibre SMF-28), préjudiciable à la transmission de l'information, ne peut plus être sous-estimée et des solutions de compensation de la dispersion doivent être trouvées et développées. De même, l'apparition d'une puissance accrue injectée par et la dispersion modale de polarisation seront également des facteurs de dégradation très importants et leur influence doit être maîtrisée. Ces aspects feront l'objet de nos investigations plus loin dans le manuscrit.

2.4.2 Augmentation du nombre de canaux

Pour augmenter le nombre de canaux, on peut réduire l'écart entre les différentes longueurs d'onde tout en conservant la même bande passante. Cela se fait en utilisant un espacement de 50 GHz (ou 0,4 nm) voire de 25 GHz (0,2 nm). Ainsi, il est possible de transmettre des centaines de canaux sur la même bande ! Lorsque l'écart est inférieur à 100 GHz, on parle de technologie DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

Cette réduction de l'écart entre les longueurs d'onde exige également des exigences plus strictes en termes de stabilité des lasers et des filtres utilisés pour séparer les différents canaux dans le système [27].

2.5 Les composants d'un système WDM

La technologie WDM définit trois types de nœuds optiques qui peuvent être déployés dans un réseau de transport optique.

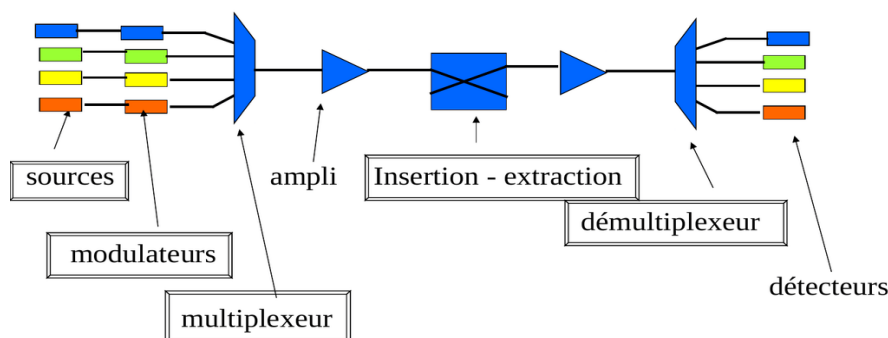


Figure 2.9 : Les composants d'un système WDM [28].

2.5.1 Les multiplexeurs terminaux optiques (Optical Terminal Multiplexer ou OTM)

Ces dispositifs essentiels sont utilisés pour créer un système WDM. Placés aux extrémités des fibres optiques, ils sont responsables de la détection et de la séparation des différentes longueurs d'onde. Les OTM (Optical Terminal Multiplexer) sont utilisés à l'entrée du réseau WDM pour permettre l'accès aux signaux provenant d'autres réseaux clients tels que SDH, Ethernet, IP/MPLS, DSL, etc., etc.

2.5.2 Les multiplexeurs à insertion/extraction optique (Optical Add Drop Multiplexer ou OADM)

Ces dispositifs sont utilisés pour ajouter (à la source) ou retirer (à la destination) une ou plusieurs longueurs d'onde dans une liaison WDM qui transporte plusieurs canaux optiques de différentes longueurs d'onde. Les modules OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) sont principalement utilisés pour créer des boucles dans les réseaux d'accès [24].

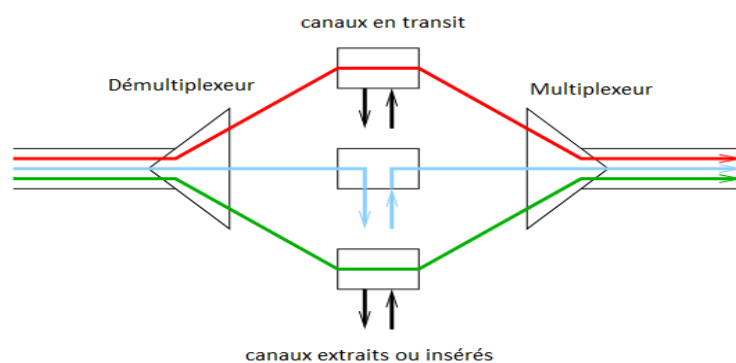


Figure 2.10 : Multiplexeur à insertion/extraction [24].

2.5.3 Les brasseurs optiques (Optical Cross Connect ou OXC)

Cet appareil assure la connexion dans les réseaux optiques WDM. Lorsque les longueurs d'onde sont multiplexées dans un nœud, l'OXC (Optical Cross-Connect) permet de remplacer une ou plusieurs de ces longueurs d'onde par d'autres provenant d'une autre fibre, avant de les multiplexer sur la fibre de sortie du nœud. On parle alors de "shuffling" de longueurs d'onde, car les différents canaux optiques entrant dans le nœud peuvent échanger leurs canaux avec une nouvelle distribution en sortie.

Les OXC sont principalement utilisés dans les réseaux WDM centraux. Les nœuds WDM peuvent être mis en place selon différentes topologies dans les réseaux de transport optique. En pratique, la topologie maillée est principalement utilisée dans les cœurs de réseau, car elle offre une meilleure stabilité en cas de défaillance d'un nœud. La topologie en anneau est principalement utilisée dans les réseaux de métro et d'accès.

Tout comme la technologie SDH, la technologie WDM comprend des mécanismes d'auto-guérison en anneau tels que l'OCH-DPRING (Optical Channel Dedicated Protection Ring) et l'OMS-SPRING (Optical Multiplex Section-Shared Protection Ring), qui permettent une restauration rapide des longueurs d'onde endommagées en cas de panne [25].

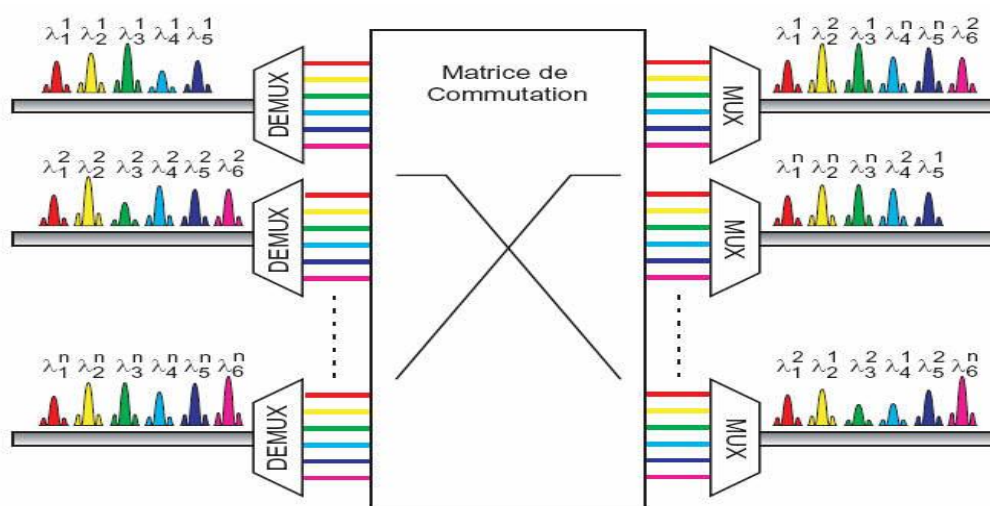


Figure 2.11 : schéma de principe d'un brasseur optique [29].

2.6 Convertisseurs optiques

Le convertisseur optique modifie la longueur d'onde du signal optique. Ce composant est donc très utile dans les réseaux multi-longueurs d'onde.

Il existe deux principaux types de technologies :

a) Conversion optoélectronique

Convertit un signal optique en un signal électrique puis émet un nouveau signal optique à une longueur d'onde différente. Cette technique est équivalente à la

régénération du signal, nous pouvons donc utiliser la régénération du signal pour modifier la longueur d'onde du signal optique. Les expériences ont été réalisées avec un débit de données de 10 Gbit/s.

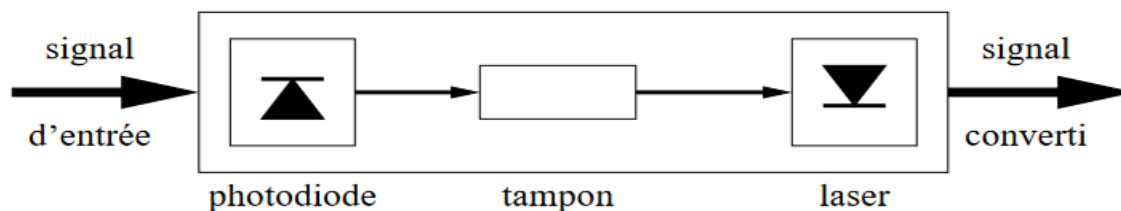


Figure 2.12 : Convertisseur de longueur d'onde Optoélectronique [24].

b) Conversion tout optique

Cette technique de conversion de longueur d'onde permet des débits de données plus élevés. Des expériences ont montré la faisabilité de convertisseurs tout optique fonctionnant à 40 Gbit/s [5].

2.7 Applications de la technologie WDM

Le principal objectif du WDM est de permettre le transport de débits très élevés sur une seule fibre optique à destination de plusieurs utilisateurs. Les systèmes actuels peuvent atteindre des capacités de 4×10 Gbit/s, 16×10 Gbit/s. Cependant, le véritable catalyseur du développement des systèmes de transmission WDM a été l'intégration de l'amplification optique. L'apparition des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) a permis d'amplifier simultanément tous les N canaux multiplex sans altérer le signal utile. Ainsi, l'envoi de N canaux sur une seule fibre au lieu de N fibres distinctes est devenu un avantage économique indéniable.

Au départ, l'espacement entre les canaux était d'environ 1 nm, mais avec l'avènement des lasers accordables de haute qualité sur le marché, on parle aujourd'hui de DWDM (WDM dense), où l'espacement des longueurs d'onde peut être progressivement réduit à 0,8 nm ou même 0,4 nm.

La deuxième application du WDM concerne les réseaux locaux. Chaque participant se voit attribuer une longueur d'onde, ou une "couleur". Cette méthode présente l'avantage que le réseau peut évoluer en permanence en ajoutant de

nouveaux services ou de nouveaux abonnés simplement en introduisant une nouvelle longueur d'onde [25].

2.8 Multiplexage OFDM

WDM est une technique FDM dans laquelle les porteuses ne sont généralement pas orthogonales. Une classe spéciale de FDM dans laquelle les porteuses (ou sous-porteuses) sont orthogonales est connue sous le nom de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM). Dans un système WDM, si l'espacement des canaux est inférieur à la bande passante des canaux, cela entraîne une diaphonie et une dégradation des performances. Cependant, dans un système OFDM, si la séparation entre les porteuses est inférieure à la largeur de bande des données dans chaque porteuse, il y a un chevauchement spectral significatif entre les canaux voisins et pourtant il n'y aurait pas de diaphonie ou de dégradation des performances en raison de la porteuse. Conditions d'orthogonalité [30].

2.8.1 Définition de La Technique OFDM

Les techniques de modulation multi porteuses consistent à moduler les données numériques sur un grand nombre de porteuses simultanément, ce qui constitue une forme de multiplexage en fréquence connue depuis longtemps. Le regain d'intérêt actuel pour ces techniques réside dans l'amélioration de leur efficacité spectrale en orthogonalisant les porteuses, ce qui permet une modulation et une démodulation efficaces à l'aide de circuits performants de transformée de Fourier rapide.

Le multiplexage en fréquence est bénéfique pour les transmissions dans des canaux sélectifs en fréquence qui présentent des trajets multiples [31].

L'OFDM est un système de transmission multi-porteuse qui transmet des blocs d'informations en synchronisant un certain nombre de sous-porteuses en temps et en fréquence. Cette synchronisation est nécessaire pour maintenir la nature orthogonale de l'OFDM [32].

2.9 Canal multi-trajets

Dans les systèmes de communication sans fil, les signaux transmis interfèrent les uns avec les autres en raison de différents mécanismes. Un récepteur peut recevoir plusieurs versions d'un signal sur plusieurs chemins. Ce phénomène est appelé effet multi trajet. En fait, il existe cinq phénomènes principaux : la réflexion, la réfraction, la diffraction, la diffusion et le guidage d'ondes, qui ont un impact direct sur la propagation du signal. Les ondes émises lors des communications radio connaissent souvent une combinaison de ces différents phénomènes. Ainsi, le signal reçu est la somme de tous les signaux arrivant au récepteur par des chemins différents, et cette somme peut être faite de manière constructive ou destructive [33].

La présentation du principe de trajets multiples est illustrée dans la figure (2.13), où l'on peut observer la présence d'obstacles entre les émetteurs et les récepteurs. En raison de la diffraction du signal radio au-delà de ces obstacles, celui-ci ne sera pas masqué par les collines et les bâtiments environnants.

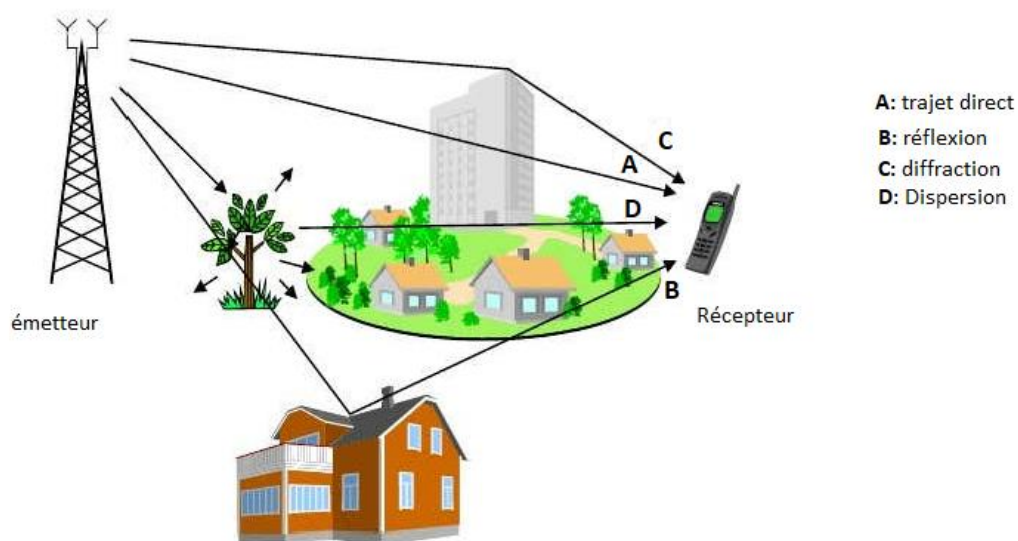


Figure 2.13 : Schéma de principe de trajets multiples.

2.10 Modulation de chaque sous-porteuse du signal OFDM

Dans un système OFDM, les bits d'information de chaque sous-porteuse sont modulés via différentes techniques de modulation telles que BPSK, QPSK ou QAM-16.

Le débit binaire peut être augmenté en augmentant le nombre d'états dans la constellation, fait diminuer la distance entre les points de la constellation, augmentant ainsi la Sensibilité du système au bruit.

En général, la constellation de chaque sous-porteuse présente un changement aléatoire d'Amplitude et de phase dues à l'environnement multi-trajets. Parmi les modulations utilisées dans les systèmes OFDM, la plus robuste est la modulation QPSK, qui code 2 bits par symbole [34].

2.10.1 Binary phase shift keying (BPSK)

BPSK est une modulation numérique binaire. C'est-à-dire que les bits sont modulés en symboles. Il en résulte une immunité élevée au bruit et aux interférences et une modulation extrêmement robuste. La modulation de phase est le cas de la modulation BPSK, qui utilise les variations de phase pour coder les bits (chaque symbole de modulation correspond à une phase). La phase d'un signal modulé en BPSK peut être π ou $-\pi$ selon la valeur du bit d'information [35].

2.10.2 Modulation QPSK

La modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) code deux bits par symbole. Un flux de données binaires est divisé en deux "sous-flux" appelés la composante cosinus (I ou en phase) et la composante sinus (Q ou quadrature). Les paires de valeurs (ou doublets) forment ce que l'on appelle des symboles.

Pour des considérations électroniques, les signaux I et Q sont centrés autour de 0V. On peut donc supposer que I et Q prennent symboliquement deux niveaux +1, -1 correspondant à des états binaires. L'état de phase du signal modulé est représenté par des coordonnées polaires dans le plan I, Q, et selon la combinaison de I et Q, une image communément appelée constellation est obtenue.

Le schéma de constellation de la modulation QPSK est représenté dans la figure 2.14 [36].

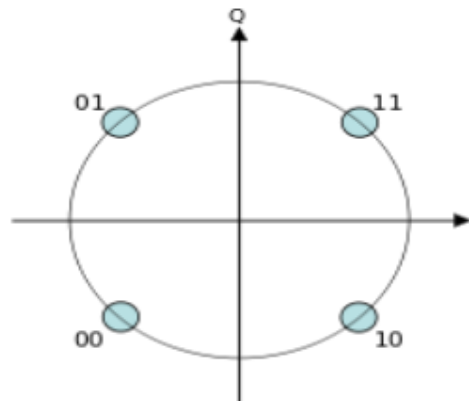


Figure 2.14: Constellation de la modulation de phase QPSK

Cette modulation permet d'augmenter l'efficacité spectrale sans modifier la bande passante allouée.

2.10.3 Modulation QAM

Modulation d'amplitude en quadrature QAM (Modulation d'amplitude en quadrature) modulation résulte de la combinaison de deux fréquences porteuses sinusoïdales.

Ils sont déphasés de 90° l'un par rapport à l'autre (d'où le nom de quadrature). Il peut également être considéré comme une modulation de phase et d'amplitude. Cela permet des débits de données élevés à des taux de modulation relativement faibles. Par exemple, QAM-16 utilise 4 bits par symbole, 2 bits pour i et 2 bits pour Q. La valeur de i peut être l'une des quatre amplitudes possibles. Il en va de même pour la valeur de Q. La figure 2.15 montre le diagramme de constellation et le signal temporel pour la modulation QAM-16.

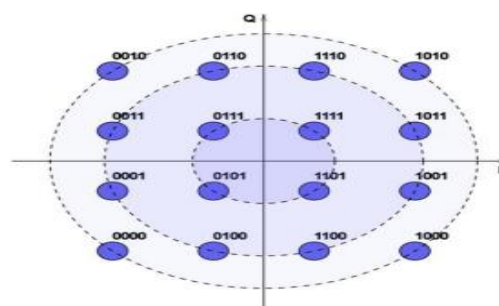


Figure 2.15 : Constellation de la modulation d'amplitude 16-QAM.

Si on veut une modulation 32QAM, il faut doubler le nombre d'états (pour gagner un bit par rapport à 16 QAM), la sensibilité au bruit devient beaucoup plus forte [36].

2.11 Notion d'orthogonalité

La distinction clé entre l'OFDM et les autres techniques de modulation multi-porteuses classiques est que l'OFDM permet un fort recouvrement spectral entre les porteuses, ce qui permet d'augmenter considérablement leur nombre ou de réduire l'encombrement spectral. Cependant, pour éviter les effets néfastes de ce recouvrement, les porteuses doivent respecter une contrainte d'orthogonalité dans les domaines temporel et fréquentiel pour un bon fonctionnement [37].

On dit que deux fonctions $f(t)$ et $g(t)$ sont orthogonales dans l'intervalle $[a, b]$ si la relation suivante est satisfaite :

$$\int_a^b f(t)g(t)dt = 0$$

Cela signifie que ces deux fonctions sont indépendantes sur le segment $[a, b]$.

Afin de réaliser une base orthogonale à N fenêtres rectangulaires régulièrement espacés constitue une base orthogonale. L'orthogonalité est la propriété fondamentale qui permet de transmettre des signaux d'information multiple dans un même canal et de les détecter sans interférences [38].

La figure 2.16 montre que L'espacement en fréquence entre les N -sinus cardinaux (sous-porteuses) de la base orthogonale fréquentielle est défini par : $\Delta F = \frac{1}{T_u}$, où f_1, f_2, f_3, \dots sont orthogonales.

Lorsqu'une sous-porteuse a un spectre maximal, les spectres de toutes les autres doivent être annulés : ceci est la condition d'orthogonalité dans l'OFDM. Cette condition permet une utilisation optimale du spectre et évite les interférences entre les sous-porteuses [39].

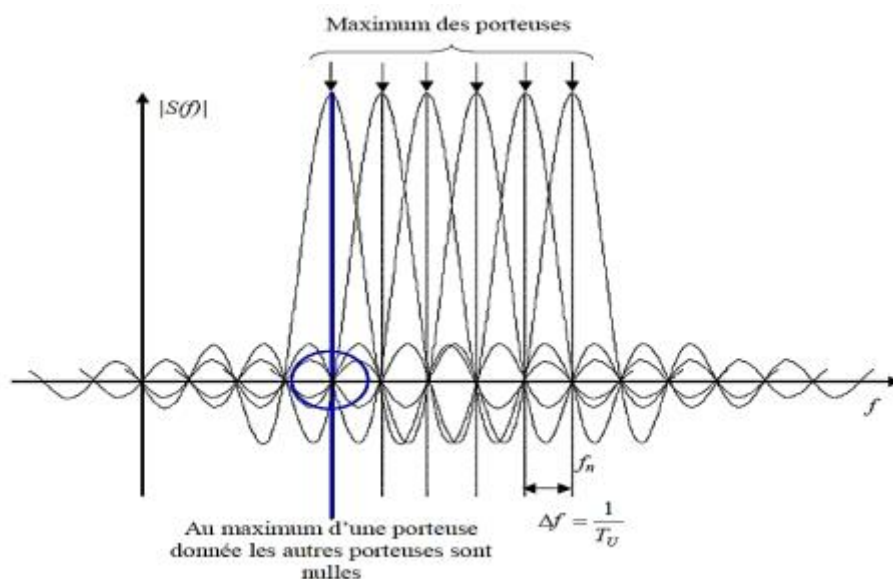


Figure 2.16 : Principe d'orthogonalité des sous porteuses en OFDM [36].

2.12 Principe et fonctionnement de l'OFDM

Le multiplexage en fréquence est un principe qui consiste à regrouper des données numériques en paquets de taille N , appelés symboles OFDM, et à moduler simultanément chaque donnée sur une porteuse différente [31].

La modulation OFDM est une technique de transmission multi-porteuse qui se distingue par sa capacité à multiplexer l'information. Elle repose sur le principe de la transmission des informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles, permettant ainsi une occupation optimale du spectre du signal sur la bande allouée.

La figure 2.17 illustre comment l'OFDM découpe le canal en cellules le long des axes du temps et de la fréquence. Chaque cellule fréquence/temps est associée à une porteuse dédiée. Les informations à transmettre sont réparties sur toutes ces porteuses, chacune étant modulée à un bas débit avec une modulation de type QPSK ou QAM. Ainsi, un symbole OFDM contient toutes les informations de toutes les porteuses à l'instant t [40].

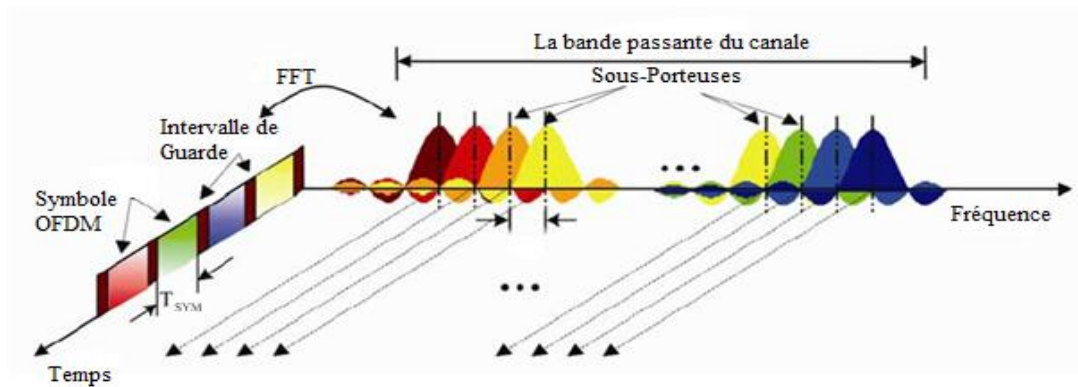


Figure 2.17: Répartition fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM [40].

L'OFDM utilise l'orthogonalité entre les sous-porteuses pour une transmission de données efficace et fiable. Les circuits de modulation et démodulation sont basés sur des algorithmes de transformée de Fourier (FFT) et de transformée de Fourier inverse. Le signal de données est converti en un signal de fréquence et distribué dans différents sous-canaux de fréquence, chacun modulé avec une porteuse sinusoïdale en quadrature. Cette propriété d'orthogonalité réduit les interférences entre les sous-canaux.

La figure 2.18 représente un système OFDM complet, comprenant un émetteur, un récepteur, et un canal radio sur lequel la transmission a lieu. Le signal OFDM résultant est un signal large bande qui est transmis sur le canal de communication. À l'extrémité réceptrice du canal, le signal OFDM est démodulé à l'aide de la technique de transformée de Fourier inverse (IFFT). Ensuite, les sous-canaux sont combinés pour reconstruire les données d'origine.

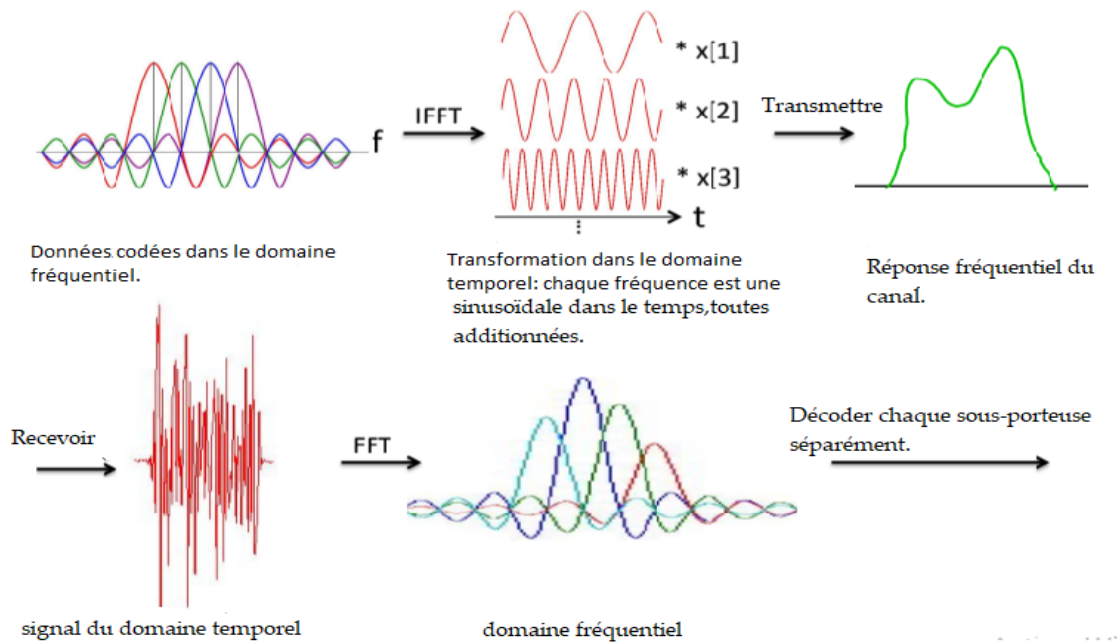


Figure 2.18: schéma principal de l'OFDM [41].

2.12.1 Principe de la modulation dans un système OFDM

Le schéma suivant (Figure 2.19) montre le principe d'un modulateur OFDM. Les symboles c_k sont regroupés en N paquets pour répartir les données à émettre sur les N porteuses. c_k est un nombre complexe défini à partir d'éléments binaires par une constellation, souvent modulée QAM avec 4, 16, 64 ou 2^q états [42].

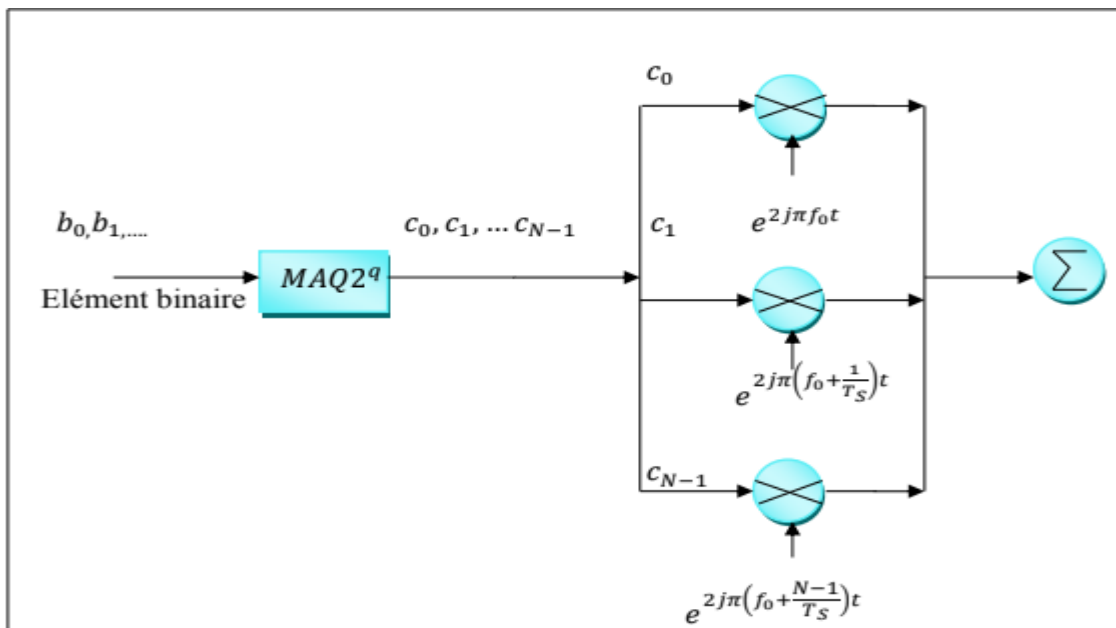


Figure 2.19 : Schéma de principe du modulateur OFDM.

Le signal total $s(t)$ correspondant à l'ensemble des N symboles réassemblés en un symbole OFDM est donné par :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi f_k t} \quad (2.1)$$

2.12.2 Principe de la démodulation dans un système OFDM

A noter que dans la chaîne de transmission OFDM, la démodulation à la réception doit être synchronisée entre le début et la fin de la période symbole transmise. Sinon, des interférences se produiront entre les symboles. L'interférence de canal provoque généralement une perte d'orthogonalité entre les porteuses et est appelée interférence inter-porteuse (ICI : interférence inter-porteuse) ou interférence inter-symbole (ISI : interférences inter symboles). La solution à ce problème est d'introduire un intervalle de garde à chaque symbole (voir la figure 2.20) [43].

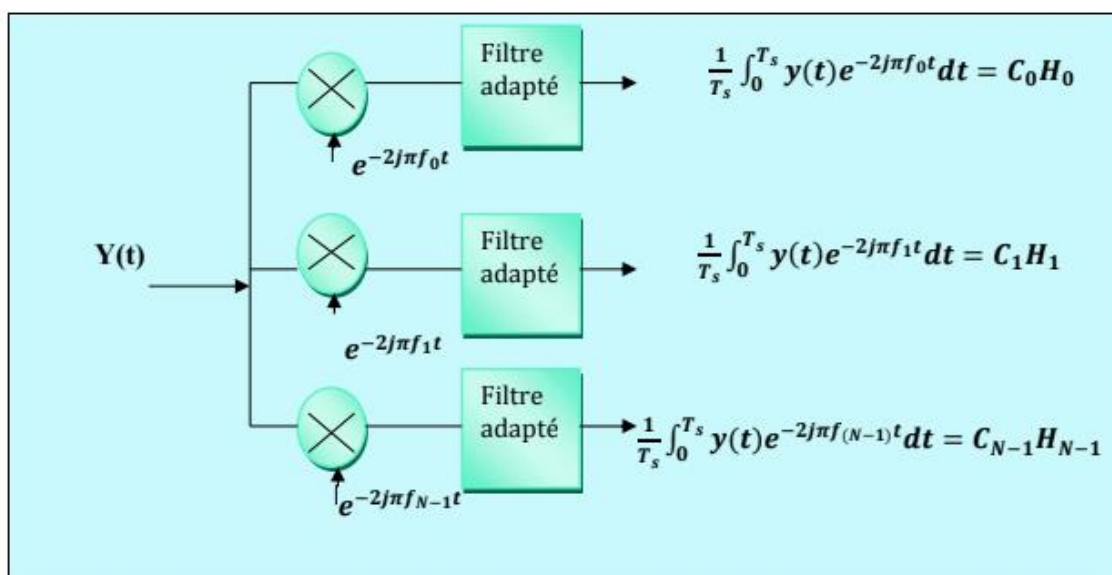


Figure 2.20 : Schéma de principe du démodulateur OFDM.

2.13 Problèmes des interférences

2.13.1 L'interférence entre symboles (IES)

Les symboles transmis se comportent différemment dans un environnement à trajets multiples. Retard pour atteindre le récepteur via divers chemins de propagation. Du point de vue du récepteur, le canal a un étalement temporel, qui est la durée des symboles reçus. L'augmentation de la période de symbole entraîne le chevauchement

du symbole actuellement reçu avec le symbole précédemment reçu, provoquant une interférence entre symbole (IES) [44].

2.13.2 L'interférence entre porteuses (IEP)

Cependant, dans les systèmes OFDM, les spectres de sous-porteuse se chevauchent. Gardez-les perpendiculaires les uns aux autres. Cela signifie qu'à la valeur maximale de chaque spectre de sous-porteuse, tous les spectres des autres sous-porteuses sont nuls. L'interférence inter-porteuse (IEP) est causée par la présence de symboles de données d'une sous-porteuse sur des sous-porteuses adjacentes. L'IEP se produit également lorsque le canal à trajets multiples change pendant un symbole OFDM. Lorsque cela se produit, l'effet Doppler introduit un décalage de fréquence dans chaque trajet, entraînant une perte d'orthogonalité [39].

2.14 L'intervalle de gardes

Les intervalles de garde sont nécessaires pour maintenir l'orthogonalité entre les porteuses lorsque le signal subit des multi-trajets dans le canal. Ces intervalles créent une zone tampon dans laquelle les versions retardées du signal sont accumulées pour éviter les interférences. Il existe plusieurs techniques pour introduire des intervalles de garde dans l'OFDM, telles que l'insertion de zéros entre deux symboles consécutifs (utilisée pour certaines transmissions UWB) ou l'introduction d'une extension cyclique du symbole OFDM.

L'extension cyclique peut être introduite de deux façons différentes : avec un préfixe cyclique ou un suffixe cyclique. Une étude comparative des deux méthodes est nécessaire pour déterminer la plus appropriée en fonction des besoins spécifiques de la transmission [45].

2.14.1 Préfixe cyclique

Le préfixe cyclique est une technique consistant à ajouter les derniers échantillons d'un symbole à son début, afin de maintenir une continuité dans le signal. Cette méthode s'avère efficace pour lutter contre les interférences entre symboles ISI et entre porteuses ICI, et permet d'augmenter la période du symbole sans affecter le

spectre fréquentiel du signal. L'orthogonalité est maintenue et les interférences sont éliminées tant que le bon nombre d'échantillons est pris en réception n'importe où dans le symbole rallongé [43].

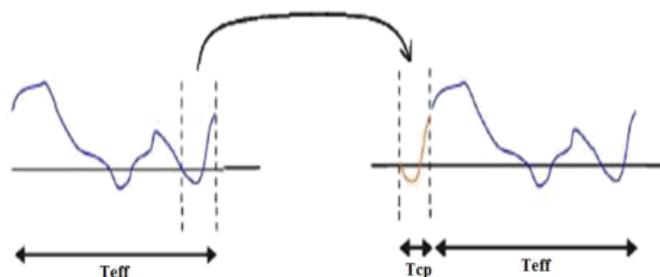


Figure 2.21 : Insertion du préfixe cyclique [43].

2.15 Accès multiple par répartition de fréquences optique

Accès multiple par répartition en fréquence optique (OFDMA Optical Frequency Division Multiple Access) divise le spectre en N canaux de largeur suffisante et attribue un de ces canaux à chaque utilisateur qui veut établir une communication. Cette technique est facile à mettre en œuvre car les utilisateurs sont séparés par filtrage lors de la réception. D'autre part, la bande passante allouée à chaque utilisateur diminue avec le nombre de personnes. L'adaptation optique de l'OFDMA a conduit au WDM (Wavelength Division Multiplexing). Cette technologie est un moyen simple et économique d'augmenter la capacité des systèmes de communication optique en supprimant les contraintes techniques (sources DFB, amplificateurs EDFA...) et physiques (dispersion chromatique, dispersion de polarisation, effets). Fibre optique, ...) [39].

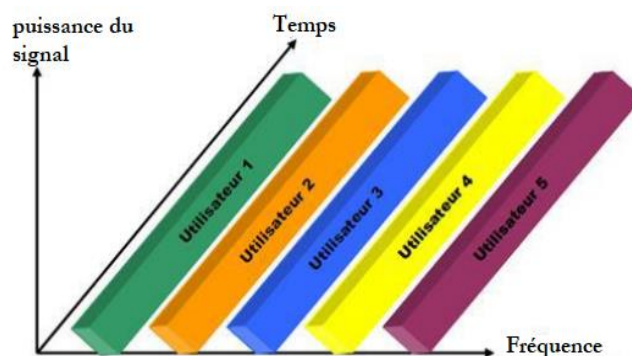


Figure 2.22 : Technique d'accès multiple OFDMA.

2.16 Avantages et inconvénients de l'OFDM

Les principaux avantages de la modulation l'OFDM sont nombreux, on peut en citer :

- L'utilisation de la bande de fréquence allouée est optimale par orthogonalisation des porteuses.
- La modulation est basée sur un algorithme bien connu et peu complexe : la FFT.
- Un codage et entrelacement adapté permettent d'améliorer la qualité de la transmission des données.
- L'OFDM permet une égalisation simple grâce à l'ajout du "préfixe cyclique" ou du "zero padding", même en présence de canaux multi trajets denses.

L'OFDM possède néanmoins des inconvénients qu'il est important d'appréhender :

- L'orthogonalité des sous-porteuses est l'élément clef de la modulation OFDM. Le bruit de phase ou le désaccord en fréquence entre les oscillateurs locaux de l'émetteur et du récepteur (appelé offset fréquentiel) impliquent une perte d'orthogonalité entre sous porteuses et une forte dégradation des performances du système.
- Si le récepteur OFDM est mal synchronisé temporellement, un phénomène d'interférence entre symboles OFDM peut intervenir dégradant considérablement les performances du système global.
- Les systèmes OFDM sont très sensibles au déséquilibre entre les voies I et Q des étages de transposition de fréquence de l'émetteur et du récepteur. Le déséquilibre IQ entraîne des interférences mutuelles entre paires de sous porteuses symétriques et implique une forte dégradation des performances du système global [45].

2.17 Conclusion

En conclusion, Nous avons tout d'abord présenté les systèmes de multiplexage tels que le WDM, le TDM, le CDM et le FDM sont des technologies de communication essentielles pour répondre à la demande croissante de bande passante et assurer une transmission efficace et fiable des données dans les réseaux modernes. Ensuite on a présenté le principe de la modulation OFDM, la notion d'orthogonalité et le problème du trajet multiple a été aussi soulevé. Un des majeurs problèmes que rencontre la transmission à débit élevé est le problème de trajet multiple. L'OFDM apparaît comme une bonne solution pour les trajets multiples, et ceci en divisant la bande de transmission en N sous-canaux orthogonaux. Un préfixe cyclique (Intervalle de Garde) est ensuite ajouté au début du symbole et ce préfixe est identique au segment de même longueur à la fin du symbole. Pour éliminer cette interférence, un préfixe cyclique (CP) de durée supérieure à l'étalement maximal des retards du canal est ajouté au début de chaque symbole OFDM à l'émission. En réception, les opérations inverses sont réalisées, ainsi que les opérations d'estimation et d'égalisation du canal.

Chapitre 03

Etude d'un système OFDM basé sur WDM avec
détection cohérente

3.1 Introduction

Les systèmes de communication optique se sont développés rapidement ces dernières années, l'analyse de ces systèmes est très complexe et nécessite des outils logiciels avancés. Optisystem est un outil qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, d'analyser et de concevoir n'importe quel module de communication optique, du dispositif le plus simple au système de communication complet.

Dans ce chapitre nous présenterons d'abord le logiciel Optisystem en définissant son interface, sa bibliothèque et son éditeur de mise en page, et aborderons également les différentes utilisations de ce logiciel.

Ensuite, nous examinons les performances d'un système OFDM fondé sur le WDM avec une couverture cohérente en fonction de paramètres sélectionnés. En termes de taux d'erreur sur les bits (BER), qualité du signal optique (Q).

3.2 Présentation du logiciel de simulation Optisystem

OptiSystem est un logiciel de simulation de systèmes de communication optique développé par la société canadienne Optiwave Systems Inc. Il permet de concevoir, simuler et analyser des systèmes de communication optique, des réseaux de capteurs optiques, des systèmes de transmission de données optiques, des réseaux de capteurs de fibres optiques, et bien plus encore.

Le logiciel offre une large gamme de modules pour la simulation de différents éléments optiques, tels que les fibres optiques, les amplificateurs optiques, les modulateurs, les détecteurs, les filtres optiques, les multiplexeurs, les démultiplexeurs, etc. Il permet également la simulation de différents types de modulations optiques et de codes de correction d'erreurs.

OptiSystem dispose d'une interface graphique conviviale qui facilite la conception et la configuration de différents systèmes optiques.

Les utilisateurs peuvent visualiser les résultats de la simulation sous forme de graphiques, de tableaux ou de vues 3D pour une analyse détaillée.

Le logiciel est largement utilisé par les ingénieurs et les chercheurs dans le domaine de la communication optique pour la conception de systèmes de communication optique avancés, la recherche sur les technologies de communication optique et la formation dans le domaine de la communication optique [46].

3.2.1 Interface Optisystem

L'interface Optisystem contient une fenêtre principale répartit en plusieurs parties :

- **Bibliothèque** : une base de données de divers composants existants.
- **Navigateur du projet** : Cette fenêtre contient tous les composants utilisés lors du projet afin de pouvoir accéder plus rapidement aux différents composants, particulièrement dans le cas d'un projet complexe qui contient un nombre important de composants.
- **Editeur du Layout** : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de Conception.
- **Projet en cours** Visualise et affiche les divers fichiers et composants correspondants au projet en cours [46].

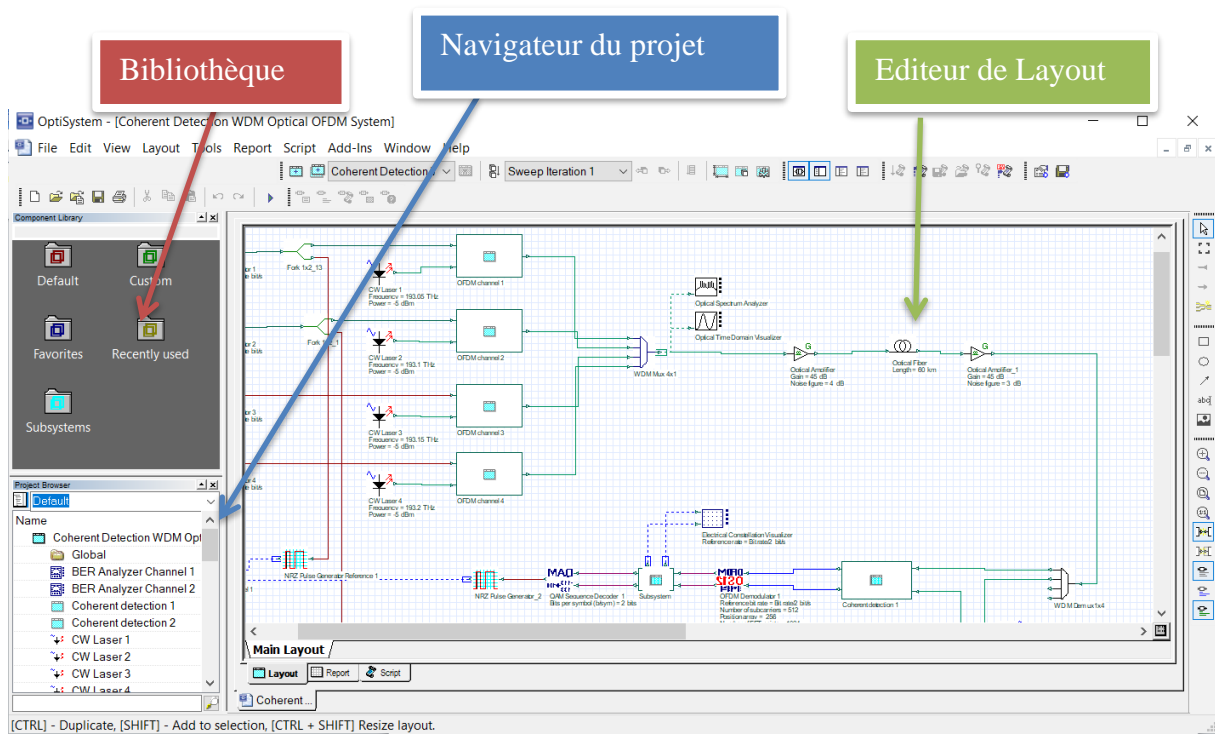


Figure 3.1 : schéma de l'interface Optisystem.

3.2.2 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque de composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurées à partir de périphériques réels, ces composants s'intègrent aux équipements de test et de mesure des différents fournisseurs.
- Les outils de visualisation avancée produit le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des visualiseurs sur le moniteur au même port [47].

3.3 Application d'OptiSystem

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

- La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- Le calcul du taux d'erreur binaire (BER ou TEB) et le calcul du bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et les réseaux optiques passifs (PON).
- L'espace libre pour les systèmes optiques.
- La conception d'anneau SONET/SDH.
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur [46].

3.4 Avantages du logiciel Optisystem

Parmi les avantages de ce logiciel :

- Fournir un aperçu de performances du système mondial de fibres optiques.
- Évaluer les sensibilités des paramètres aidant aux spécifications de tolérance de conception.
- Présenter visuellement les options de conception à des clients potentiels.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation approfondie du système.
- Fournir le balayage automatique des paramètres et d'optimisation [48].

3.5 Critères de qualité d'une transmission

Pour évaluer la qualité de transmission optique dans logiciel Optisystem, il existe trois critères :

- Taux d'erreurs binaires (BER).
- Facteur de qualité (Q).
- Diagramme de l'œil.

3.5.1 Taux d'erreur binaire (Bite Error Rate BER)

Le taux d'erreur binaire est le rapport entre le nombre d'erreurs et le nombre de bits transmis. Statistiquement il s'agit de la somme de la probabilité qu'un bit « 1 » soit détecté comme un bit « 0 » et de la probabilité qu'un bit « 0 » soit détecté comme un bit « 1 ». En général le BER d'un système optique est inférieur ou égal à un taux de 10^9 .

$$\text{BER} = \frac{\text{Nombre d'erreur}}{\text{Nombre de bit transmis}} \quad (3.1)$$

3.5.2 Facteur de qualité

Le facteur de qualité, ou le facteur Q, est un critère de qualité d'un signal optique. Il est obtenu à partir des statistiques du bruit des niveaux (1) et (0) du signal à détecter tel que :

$$Q = \frac{I_1 - I_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (3.2)$$

Où : I_1 et I_2 sont les valeurs moyennes qui représentent le signal utile et δ_1 et δ_2 sont les écarts types des densités de probabilité des symboles 1 et 0. Q est d'habitude exprimé en dB en utilisant la formule suivante :

$$Q_{dB} = 20 \cdot \text{Log}_{10} |Q| \quad (3.3)$$

3.5.3 Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est un équipement spécialisé pour générer des séquences aléatoires et comparer le signal de sortie de la liaison optique avec le signal d'entrée, il est souvent utilisé pour décrire la dégradation de bruit et la dispersion du signal numérique.

Le principe général est que plus la zone centrale est grande plus on a une meilleure qualité du signal reçu. La largeur du signal est associée à la possibilité de différencier facilement les échantillons successifs, tandis que la hauteur du lobe central exprime le rapport d'énergie entre le signal original et le bruit du canal [48].

La figure 3.2 démontre un exemple de diagramme de l'œil :

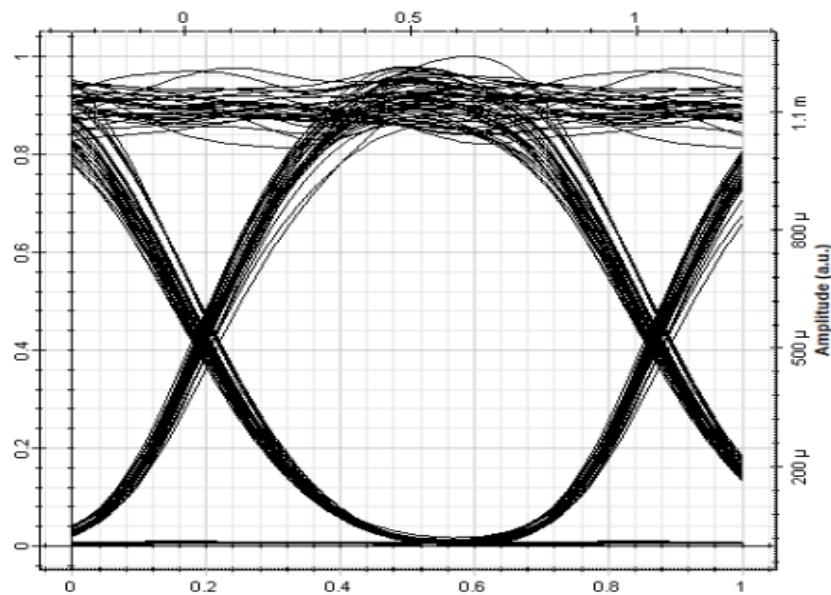


Figure 3.2 : Diagramme de l'œil

3.6 Le système de transmission OFDM

La simulation dans OptiSystem d'un système OFDM basé sur WDM avec détection cohérente comprend trois parties : l'émission, la transmission et la réception.

Dans la partie émission, le signal OFDM est généré et multiplexé en longueur d'onde (WDM).

Dans la partie transmission, le signal optique multiplexé en longueur d'onde est transmis sur la fibre optique.

Dans la partie réception, le signal optique est d'abord démultiplexé en signaux individuels à l'aide d'un démultiplexeur en longueur d'onde (WDM), puis les signaux optiques individuels sont détectés à l'aide d'un récepteur à détection cohérente pour récupérer les données originales. Cette simulation permet de comprendre le comportement du système dans des conditions réelles et d'optimiser les paramètres du système pour améliorer la qualité de la transmission des données.

Le schéma général de notre liaison OFDM est illustré dans la figure 3.3 :

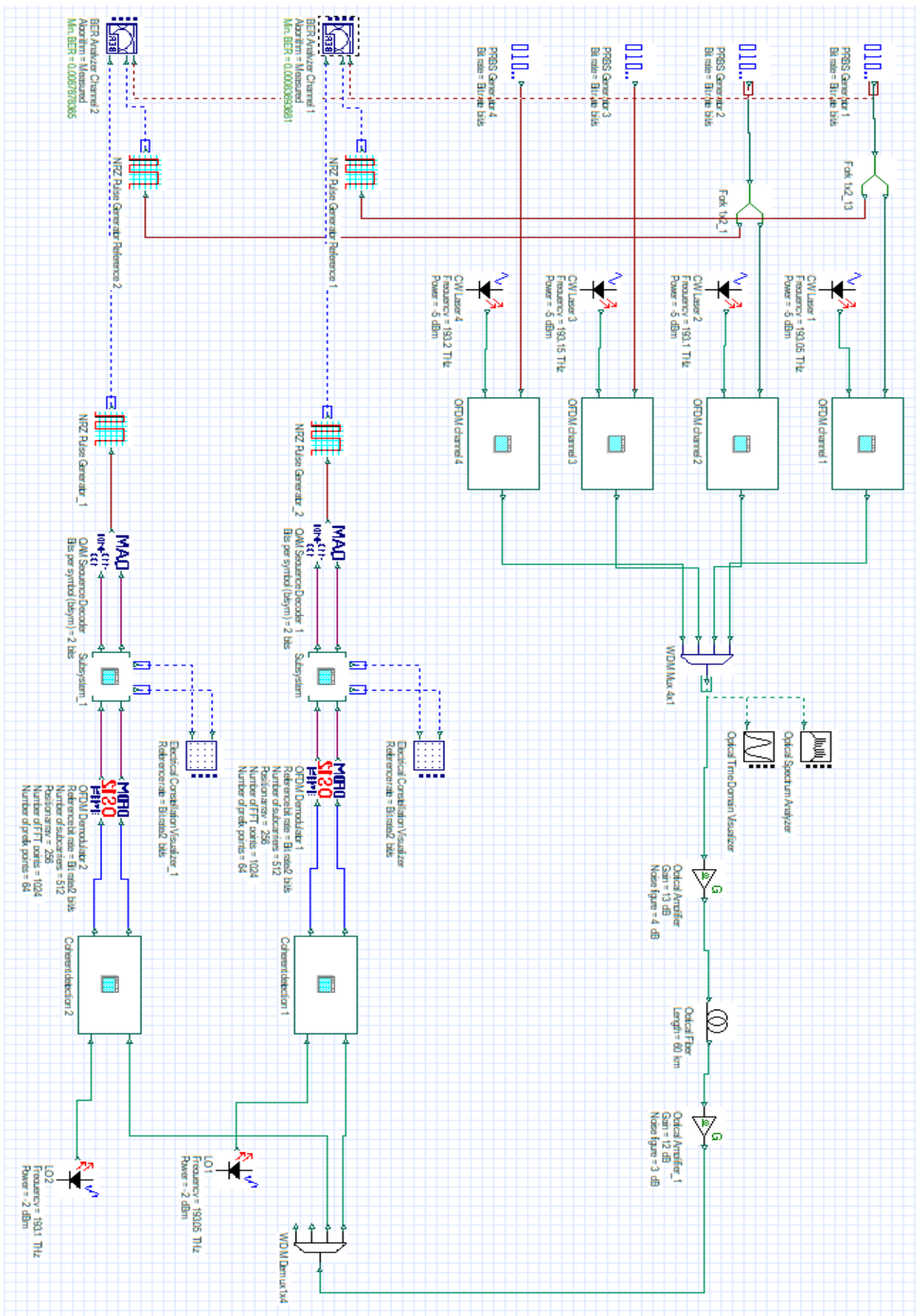


Figure 3.3: Schéma général de la liaison OFDM basé sur WDM

3.6.1 Partie émission

La figure (3.4) représente le schéma en bloc de la partie d'émission.

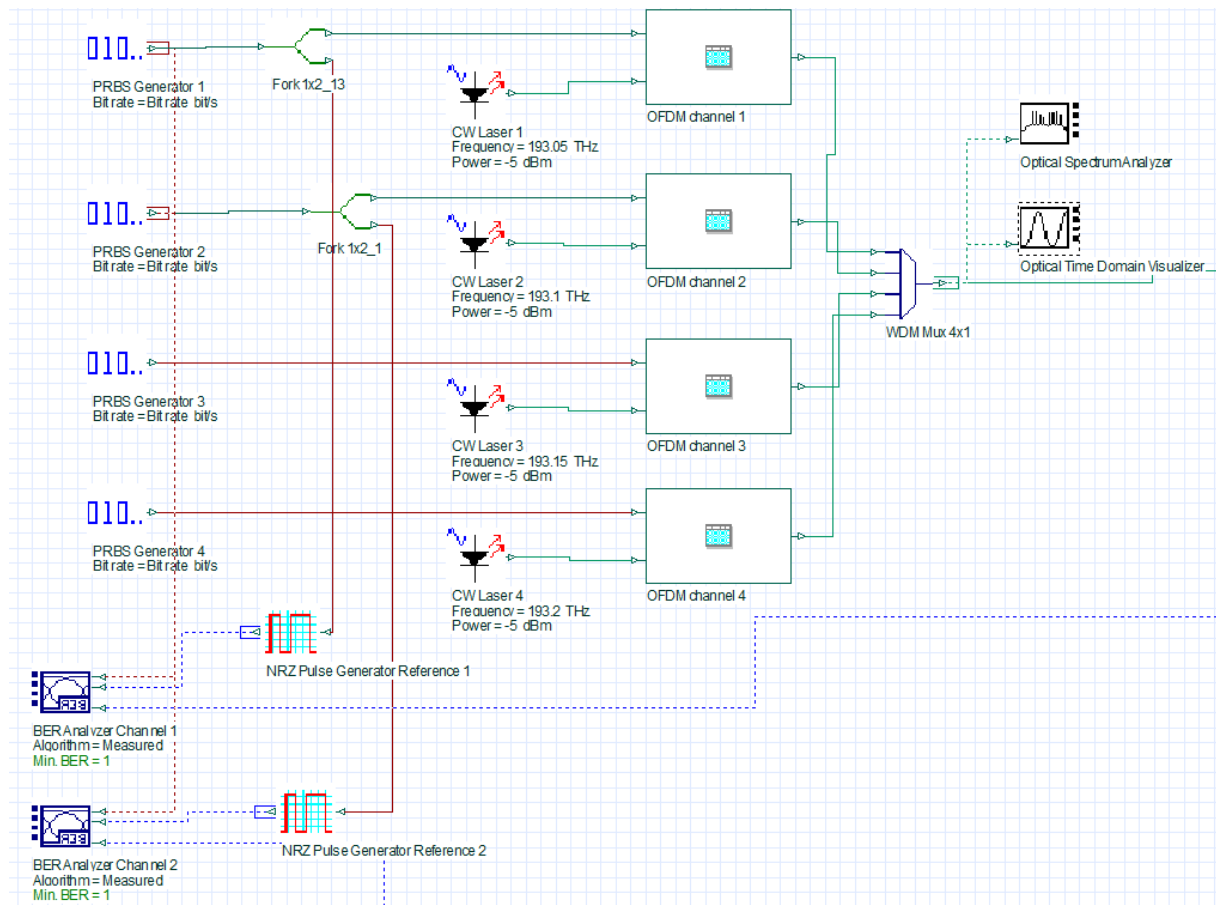


Figure 3.4: Schéma en bloc d'émission

La partie émission de notre liaison est composée de plusieurs éléments définis par les paramètres suivants :

- **Un générateur de bit :** PRBS (Pseudo Random Bit Séquence) génère une séquence binaire pseudo-aléatoire selon différents modes de fonctionnement. La séquence binaire est conçue pour se rapprocher des caractéristiques des données aléatoires.
- **BER Analyzer :** un analyseur de BER est utilisé pour estimer le taux d'erreur binaire sur la base d'un algorithme gaussien avec transmission d'une courte séquence de bits.

- **Un générateur d'impulsion de type NRZ** : (No Return to Zero) génère un signal codé sans retour à zéro.
- **Une diode laser (CW laser)** : est un laser à ondes continues (ou ondes constantes) de longueur de 1550nm. Utilisée pour convertir des signaux électriques en signaux optiques. Défini par les paramètres suivants :
 - Fréquence :

Laser 1=193.05 THz; Laser 2=193.1 THz;

Laser 3=193.15 THz ; Laser 4=193.2 THz ;
 - Puissance d'émission= -5 dBm
 - Largeur de raie= 0.15 MHz
- **Gain électrique** : élément de gain idéal.
- **Modulateur Linb-MZ** : est utilisé comme modulateur pour encoder des données sur le signal lumineux en vue de sa transmission. Ce composant simule un modulateur Mach-Zehnder en Niobate de Lithium. Le Linb-MZ est un MZM à double électrode, généralement polarisé en quadrature. Il permet d'augmenter la fréquence du signal d'entrée par son processus de réflexion. Le LiNbO3 est un cristal qui agit comme un miroir pour réfléchir le signal lumineux à l'intérieur du dispositif et réalise une émission stimulée par la tension appliquée au modulateur. Le LiNbO3 offre le meilleur compromis entre faibles tensions de polarisation, largeur de bande élevée et faible perte d'insertion [5].
 - Rapport d'extinction= 60 dB
 - Tension de modulateur= 2V
 - Pertes d'insertion= 1dB
- **Générateur QAM** : pour générer les bits par symboles pour toutes formes de QAM.
- **Modulateur OFDM** : qui suit des opérations pour obtenir un signal OFDM, il contient des paramètres sur : nombres de sous-porteuses (512), et le nombre de points de préfixe (64), nombre de points FFT (1024) et le tableau de position (256).

- **LP Cosine Roll-Off** : est un filtre passe-bas qui utilise une courbe en cosinus pour atténuer progressivement les fréquences supérieures au-delà d'un certain point de coupure.
- **Multiplexeur WDM** : combiner plusieurs signaux optiques de différentes longueurs d'onde sur une seule fibre optique.
- **Optical Spectrum Analyzer (OSA)** : pour mesurer et afficher la distribution de puissance d'une source optique sur une plage de longueur d'onde spécifiée.
- **Optical Time Domain Visualizer** : est utiliser pour la génération et transmission d'une série de plus optiques à grande vitesse dans la fibre.

3.6.2 Partie transmission

La figure (3.5) représente le schéma en bloc du canal de transmission.

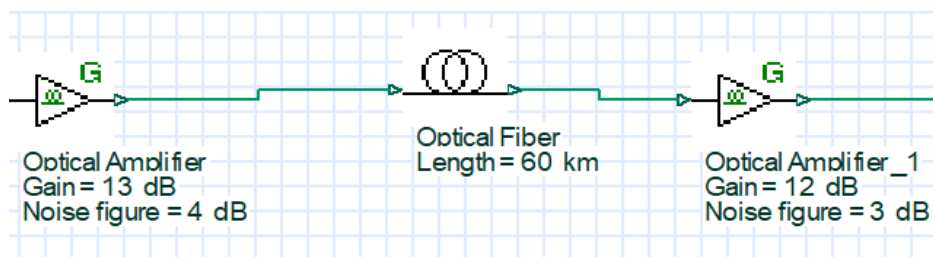


Figure 3.5: Schéma en bloc canal de transmission.

On trouve sur ce schéma bloc les éléments suivants :

- **Deux amplificateurs optiques** : pour garder un signal fort avec un gain de 13 dB pour le premier amplificateur et 12dB pour le deuxième.
- **Fibre optique** : pour améliorer le rendement en puissance, avec les paramètres suivants :
 - Longueur d'onde $\lambda=1550\text{nm}$.
 - Longueur de fibre $L=60\text{ Km}$.
 - Atténuation $\alpha=0.2\text{ dB/Km}$.

3.6.3 Partie réception

La figure (3.6) : représente le schéma en bloc de la partie réception.

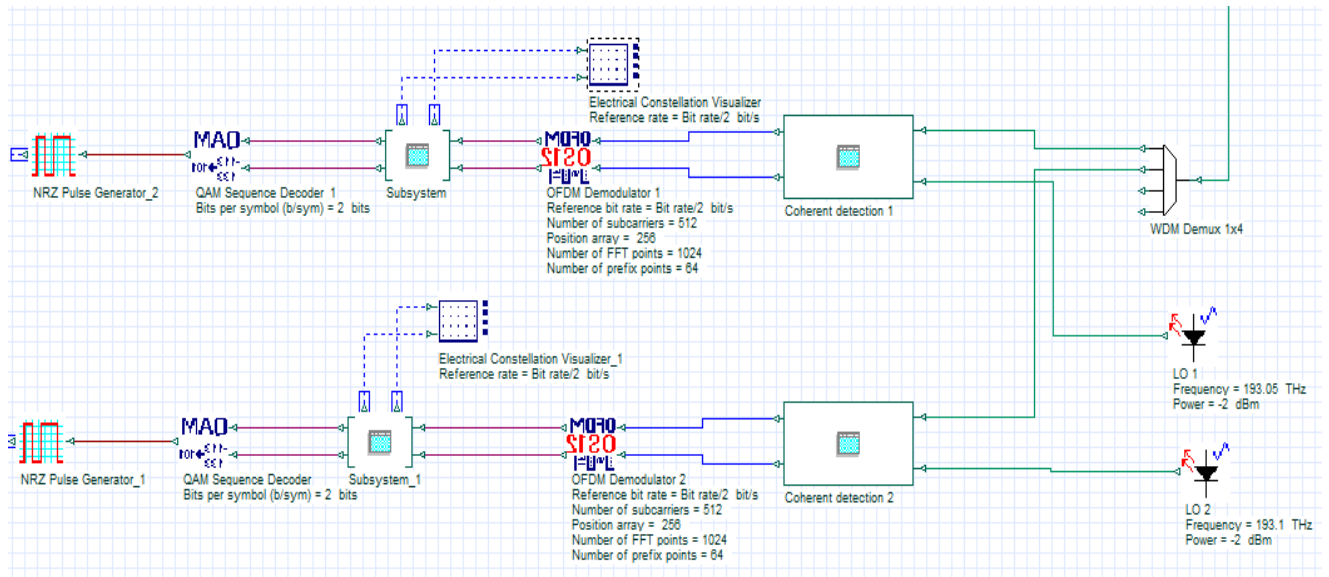


Figure 3.6 : Schéma en bloc de la partie réception.

- ✓ **Démodulateur OFDM** : son rôle est de récupérer les données numériques à partir du signal modulé en OFDM. C.à.d. Démodule le signal pour extraire les symboles.
- ✓ **Décodeur QAM** : elle est utilisée pour décoder les signaux qui ont été modulés à l'aide de la modulation QAM et utilisé aussi pour extraire les bits à partir de symboles pour toutes formes de QAM [22].
- ✓ **WDM DMUX** : le rôle du bloc WDM démultiplexeur est de séparer les signaux optiques multiplexés en longueur d'onde en leurs composantes individuelles, en utilisant des filtres optiques pour séparer les différentes longueurs d'onde. Cela permet à chaque signal individuel de transporter une seule longueur d'onde d'être décodé et traité en tant que signal de données individuel.
- ✓ **L. O (Local Oscillator)** :
 - Utilisé pour moduler un signal optique en utilisant une technique de détection cohérente appelée détection homodyne.
 - Son rôle est de fournir un signal optique à une fréquence déterminée qui est utilisé comme référence pour la détection cohérente des signaux optiques.

La figure (3.7) : représente le schéma en bloc du sous-système dans la partie réception.

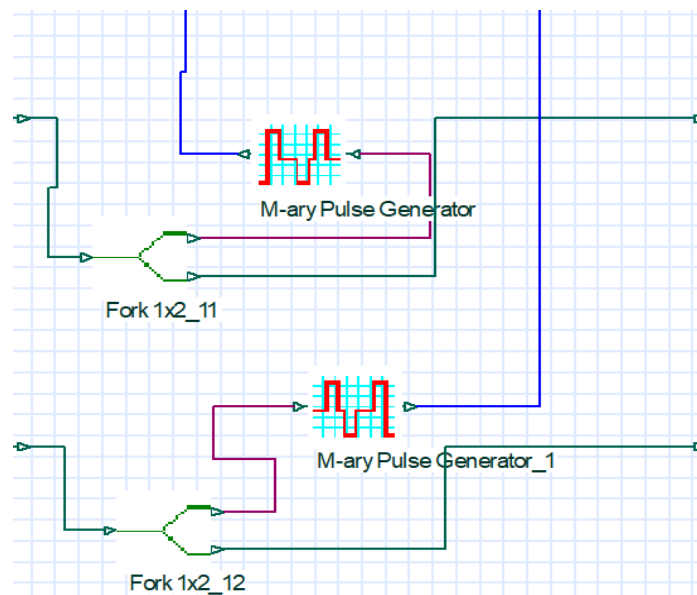


Figure 3.7: Schéma en bloc du sous-système dans la partie réception.

- ✓ **M-ary pulse Générateur :** prend en entrée un signal électrique binaire et le convertit en un signal optique modulé en utilisant une constellation de modulation M-ary.

La constellation de modulation est définie par l'utilisateur et peut avoir différents niveaux, tels que 4, 8, 16, 32, etc.

- ✓ **Electrical Constellation Visualizer :** est utilisé pour visualiser la constellation de modulation d'un signal électrique modulé. La constellation de modulation est une représentation graphique des symboles de modulation utilisés pour transmettre des informations numériques sur un canal de communication. Le diagramme de constellation affiche les symboles de modulation sous forme de points dans un plan complexe à deux dimensions.

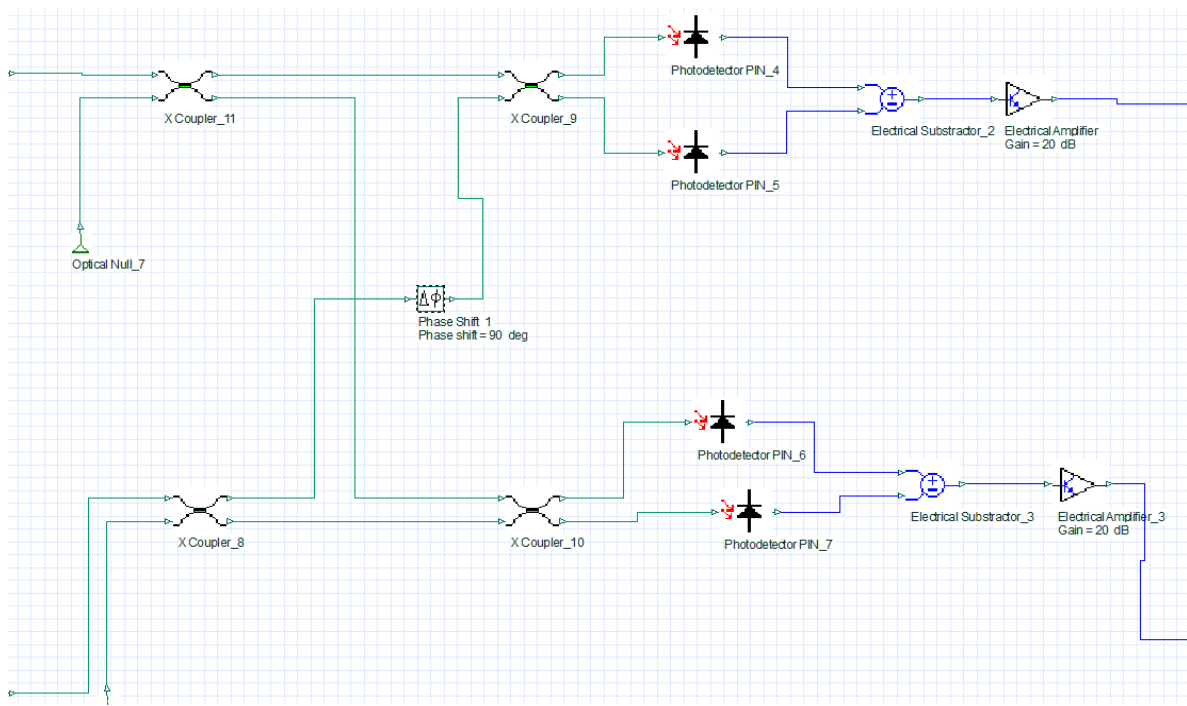


Figure 3.8 : le schéma en bloc de la détection cohérente dans la partie réception.

✓ **Détection cohérente** : permet de simuler la détection cohérente en utilisant un signal optique local (L.O.) pour la détection homodyne, ou en utilisant un signal optique de référence pour la détection hétérodyne.

Ce bloc permet de modéliser avec précision les caractéristiques de la détection cohérente, telles que la sensibilité de détection, la largeur de bande passante, la linéarité, la précision de la phase, etc. Ce bloc est composé de plusieurs composants définie par les paramètres suivants :

✓ **Photodétecteur PIN (Positive Intrinsic Negative)** :

- Transformant le signal optique en électrique, qui permet d'adapter le seuil de décision en fonction des paquets de données reçues.

- Détecter le signal après la liaison optique, avec un courant d'obscurité de 10 nA et une fréquence centrale de 193,1 THz.

✓ **Phase shift** : permet d'appliquer un décalage de phase d'une onde sinusoïdale à 90 degrés à un signal optique. Ce bloc est utilisé pour simuler les effets de la propagation du signal à travers des éléments du système optique qui peuvent modifier la phase du signal

- ✓ **Electrical Subtractor** : Le bloc "Electrical Subtractor" prend en entrée deux signaux électriques et effectue une soustraction de ces signaux pour produire un signal de sortie. La différence entre les deux signaux d'entrée est amplifiée et filtrée pour produire le signal de sortie.
- ✓ **Electrical amplifier gain** : son rôle est de modéliser l'amplification électrique d'un signal optique converti en signal électrique pour le traitement du signal. Ce bloc est souvent utilisé pour simuler des éléments tels que les amplificateurs optiques dans les systèmes de communication optique.
- ✓ **Optical Nul** : son rôle est de générer un signal optique de valeur nulle.

3.6.4 Résultat de simulation

Le tableau 3.1 ci-dessous présente les paramètres primaires de notre liaison optique :

Paramètres	Valeurs	Unité
Débit	12	Gbits
Longueur	60	Km
Puissance	10	Dbm
Facteur de qualité (Canal 1)	$5.05 \cdot 10^{+49}$	/
Facteur de qualité (Canal 2)	$5.05 \cdot 10^{+49}$	/
BER (Canal 1)	0	/
BER (Canal 2)	0	/
Le gain (Optical amplifier)	13	dB
Le gain (Optical amplifier 1)	12	dB

Tableau 3.1 : les paramètres primaires

Les signaux de sortie du multiplexeur sont s illustré sur la figure 3.9 et 3.10.

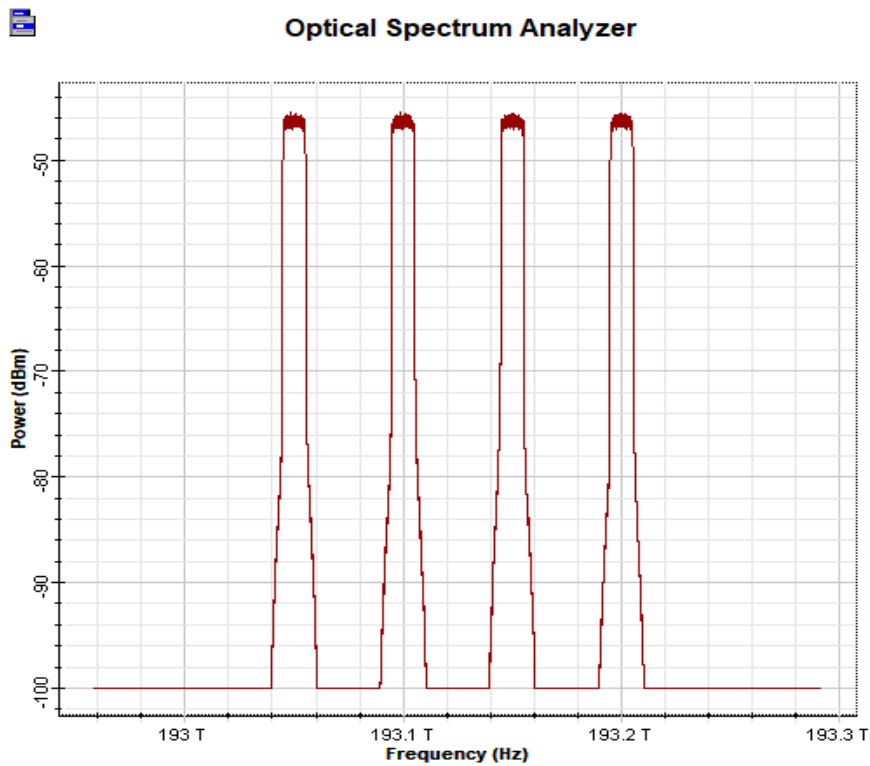


Figure 3.9 : représentation fréquentielle du signal de sortie du multiplexeur.

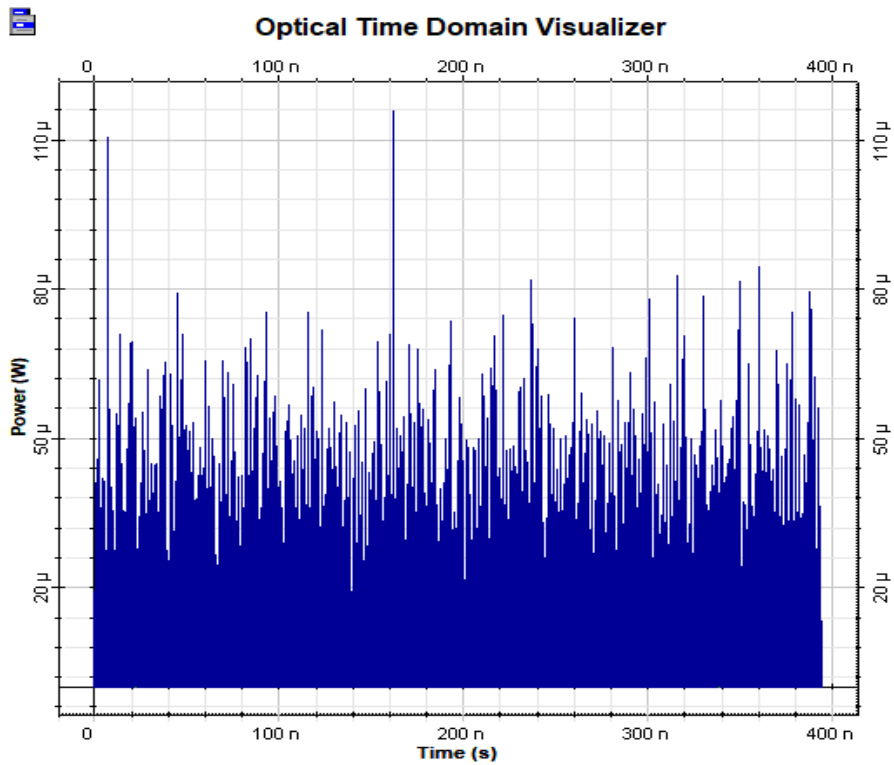


Figure3.10 : représentation temporelle du signal de sortie du multiplexeur.

Les signaux de sortie du multiplexage fréquentiel et temporel montrent clairement l'effet de la technique de multiplexage sur le signal transmis. En combinant plusieurs signaux à différentes fréquences et à différents moments, nous avons pu transmettre plus de données simultanément, ce qui a permis d'augmenter le débit de données global du système.

3.7 Effet de variation de débit en longueur d'onde

D'abord nous allons étudier l'effet de l'espacement en longueur d'onde (WDM) sur la qualité de transmission, pour l'un des deux canaux.

La figure 3.11 montre le graphe de la variation du facteur de qualité Q (dB) en fonction du débit (Gbit/s) pour le deuxième canal.

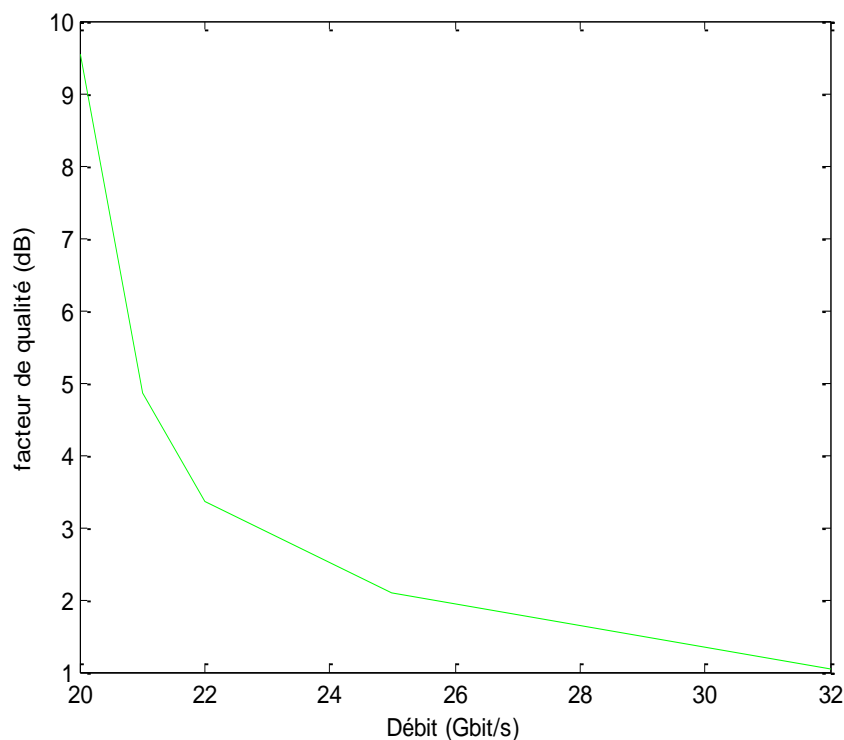


Figure 3.11 : Variation du facteur de qualité Q (dB) en fonction du débit (Gbit/s) pour canal 2.

Le graphe de la figure 3.11, montre comment le facteur de qualité Q varie pour des débits allant de 20 à 32 Gb/s. Pour une distance de transmission fixée à 60 km.

Lorsque le débit augmente, le facteur de qualité Q peut diminuer en raison de l'augmentation du bruit et des pertes optiques dans le système.

Nous allons voir maintenant, l'effet de la longueur de liaison sur la qualité de transmission pour différents espacements, le débit des deux canaux est fixé à 20.8 Gbit/s.

La figure 3.12 montre le graphe de la variation du facteur de qualité Q (dB) en fonction de la distance qui varie de 54 à 66 Km avec une pas de 2 km.

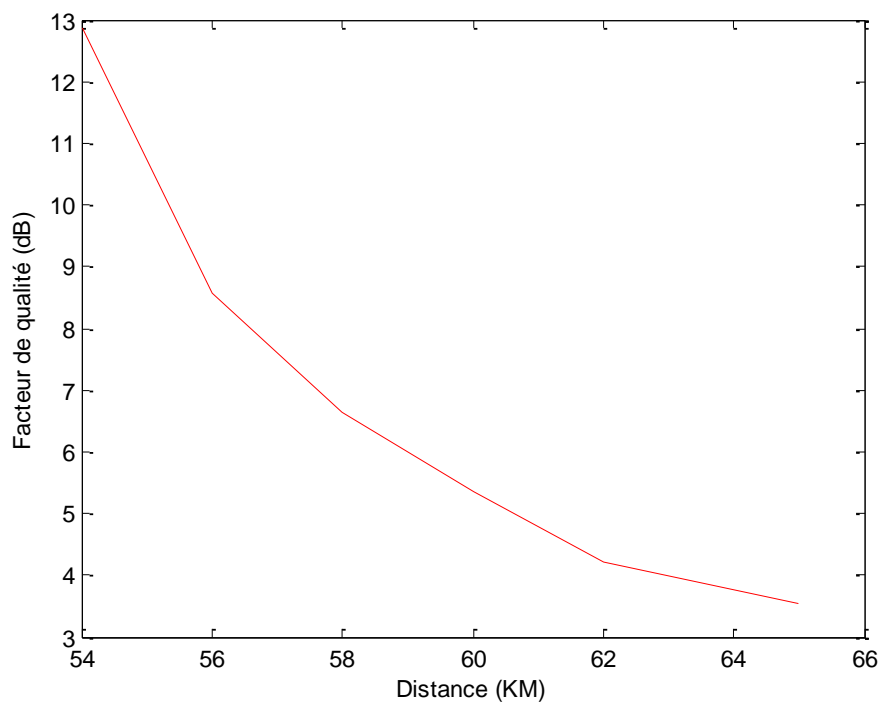


Figure 3.12 : variation du facteur du qualité Q (dB) en fonction de la distance (Km).

La figure 3.13 montre le graphe de la variation du facteur de qualité Q (dB) en fonction de la distance qui varie de 55 à 80 Km avec une pas de 5 km.

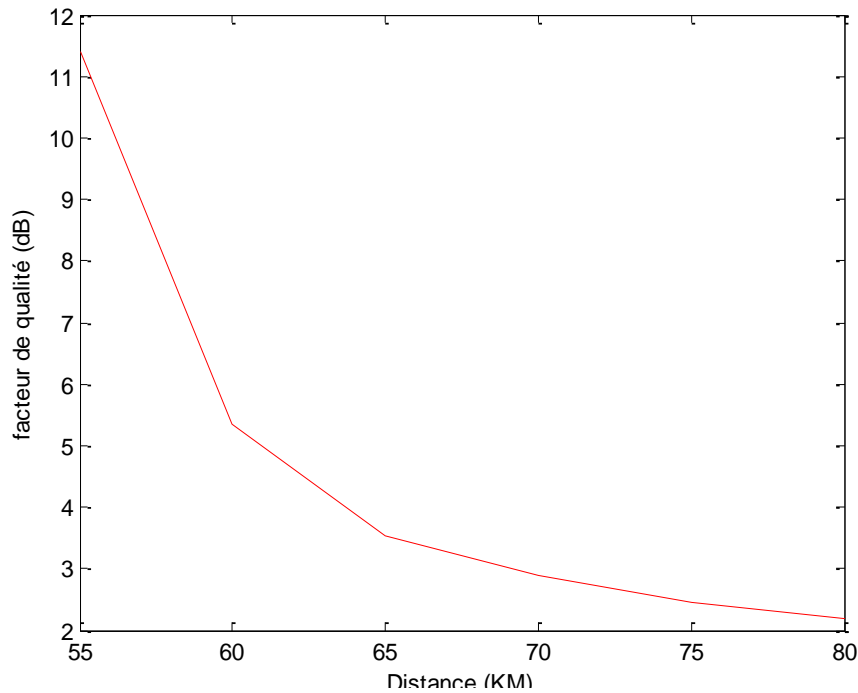


Figure 3.13 :: variation du facteur de qualité Q (dB) en fonction de la distance (Km)

Pour différentes distances de transmission (figure 3.12 et figure 3.13), nos résultats ont montré que le facteur de qualité Q diminue à mesure que la distance de transmission augmente. Cette diminution est due à l'augmentation de l'atténuation du signal et de l'effet de dispersion du canal.

Pour les différents espacements, nous observons que le facteur de qualité est meilleur jusqu'à 60Km, à partir de cette valeur il chute, c'est pour ça on a pris cette longueur (60Km) comme référence pour ce qui suit.

La figure 3.14 montre le diagramme de l'œil du canal 1 avec un facteur Q égal à 17.5109, et un BER égal à 0.0008369, pour une distance fixée à 60Km.

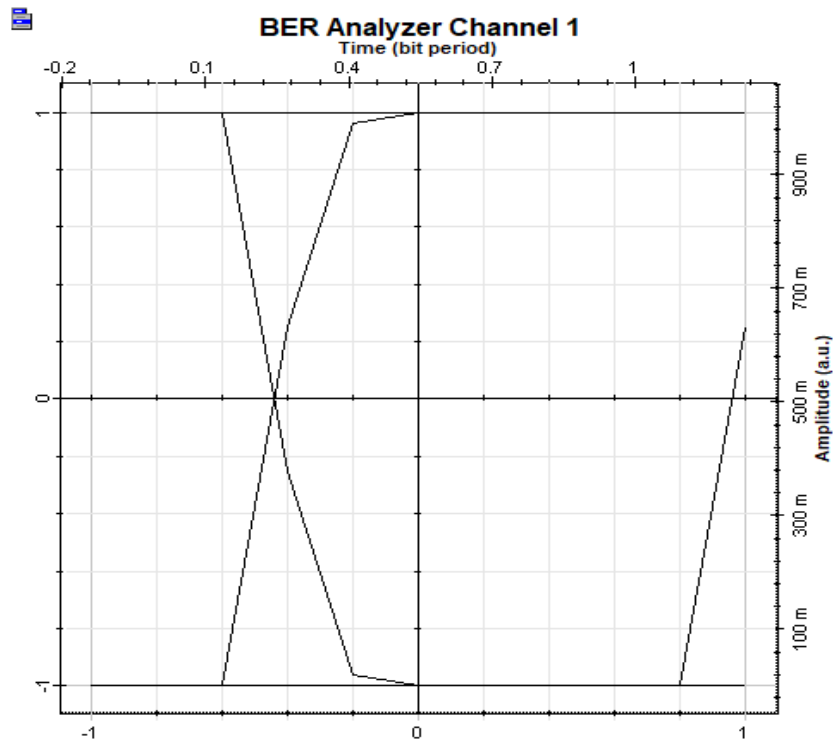


Figure 3.14 : le diagramme de l'œil du canal 1.

La figure 3.15 montre le diagramme de l'œil du canal 2 avec un facteur Q égal à 5.34118 et un BER égal à 0.00864835, et une distance fixée à 60Km.

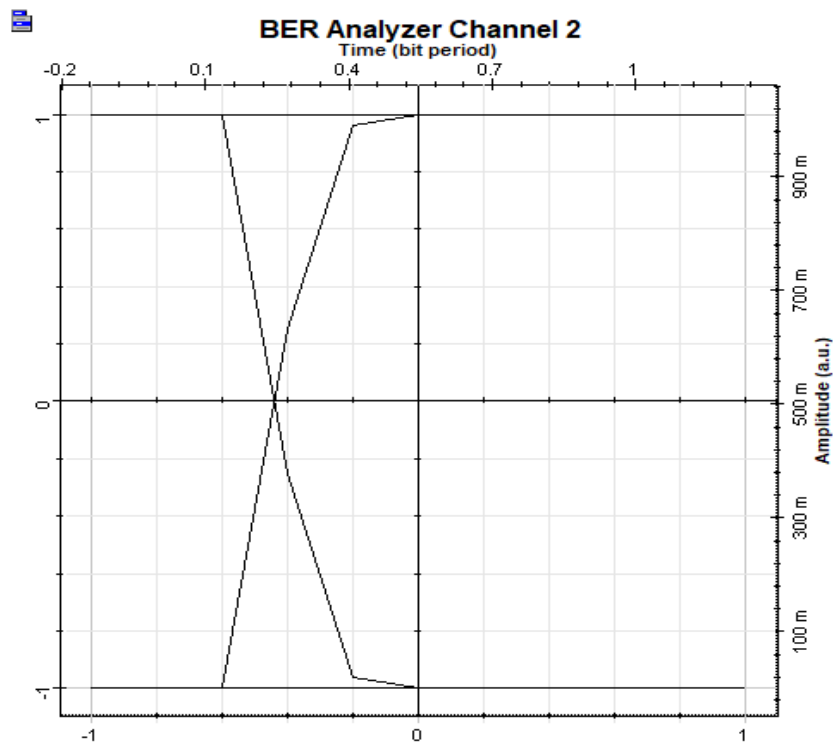


Figure 3.15: Diagramme de l'œil du canal 2.

En analysant les courbes du diagramme de l'œil pour différentes configurations du système, nous avons pu identifier les limites supérieures de débit de données pour chaque configuration. Ces résultats peuvent être utilisés pour déterminer la capacité maximale de transmission de données pour notre système.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les meilleures valeurs des facteurs de qualité sont pour un débit de 20 Gbit/s, quand on dépasse cette valeur nous constatons une diminution du facteur de qualité.

D'après l'observation des figures 3.11,3.12,3.13 on peut conclure que l'augmentation du débit ou de la distance engendre une dégradation de qualité de transmission à cause des différents effets linéaire et non linéaire.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné la qualité de transmission d'une connexion OFDM basée sur WDM en agissant sur divers paramètres tels que la longueur de la fibre et le débit binaire.

Cette étude a montré qu'un système OFDM basé sur WDM avec détection cohérente est une solution prometteuse pour la transmission de données à haut débit dans les réseaux de communication optiques.

Les résultats de simulation ont montré des performances satisfaisantes en termes de taux d'erreur binaire, de qualité du signal optique et de puissance de sortie. Cependant, il est important de considérer les différents facteurs qui peuvent affecter les performances des systèmes afin d'optimiser leur conception et leur mise en œuvre.



Conclusion générale

Conclusion générale

La fibre optique est actuellement devenue le vecteur de transmission pour surmonter les problèmes de télécommunication. À l'heure actuelle, l'évolution d'Internet entraîne une transformation des systèmes de télécommunication visant à augmenter la capacité de transmission. Les télécommunications optiques ont pour objectif de transmettre des informations à des vitesses extrêmement élevées.

Dans cette étude, nous avons examiné divers aspects de la technologie de transmission de données. Nous avons entamé ce travail par une étude théorique d'une chaîne de transmission, en présentant une introduction générale sur les caractéristiques et les avantages de la fibre optique ainsi que sur la liaison optique, qui constitue aujourd'hui le support de la télécommunication. Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé les techniques d'accès multiples WDM, CDM, TDM et OFDM, qui sont largement utilisées pour améliorer la capacité et la fiabilité des systèmes de transmission à fibre optique. Le troisième chapitre était consacré à l'étude de la simulation d'un système OFDM basé sur WDM avec détection cohérente, afin de démontrer l'efficacité de cette technique dans l'amélioration des performances de transmission, à l'aide du logiciel Optisystem. Nous avons pris en compte des paramètres tels que le taux d'erreur binaire (BER), le facteur de qualité (Q) et le diagramme de l'œil.

En conclusion, ce mémoire propose une solution efficace pour accroître la capacité de transmission des systèmes de communication optiques en combinant la modulation OFDM et le multiplexage WDM avec détection cohérente. Les résultats de simulations montrent que le système proposé est capable d'offrir des performances élevées dans des conditions de canal variables, ce qui en fait une solution prometteuse pour les futures applications de communication à haut débit. Cependant, comme pour toute technologie émergente, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour

améliorer la robustesse et l'efficacité de ce type de système en vue de sa mise en œuvre à grande échelle.

En résumé, ce travail a permis d'approfondir notre compréhension de la technologie de la fibre optique et de ses applications dans les systèmes de transmission de données. Nous espérons que ce mémoire contribuera à stimuler de nouvelles recherches sur les techniques d'accès multiples, l'OFDM et la détection cohérente, afin d'améliorer les performances de la transmission à fibre optique.

Références bibliographiques

- [1] <https://www.editionseni.fr/open/mediabook.aspx?idR=943e4883c6c8cc2bb1544f6f078fabdb>. Dernière visite : 24/02/2023.
- [2] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Fibre-optique.html>
Dernière visite : 02/03/2023.
- [3] A. MAMMAR, A. SAYAH et Y. TAMER, « Etude Et Simulation d'un Système de Transmission optique cohérent », Mémoire de Fin d'Étude En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE, Année Universitaire 2019-2020, pp : 6 9.11-16.
- [4] LAURENT. J ; 2004 - « Communication Optique à très haut débits ». Examen Probatoire. Département STIC. Centre de Paris.
- [5] A. BOUZIDI TANI, « Effet de l'espacement inter-canal et du débit binaire sur une liaison WDM », Mémoire de fin d'étude pour obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, juillet 2013.
- [6] M. FEKHAR et SM. BOUYAKOUB, « Gestion de la problématique de surveillance des réseaux optiques passifs PON », Mémoire de Fin d'Études De MASTER Télécommunications, Année Universitaire 2020-2021.
- [7] AD Kersey, TA Berkoff et WW Morey : « Système de capteur de contrainte à réseau de Bragg à fibre multiplexée avec un filtre de longueur d'onde Fabry-Perot à fibre », Opt. Lett. 18 ans, 1370– 1372 (1993).
- [8] H. BILLAMI et R. BENDAHMANE, « Etude d'un réseau optique ADM 10 Gbit/s », Mémoire de fin d'étude pour obtention du diplôme master en réseaux et système de télécommunication, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, juin 2013.
- [9] Jean-Louis VERNEUIL. « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », thèse de doctorat, L'UNIVERSITE DE LIMOGES, P90, 21 novembre 2003, France.
- [10] Y. HAMED, « Étude d'une liaison radio sur fibre », Mémoire de fin d'étude pour obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, juin 2014.

- [11] M. BENNAT, « effet de la dispersion et de la modulation directe sur une liaison DWDM », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en réseaux et télécommunication, université Abou Bakr Belkaid –Tlemcen, juin 2018.
- [12] A. MIMOUNI et A. MISSOUM, « étude de la compensation de dispersion par FBG dans une chaîne de transmission optique », Mémoire de fin d'étude pour obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, juin 2022.
- [13]<https://www.edilivre.com/telecommunications-par-fibres-optiques-dealoue.html/>
- [14] A. BEDADDA et L. GUEDIRI, « Etude et analyse des performances d'un réseau optique passif large bande bidirectionnel (BPON) », Mémoire de fin d'étude pour obtention du diplôme de master académique, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, juin 2018.
- [15] TOFFANO. Z, « Optoélectronique : Composants photoniques et fibres optiques », Ellipses Paris, 2000.
- [16] N. BOUDRIOUA. « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD », thèse de doctorat, Université Paul Verlaine-Metz, 25 octobre 2007, France.
- [17] <http://fr.fiber-optical-transceivers.com/info/what-is-optical-amplifier-and-how-many-types-o-41451128.html>. Dernière visite : 15/04/2023.
- [18] https://www.fibermall.com/fr/blog/coherentopticalcommunication.htm#What_is_Coherent_Optical_Communication. Dernière visite :17/04/2023.
- [19] A. MESSAOUDI, « Etude de la technologie WIMAX 802.16x MIMO-OFDM », Mémoire de Fin d'Etude En vue de l'obtention du diplôme : MASTER, Université Mohamed Khider Biskra, juin 2013.
- [20] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-electronique-tiaea/archive-1/optoelectronique-hyperfrequencee3330/multiplexeurs-demultiplexeurs-optiques-e3330niv10004.html>. Dernière visite : 21/04/2023.
- [21]https://www.researchgate.net/figure/The-principle-scheme-of-the-WDM-system_fig1_318258775. https://www.researchgate.net/figure/The-principle-scheme-of-the-WDM-system_fig1_318258775. Dernière visite : 21/04/2023.
- [22]<https://mastersharvanprajapati.blogspot.com/2018/02/modulation-and-its-types.html>. Dernière visite : 03/05/2023.

[23] Naufal. M. SAAD ; 2005 – « Contribution à l'étude de l'application de la technique CDMA aux systèmes de transmission optique », Thèse de doctorat de l'université de LIMOGES.

[24] BEAUQUIER, B ; 2000 – « Communication dans les réseaux optiques par multiplexage en longueur d'onde » Es Sc. Informatique. Thèse de doctorat de NICE - SOPHIA ANTIPOLIS.

[25] BENMANSOUR Mohamed & BENEDDRA Abdelhadi, « Etude d'un système de modulation radio sur fibre basé sur OFDM » Mémoire de fin d'étude pour obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, juin 2022.

[26] <https://fr.slideshare.net/salvatorfayssal/technologie-wdm>.

Dernière visite: 09/05/2023

[27] Frédéric GEROME ; 2005. « Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM » thèse de doctorat de l'université de LIMOGES.

[28] <https://studylibfr.com/doc/4661231/%C3%A9tude-d-une-liaison-optique-multi-longueurs-d-onde>. Dernière visite :15/05/2023

[29] https://www.researchgate.net/figure/a-architecture-dun-brasseur-optique-a-modules-discrets-NMD-b-architecture-dun_fig11_280756006.

Dernière visite :15/05/2023

[30] SHIVA KUMAR et M. JAMAL DEEN, « Fiber Optic Communications (Fundamentals and applications) ». John Wiley, Mai 2014.

[31] LE GLAUNEC, Annick. Modulations multiporteuses. Rapport, Université de Supélec, <http://www.supelec-rennes.fr/ren/perso/aleglaun>, 2000.

[32] MERROUCHE W.et MOSSI IDRISSE M., « Evaluation des Systèmes OFDM et Estimation du Décalage Fréquentiel de la Porteuse », Mémoire d'ingénieur, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE. Alger, juin 2004.

- [33] ALLAOU.S et SADAOUI.K « Simulation et performances d’algorithmes pour l’accès aux ressources à base de F-OFDM », Mémoire de fin d’étude pour de l’obtention du diplôme de Master en Télécommunication, Université A. MIRA-BEJAIA 2020.
- [34] M. Joindot et A. Glavieux, « Introduction aux Communications Numériques », Collection Pédagogique de Télécommunication, Ellipses, 1995.
- [35] BELHADJ.A et SEBROU. F, « Réduction du PAPR d’un système OFDM par la méthode Tone Réserveation », Mémoire de fin d’étude pour de l’obtention du diplôme de Master en Électronique, Université SAAD DAHLAB de BLIDA,2013.
- [36] A. Rachini « Etude de la synchronisation temporelle dans les systèmes MIMO-OFDM appliquées aux réseaux mobiles », Thèse de doctorat, Rennes, INSA ,2014.+
- [37] Peng, W. R., Wu, X., Arbab, V. R., Shamee, B., Christen, L. C., Yang, J. Y., ... & Chi, S. (2008, February). Experimental demonstration of a coherently modulated and directly detected optical OFDM system using an RF-tone insertion. In OFC/NFOEC 2008-2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (pp. 1-3). IEEE.
- [38] TAYEBI.M. L et BOUZIANI.M, « Performances des systèmes OFDM dans les canaux radio-mobiles », Thèse de doctorat,2014.
- [39] CHERIFI.A « Analyse Et Evaluation Des Performance De la Modulation Multi porteuses », THESE DE DOCTORAT Pour l’obtention du Diplôme de Doctorat Spécialité : Génie Electrique, juin 2017.
- [40] BEN HNIA.H, KACHOURI.A, BEN BELGHITH.O, KAMOUN.L « Etude des performances de la modulation OFDM pour l’utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4G ». International Conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, Tunisie, 15-20 Mars 2004.
- [41] [csie.ntu.edu.tw/~hsinmu/courses/ media/wn_11fall/ofdm_new.pdf](http://csie.ntu.edu.tw/~hsinmu/courses/media/wn_11fall/ofdm_new.pdf)
Dernière visite: 02/06/2023
- [42] A. Saiba, A. Loubany « Une approche intelligente pour les systèmes OFDM modulation adaptative », Université libanaise, 2013.
- [43] Bentaleb.N et Benatia.DJ, « Etude des performances de la technique OFDM pour le Communications sans fil », Mémoire de fin d’étude pour de l’obtention du diplôme de Master en télécommunication, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M’SILA,2019.

[44] Proakis, J.G. (2001). Digital communications (4th ed.). New York, N.Y: McGraw-Hill.

[45] S. Traverso, "Transposition de fréquence et compensation du déséquilibre IQ pour des systèmes multi porteuses sur canal sélectif en fréquence". Université de Cergy-Pontoise, 16 Novembre 2007.

[46] ILUNGA KASHAMA « Etude des performances d'un système de transmission optique FSO- (SAC-OCDMA 2-D/ longueur d'onde) », Université de LUBUMBASHI, Novembre 2020.

[47] I. HADJERESE et I. NOURA, « Étude et simulation de la technique CDMA appliqué aux transmissions optiques utilisant les réseaux de Bragg », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Djilali Bounaama- Khemis Miliana, Année 2016.

[48] MECHIN. D ; 2001, « Étude et réalisation de multiplexeurs insertion-extraction à réseaux de Bragg », Optique, Optoélectronique, Microondes. Thèse de doctorat de l'Université Jean Monnet de Saint- Etienne.