

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

Département de Télécommunications



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

En : Télécommunications

Spécialité : Télécommunications optiques

Par : AID Imed Eddine

Sujet

Etude et conception des systèmes Radio-sur-Fibre pour les applications du réseau mobile 5G

Soutenu publiquement, le 05/06/2024, devant le jury composé de :

KARIM FethAllah	Professeur	Université de Tlemcen	Président
ABDELMALEK Abdelhafid	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
DJELTI Hamida	MCA	Université de Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2023 /2024

Remerciements

Je remercie en premier lieu notre bon Dieu ALLAH tout puissant de m'avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma directrice de mémoire, Mademoiselle DJELTI Hamida, Maitre de conférences au Département de Télécommunications, Université de Tlemcen, je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je tiens à remercier avec plus grande gratitude Monsieur KARIM FethAllah, Professeur au Département de Télécommunications, Université de Tlemcen, de l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je tiens également à présenter mes vifs remerciements à Monsieur ABDELMALEK Abdelhafid, Maitre de conférences au Département de Télécommunications, Université de Tlemcen, d'avoir accepté d'être examinateur et membre de ce jury.

Mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin, par leurs conseils, leurs suggestions et par leurs encouragements, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce projet à mes chers parents, pour leur soutien Indéfectible tout au long de ce parcours académique.

A mes amis, pour leur présence et leurs encouragements.

A mes professeurs, pour leur enseignement précieux et leurs conseils avisés.

Ce travail est le fruit de vos efforts combinés, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Etude et conception des systèmes radio-sur-fibre pour les applications du réseaux mobile 5G

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif d'étudier les performances des systèmes radio-sur-fibre (RoF) destinés principalement aux réseaux d'accès du standard 5G. Il s'agit d'analyser les performances de la technologie radio-sur-fibre pour la transmission de formes d'ondes 5G sur des liaisons montantes et descendantes reliant les stations de base et les unités distantes qui fournissent la couverture radio des utilisateurs mobiles. En effet, cette analyse consiste à déterminer les plages de fonctionnement du système liées au choix des composants optiques, aux paramètres de transmission et aussi aux différentes techniques de modulation, d'amplification et de multiplexage.

Mots clés : ROF(radio over fiber), EDFA, MEA, MZM, 5G.

دراسة وتصميم أنظمة الراديو عبر الألياف الضوئية لتطبيقات شبكات الجيل الخامس للهاتف المحمول

ملخص :

يتمثل الهدف من العمل المقدم في هذه الأطروحة في دراسة أداء أنظمة الراديو عبر الألياف الضوئية (RoF) المخصصة بشكل أساسي لشبكات الوصول القياسية للجيل الخامس 5G. والهدف من ذلك هو تحليل أداء تقنية الألياف الراديوية عبر الألياف اللاسلكية لنقل أشكال موجات الجيل الخامس على الوصلات الصاعدة والهابطة التي تربط المحطات الأساسية والوحدات البعيدة التي توفر تغطية لاسلكية لمستخدمي الهواتف المحمولة. يتضمن هذا التحليل تحديد نطاقات تشغيل النظام المرتبطة باختيار المكونات الضوئية ومعلومات الإرسال ومختلف تقنيات التشكيل والتضخيم والتعددية.

الكلمات الرئيسية: (راديو عبر الألياف RoF) ، EDFA ، MEA ، MZM ، 5G.

Study and design of radio-over-fiber systems for 5G mobile network applications

Abstract

The aim of the work presented in this dissertation is to study the performance of radio-over-fiber (RoF) systems intended primarily for 5G standard access networks. The aim is to analyze the performance of radio-over-fiber technology for the transmission of 5G waveforms on uplinks and downlinks connecting base stations and remote units providing radio coverage for mobile users. In fact, this analysis consists in determining the system's operating ranges linked to the choice of optical components, transmission parameters and also the various modulation, amplification and multiplexing techniques.

Keywords: ROF(radio over fiber), EDFA, MEA, MZM, 5G.

Abbreviation

A

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line.

AM : Modulation d'Amplitude.

AOM: Modulateurs Acousto-Optiques.

AON: Active Optical Network .

ATM :Asynchronous Transfer Mode.

AWG: Arbitrary Waveform Generator.

B

BBU : Band Unit fréquence de Base.

BS : Station de Base.

B2B: Back-to-Back.

C

CP-OFDM: Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

C-RAN: Centralized Radio Access Network.

CWL: Continuous Wave Laser.

D

DFB: Distributed Feedback.

DL: Down Link.

DPO: Digital Phosphor Oscilloscope.

DR: Dynamic Range.

DU: Distributed Unit.

DUT: Device Under Test.

DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing.

E

EDFA : Amplificateur à Fibre Dopée à l'Erbium.

eMBB :enhanced Mobile BroadBand.

EML: laser ElectroLuminescent.

eNB: enhanced NodeB “Nœud B amélioré”.

EOM: Modulateurs Electro-Optiques.

EPC: Evolved Packet Core.

EVM : Erreur Vectorielle de Modulation.

F

FC : Ferrule Connector.

FFT: Fast Fourier Transform.

F-OFDM : Filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

FTTA: Fiber To The Antenna.

FTTB: Fiber To The Building.

FTTC: Fiber To The Cabinet.

FTTH: Fiber To The Home.

FTTO: Fiber To The Office.

FTTZ: Fiber To The Zone.

G

gNB : gNodeB "Nœud B de la 5G".

GSM: Global System for Mobile Communications.

I

ICI: Inter Carrier Interference.

IFFT : Inverse Fast Fourier Transform transformée inverse de Fourier.

IMD3: Intermodulation Distortion Third Order.

IM3: Intermodulation ordre 3.

IP3:(point bloquant de troisième ordre).

IM-CD: Modulation d'Intensité avec Détection Cohérente.

IM-DD: Modulation d'Intensité avec Détection Directe.

IoT: Internet of Things.

ISI:Inter Symbol Interference.

L

LNA : Low Noise Amplification.

M

MEA: Modulateurs à Electro-Absorption.

MMF : Multi-Mode Fibre.

MMTC : Massive Machine Type Communication .communications massives de type machine.

MZM : Modulateur d'Intensité de Mach-Zehnder.

M-PSK : Modulation de Phase à M états. Phase Shift Keying.

M-QAM: Quadrature Amplitude Modulation à M états.

MS : Station Mobile.

MVDS: les Services Vidéo Distribués Multipoints.

N

NF: Noise factor.

NR: New Radio.

NRZ: Non-Return to Zero.

NSA : Non autonome.

NSD_{tx} : Noise Spectral Densité .

O

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

OIP3: Order Intercept Point 3.

OOK: On/Off Keying.

P

PD :Photo Diode.

PDH : Plesiochronous Digital Hierarchy.

PM-CD : Modulation de Phase avec Détection Cohérente.

PM-DD : Modulation de Phase avec Détection Directe.

PON: Passive Optical Network .

PRBS: Pseudo-Random Bit Sequence.

Q

QAM: Quadrature Amplitude Modulation.

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying.

R

RAN: Radio Access Network.

RF: Radio Frequency.

RIN : INtensité Relative.

RoF: Radio over Fiber .

RoF-OFDM: Radio-over-Fiber Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

ROSA : Receveur Optical Sub-Assembly.

S

SA : Standalone "Autonome".

SBA: Service-Based Architecture.

SC : la Station Centrale.

SDH : Synchronous Digital Hierarchy.

SMF : Single-Mode Fibre.

SOA: Amplificateurs Optiques à Semi-conducteurs.

SONET-SDH :Synchronous Optical Networking - Synchronous Digital Hierarchy.

SSB: Single-Side Band.

S11: Receiver, ici récepteur optique.Paramètre de réflexion en entrée.

S22 : Paramètre de réflexion en sortie.

T

TDM: Time Division Multiplexing.

TEB : Taux d'Erreur Binaire.

TIA :Amplificateur TransImpédance.

TNT :Télévision Numérique Terrestre.

TOSA :Transmitter Optical Sub-Assembly.

TV: Television.

U

UHF: Ultra High Frequency 300MHz-3GHz.

UL: Up Link .

UIT : l'Union internationale des télécommunications.

UMTS : Universal Mobile Télécommunications System.

uRLLC : Ultra-Reliable Low Latency Communications. Communications ultra-fiables à faible latence.

V

VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser.

W

WAN: Wide Area Network.

WDM : Wavelength Division Multiplexing . Multiplexage par répartition en longueur d'onde.

Wi-Fi: Wireless Fidelity.

WLAN :Wireless Local Area Network.

WPAN :Wireless Personal Area Network.

#

3GPP :3rd Generation Partnership Project.

5GC:5G Core Network .

5G NR :"5G New Radio" ou "Nouvelle Radio 5G" .

Table des matières

Remerciements.....	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Abbréviation	vi
Table des matières.....	xi
Liste des figures	xiv
Liste des tableaux	xv
Introduction générale	16

Chapitre I : Contexte global sur les systèmes Radio-sur-Fibre

I.1 Introduction	18
I.2 Description des systèmes optique numérique	18
I.2.1Systèmes optiques du réseau d'accès	19
I.2.2 Systèmes optiques du réseau cœur	19
I.2.3 Les systems optiques in-building/indoor.....	20
I.2.4 Les systèmes green	20
I.3 Les standards Radio sur Fibre (RoF)	21
I.3.1 Architecture et performances d'un lien RoF :	21
I.3.2 Performances des systèmes RoF	24
I.3.2.1 Bande passante	24
I.3.2.2 Point de compression : P1dB.....	25
I.3.2.3 Point d'interception d'ordre 3	26
I.3.2.4 Facteur de bruit.....	27
I.3.2.5 Adaptation en entrée (S11)	29
I.3.2.6 Adaptation en sortie (S22)	30
I.4 Systèmes RoF pour le standard 5G	30
I.4.1 Défis et objectifs de la 5G	31
I.4.2 Architectures du réseau d'accès et réseau cœur 5G	31
I.5 Applications des systèmes RoF	33
I.5.1Limitations des systèmes Radio sur Fibre	33
I.6 Conclusion.....	34

Chapitre II : Etude du système Radio sur fibre pour les applications 5G

II.1 Introduction	35
II.2 Techniques de modulation de la radio –sur-fibre ROF	35

II.2.1 Modulation directe	35
II.2.2 Modulation externe	36
II.2.2.1 Modulation d'intensité avec détection (IM-DD)	36
II.2.2.2 Modulation d'intensité avec détection cohérente (IM-CD)	37
II.2.2.3 Modulation de phase avec détection directe (PM-DD)	37
II.2.2.4 Modulation de phase avec détection cohérente (PM- CD).....	38
II.3 Modulateurs optiques.....	38
II.3.1 Modulateurs électro-optiques	38
II.3.1.1 Modulateur de phase	39
II.3.1.2 Modulateur d'intensité de Mach-Zehnder	39
II.3.1.3 Modulateurs à électro-absorption (MEA).....	40
II.4 Transmission de signaux sur les liaisons RoF.....	41
II.4.1 Liaison RoF à modulation externe avec EML	41
II.4.2 Liaison RoF à modulation externe avec MZM	43
II.4.3 Intégration de la liaison sans fil à 60 GHz	45
II.5 Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM).....	46
II.5.1 Avantages de l'OFDM	46
II.5.2 Inconvénients de l'OFDM	46
II.6 Systèmes de transport des données à 60 GHz par RoF	47
II.6.1 Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant 2 MZM	48
II.6.2 Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant un mélangeur.....	50
II.7 Transmission de formes d'onde 5G sur le fronthaul	51
II.7.1 Transmission mono-porteuse sur la liaison montante PM-DD.....	51
II.7.2 Transmission multi-porteuse sur la liaison montante PM-DD.....	52
II.7.3 Transmission mono-porteuse sur la liaison descendante IM-DD	53
II.7.4 Transmission multi-porteuses sur la liaison descendante IM-DD.....	54
II.8 Conclusion.....	54
Chapitre III : Résultats et discussions	
III.1 Introduction	56
III.2 Description de Simulateur Optisystem	56
III.2.1 Les avantages de l'optisystem.....	57
III.3 Les critères de qualités d'un système optique	58
III.3.1 Taux d'erreur binaire (BER)	58
III.3.2 Diagrammes de l'œil	59
III.3.3 Facteur de qualité	59

III.4 Système étudié	60
III.4.1 Partie émission.....	61
III.4.2 Canaux de transmission	62
III.5 les résultats de simulation	63
III.5.1 Spectres des signaux d'entrée et de sortie.....	63
III.5.2 Effet de variation de débit.....	65
III.7 Conclusion.....	72
Conclusion générale.....	73
Références Bibliographiques :	75

Liste des figures

Figure I. 1: Les différents types des réseaux accès à fibre.....	19
Figure I. 2: Schéma d'un émetteur ROF.....	22
Figure I. 3: Variation de l'efficacité au sein d'un ensemble de 50 lasers, de η_{min} à η_{max}	2323
Figure I. 4 : Schéma d'un récepteur pour liaison RoF.....	24
Figure I. 5: Bande passante lien ROF.....	25
Figure I. 6: Mesure du point de compression.	25
Figure I. 7: Mesure OIP3.	26
Figure I. 8: Niveau d'intermodulation généré par le lien ROF en fonction de la puissance d'entrée. .	27
Figure I. 9: Densité spectrale de bruit du TX seul.	29
Figure I. 10: Mesure du S11 d'un émetteur.	30
Figure I. 11: Architecture 5G core	32
Figure II. 1: Modulation directe	36
Figure II. 2: Modulation externe	36
Figure II. 3: Liaison à modulation directe	37
Figure II. 4: Modulateur de phase	39
Figure II. 5: Schéma de fonctionnement du modulateur Mach Zehnder	40
Figure II. 6: Schéma synthétique de la liaison RoF avec l'EML	41
Figure II. 7: Mesure de l'EVM en fonction de la puissance de l'entrée du signal OFDM, avec un format de modulation QAM transmis sur la liaison RoF avec l'EML-2: a) Mesure et b) Simulation .	43
Figure II. 8: Schéma synoptique de la liaison RoF avec le modulateur externe MZM	43
Figure II. 9: Mesures de l'EVM de la liaison RoF à modulation externe avec le MZM pour un format de modulation QPSK et plusieurs tensions de polarisation en fonction de la puissance moyenne à l'entrée	44
Figure II. 10: Les mesures de l'EVM de la liaison RoF à la modulation externe avec le MZM sont basées sur la puissance d'entrée de la liaison RoF pour plusieurs tensions de polarisation et deux formats de modulation.: a) 16 QAM et 64 QAM.	45
Figure II. 11: Schéma synthétique de la connexion RoF avec la connexion sans fil.	45
Figure II. 12: Architecture ROF-OFDM utilisant 2 MZM	48
Figure II. 13: Conception d'une architecture ROF-OFDM basée sur un seul MZM.....	50
Figure II. 14: Banc de mesure expérimental de l'EVM.	52
Figure II. 15: Évaluation des performances de la transmission multi-canaux sur un banc de mesure.	53
Figure II. 16: Évaluation de l'EVM en utilisant la puissance RF d'entrée pour différentes valeurs de la fréquence RF, le courant de polarisation est de 300 mA, la tension DC est 6 V	53
Figure II. 17: Spectre en bande de base du multiplex mixte en réception avec deux.....	54
Figure III. 1: Interface optisystem.....	57
Figure III. 2: Bibliothèque des composants.....	57
Figure III. 3: Diagramme de l'œil	59
Figure III. 4: Système ROF étudié.	60
Figure III. 5: Partie émission du système ROF	61
Figure III. 6: Canal de transmission.	62
Figure III. 7: Partie réception du système ROF.....	62
Figure III. 8: Signaux au niveau du circuit d'émission	64

Figure III. 9: Signaux au niveau du canal.	64
Figure III. 10: Signaux au niveau du circuit réception.	65
Figure III. 11: Diagramme de l'œil pour des débits de.....	67
Figure III. 12: Diagramme de l'œil pour des débits de.....	69
Figure III. 13: Résultats de visualiser.	71
Figure III. 14: Facteur de qualité $Q = f(\text{débit})$	72
Figure III. 15: Taux d'erreur binaire log (BER) =f (débit).	72

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Mesure de bruit d'un récepteur ROF.....	28
Tableau I. 2: Mesures bruit TX+RX.....	28
Tableau III. 1: Facteur de qualité et le TEB en fonction du débit pour $L = 50 \text{ km}$	66
Tableau III. 2: Facteur de qualité et le BER en fonction du débit pour $L=100 \text{ km}$	68

Introduction générale

La demande croissante de bande passante dans les communications sans fil et filaires a été stimulée par l'émergence d'applications gourmandes en données, telles que les services interactifs et multimédias basés sur la vidéo. Face à la congestion et aux limitations du spectre de fréquences, qui confinent les débits de données des systèmes sans fil actuels à quelques mégabits par seconde, la technologie Radio over Fiber (RoF) se présente comme une solution prometteuse. Elle permet le déploiement d'ondes millimétriques entre de multiples points d'accès, offrant ainsi des débits de données élevés.

Dans le domaine des télécommunications modernes, la Radio sur Fibre se distingue comme une technologie essentielle, fusionnant les avantages de la transmission optique sur fibre avec les besoins croissants des réseaux de communication sans fil.

Ce Projet de Fin d'Études explore les divers aspects de la technologie RoF au travers de trois chapitres, chacun consacré à un aspect particulier de son évolution et de son application.

Le premier chapitre aborde les systèmes optiques numériques, éléments vitaux dans l'acheminement efficace des données dans un paysage de communication en perpétuelle mutation. Il décrit et analyse les différents types de systèmes optiques numériques, soulignant leur rôle fondamental dans les réseaux de communication contemporains. L'étude s'étend aux systèmes optiques des réseaux d'accès et cœur, ainsi qu'aux systèmes in-building/indoor et "green", en mettant en exergue leurs fonctions et avantages spécifiques. Elle se penche également sur les standards de la Radio sur Fibre, examinant leur architecture et performances, cruciales pour une transmission fiable et efficace. L'intégration des systèmes RoF dans le cadre du standard 5G est aussi discutée, identifiant les défis et objectifs liés à cette nouvelle génération de télécommunications, ainsi que les diverses applications des systèmes RoF et les limitations potentielles qu'ils rencontrent.

Le second chapitre offre une analyse complète des systèmes optiques numériques et des standards Radio sur Fibre, mettant en lumière leur importance stratégique dans le paysage des communications modernes et leur adaptation face aux exigences technologiques changeantes. Les systèmes Radio-sur-Fibre, prometteurs pour les communications sans fil, allient capacité, fiabilité et flexibilité. Ce chapitre détaille l'évolution, l'importance et les applications des systèmes RoF, ainsi que leur architecture et performances. Il souligne

également leur pertinence pour la 5G, en tant qu'acteurs clés dans l'amélioration de la capacité et de la fiabilité des réseaux sans fil de cinquième génération.

Le dernier chapitre présente les résultats obtenus par simulation via le logiciel OptiSystem. En évaluant les performances du système RoF à l'aide d'indicateurs tels que le facteur de qualité, le taux d'erreur binaire et l'analyse du diagramme de l'œil. Le mémoire se conclut par un résumé des idées et résultats principaux évoqués tout au long de l'étude, suivi de perspectives pour de futures recherches et développements dans ce domaine.

I.1 Introduction

Les réseaux de communication radio offrent plusieurs avantages tels que la mobilité et une largeur de bande significative. Cependant, les signaux radios sont soumis à des bruits et à divers obstacles pendant leur propagation, entraînant une atténuation forte ainsi qu'une distorsion, rendant difficile la transmission de signaux radio sur de grandes distances, particulièrement pour les applications exigeant un haut débit.

Cependant, la technologie Radio over Fibre (RoF) vient résoudre cet enjeu grâce aux avantages remarquables de la fibre optique, dont une faible atténuation, une grande largeur de bande et une insensibilité aux ondes électromagnétiques. Ainsi, la transmission de signaux radio sur fibre optique se révèle très intéressante dans différents domaines notamment la téléphonie mobile et les réseaux informatiques sans fil [1]. En effet, La technologie Radio sur Fibre (RoF) pour les ondes millimétriques est une solution intéressante pour fournir des hauts débits de données [2].

Ce chapitre présente une description détaillée sur la technologie Radio sur Fibre en termes d'architecture, performances et limitations. Ainsi, il discute les systèmes Radio sur Fibre pour le standard 5G.

I.2 Description des systèmes optique numérique

La nécessité croissante de larges bandes passantes pour les communications multimédias comme les applications Internet, le commerce électronique, etc., a été observée chez les opérateurs et les entreprises depuis la fin des années 1990 [3]. L'incorporation de nouveaux services tels que la télévision haute définition, la vidéo à la demande, et les bouquets télévisuels en Europe exige des débits élevés, une capacité que le réseau d'accès cuivre ne peut pas assurer. Dans ce contexte, l'infrastructure optique offre des débits allant de 2,5 Gbps en mode de transfert asynchrone (ATM) à 10 Gbps, ce qui contribue à abaisser les coûts liés à la mise en place des services. L'introduction des méthodes d'accès optique a constitué une avancée significative pour répondre à ces exigences, ouvrant ainsi des perspectives considérables en matière de temps de transmission et de débit. Par ailleurs, la fibre optique se caractérise par une bande passante étendue (de l'ordre de térahertz) et une perte extrêmement faible. Ainsi l'intégration de la technique de multiplexage en longueur d'onde (WDM) permet d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des composants optoélectroniques malgré leur limitation en bande passante [3].

I.2.1 Systèmes optiques du réseau d'accès

Le réseau d'accès à fibre optique est un système d'accès qui utilise un câble à fibre optique comme support de transmission. Les deux principales catégories de réseaux d'accès optiques sont les réseaux optiques actifs (AON) et les réseaux optiques passifs (PON).

Les réseaux optiques passifs peuvent être catégorisés en PON à bande étroite et PON à large bande, tandis que les réseaux optiques actifs peuvent être segmentés en AON basés sur SDH et PDH basés sur AON.

Les câbles à fibre optique sont employés comme supports de transmission dans les réseaux d'accès optiques. Les différentes catégories de câbles comprennent FTTC, FTTZ, FTTB, FTTO, et FTTH, communément regroupées sous le terme FTTx. Ce dernier représente un stade de progression ou d'utilisation des câbles à fibre optique dans un réseau d'accès, plutôt qu'une technologie d'accès spécifique [4].

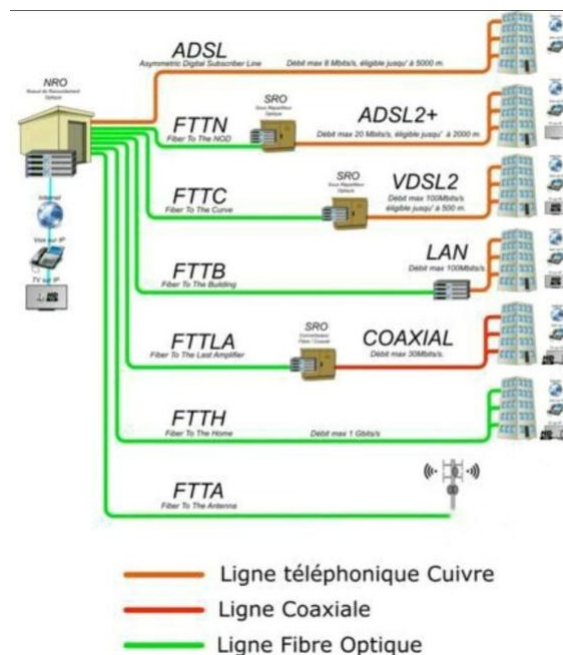


Figure I. 1: Les différents types des réseaux accès à fibre [5].

I.2.2 Systèmes optiques du réseau cœur

Le réseau cœur ou WAN est généralement un réseau doté d'une structure maillée ou en anneau dans lequel le débit de transfert de données est supérieur à 100 Gbit/s.

La distance de connexion peut aller de cent kilomètres à plus de mille kilomètres, couvrant ainsi des régions continentales [6]. Le système optique du centre du réseau est conçu pour acheminer d'importantes quantités de données sur de longues distances au sein des réseaux de télécommunications. Une transmission fiable, une capacité élevée et une gestion efficace du trafic dans le réseau central sont assurées par des techniques telles que le multiplexage en

longueur d'onde dense (DWDM), l'amplification optique (EDFA, SOA, à Raman), le multiplexage temporel et l'interconnexion optique.

I.2.3 Les systèmes optiques in-building/indoor

Les systèmes optiques in-building/indoor, également appelés réseaux d'accès optiques, visent à fournir des connexions haut débit via la fibre optique dans les espaces clos tels que les bâtiments et les installations commerciales ou encore le réseau local domestique. Ces systèmes se concentrent principalement sur les architectures de réseaux optiques passives (PON) [7, 9]. Comparativement aux réseaux optiques actifs, ils proposent un accès à large bande et des frais de maintenance moindres.

Pour les réseaux d'accès, l'utilisation incontournable de la fibre optique à large bande a fait de la technologie PON un point central, en raison de son coût réduit et de sa facilité d'entretien[8]. Selon la portée de la fibre optique dans la boucle locale, les réseaux d'accès optiques peuvent être catégorisés en divers types, notamment FTTX, avec des variantes telles que FTTH, FTTC, FTTO, et FTTB [8].

I.2.4 Les systèmes green

La technologie verte (Green Technology) consiste à l'usage raisonné des énergies et des ressources, représente un concept novateur pour les réseaux à l'intérieur des bâtiments. C'est presque devenu une norme importante pour le développement durable de l'entreprise, mais il est également crucial pour les fournisseurs et les abonnés car cela permet de réduire les factures. Alcatel-Lucent a proposé une solution d'accès fixe fiable appelée Green-DSL [10], qui fournit aux utilisateurs une bande passante accrue tout en diminuant la consommation de 25 %.

L'accès radio sans fil a été le développement écotecnologique le plus important. Les performances d'un réseau sans fil sont désormais influencées non seulement par le matériel, ainsi que par la configuration du réseau, la portée radio, les antennes, etc. Nous devons élaborer un système radio sur fibre en utilisant des composants optoélectroniques et RF à coût réduit et à faible consommation d'énergie, dans le cadre du projet CapilR. Pour atteindre cet objectif, il sera incontestablement nécessaire de simplifier la structure du système [11].

I.3 Les standards Radio sur Fibre (RoF)

Les systèmes radio sur fibre sont dédiés à la distribution de signaux radiofréquence micro-ondes et millimétriques à l'intérieur de milieux confinés tels que les bâtiments.

Les systèmes désignés sous le nom de standards radio sur fibre (RoF) acheminent les signaux radio par le biais d'éléments optiques vers des réseaux optiques basés sur des fibres optiques grâce à des processus d'échange. Pour les applications sans fil, comme les réseaux 5G, les RoF sont des systèmes qui permettent la transmission optique de signaux radio analogues par volets optiques en utilisant l'échange vers des fibres optiques [12]. Les systèmes RoF sont des systèmes optiques qui transmettent des signaux radio en bande millimétrique via l'échange vers des fibres optiques via des réseaux 5G [12].

I.3.1 Architecture et performances d'un lien RoF

Une liaison RoF est constituée d'un convertisseur RF/optique et d'un convertisseur optique/RF. L'agencement typique d'une liaison RoF comprend un émetteur radiofréquence (RF) qui transforme le signal RF en signal optique, un câble de fibre optique pour le transport du signal optique, et un récepteur optique qui convertit le signal optique en signal RF. Les performances d'une liaison RoF sont impactées par divers facteurs, tels que la qualité de la fibre optique et la longueur du câble optique, la qualité de l'émetteur et du récepteur, ainsi que la qualité de la conversion du signal RF en signal optique et vice versa.

Les performances peuvent être améliorées grâce à l'application de techniques de modulation de phase, d'amplitude et de fréquence, ainsi que par l'utilisation d'amplificateurs optiques [12].

I.3.1.1 Schéma général

a) Émetteur : convertisseur RF/optique

Un émetteur RF/optique est un dispositif capable de convertir un signal radiofréquence en un signal optique qui peut être transmis sur un câble de fibre optique. Les émetteurs-récepteurs RF sur bande passante fibre optique 800-2200MHz, 690-2700MHz, 1900-2200MHz, 800-1000MHz et 47-2700MHz ont une portée de 20 km et une connectivité FC.

Les réseaux d'accès optiques utilisent des émetteurs RF/optique pour transmettre des signaux RF sur des câbles de fibre optique. Ils sont un élément essentiel de l'architecture de ces réseaux et permettent de fournir des connexions haut débit et une grande capacité de transmission de données [13].

En général, l'émetteur est composé des éléments suivants :

- Un atténuateur qui ajuste le gain et augmente le coefficient de réflexion.
- Amplificateur à faible bruit qui compense les pertes du laser en raison de l'atténuateur, de l'adaptation et de la conversion.
- Un dispositif d'une impédance de quelques ohms (8Ω), ajuste la résistance en série avec le laser DFB
- Pour maintenir une puissance de sortie optique constante, un circuit de contrôle de polarisation laser est .

La figure I.2 montre le schéma synoptique d'un émetteur RoF, la source optique est composée d'un laser DFB coaxial, intégrant également une photodiode de surveillance dans le même boîtier [14].

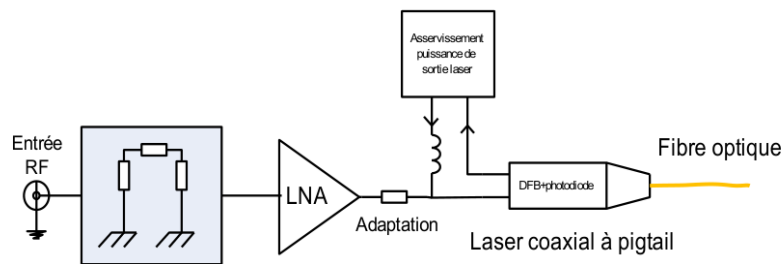


Figure I. 2: Schéma d'un émetteur ROF [14].

La sortie en amont voit une charge de $50\ \Omega$. La puissance transmise au laser sera déduite de la puissance dissipée dans la résistance d'adaptation. Il y a une signification particulière dans cette perte.

$$I_{\text{loss}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{8}{50} = -7.95 \text{ dB} \quad (\text{I.1})$$

L'avantage de l'adaptation par résistance est qu'elle ne change pas de fréquence (ici la bande UHF). Pour les applications dans la bande GHz, les résistances à couches minces doivent être choisies. Comme indiqué précédemment, les pertes d'adaptation seront compensées au stade d'extension. L'atténuateur d'entrée présente trois avantages : il accroît l'adaptabilité de l'amplificateur à l'entrée, accélère la puissance admissible et offre une maîtrise du gain de liaison. Cette correction varie de -5 à -11 dB sur des liens dimensionnés. En termes de rendement (rapport W/A), les types de laser diffèrent. Les caractéristiques externes d'un ensemble de 50 lasers DFB sont présentées dans la figure I.3. La moyenne de la valeur est de $8.06 \cdot 10^{-2} \text{ W/A}$. Il est nécessaire que le fournisseur ait une tolérance de +/- 10% d'environ $8.10 \cdot 10^{-2} \text{ W/A}$. En d'autres termes, la valeur maximale est de 8,810 (-2)

W/A et la valeur minimale est de 8.10×10^{-2} à 7.2×10^{-2} W/A. La seule valeur qui excède cette tolérance est de 9,2 W/A. Les valeurs sont organisées par ordre croissant d'importance [14].

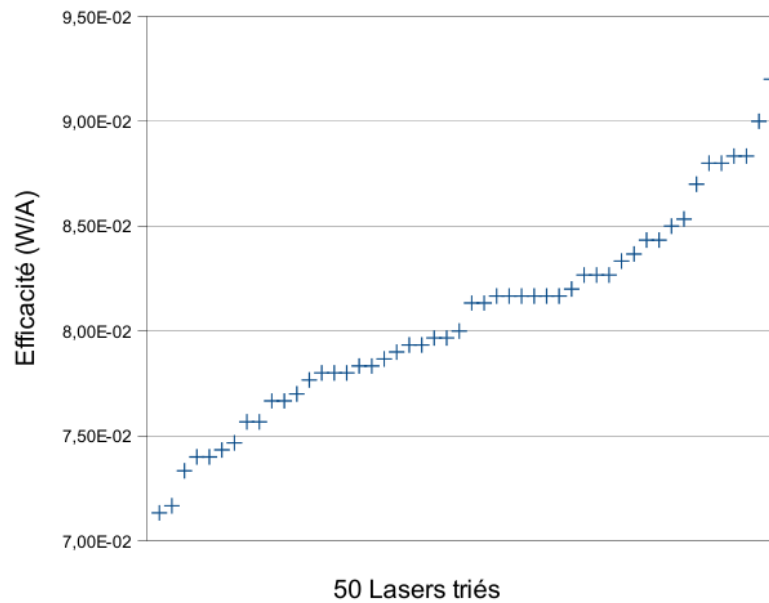


Figure I. 3: Variation de l'efficacité au sein d'un ensemble de 50 lasers, de $\eta_{\min}$ à $\eta_{\max}$ [13].

L'écart type est de 0,00478 et la valeur moyenne est de 0,0806 W/A.

Cette atténuation diminue le rapport signal/bruit (SNR) du signal d'entrée par un facteur équivalent au taux d'atténuation.

En termes d'adaptation, une valeur RL de -15 dB indique une correspondance satisfaisante de l'impédance dans la plage de fréquence d'utilisation [14].

b) Récepteur : convertisseur optique/RF

Un récepteur optique/RF est un dispositif capable de recevoir des signaux dans un système radio sur fibre (RoF) en convertissant un signal optique en un signal radiofréquence (RF). Le récepteur optique/RF se compose d'un photodétecteur qui transforme le signal optique en signal électrique, suivi d'un amplificateur RF destiné à amplifier le signal électrique en vue de son utilisation dans un système RoF.

Les réseaux d'accès optiques utilisent des récepteurs optiques/RF sur des câbles de fibre optique pour recevoir des signaux RF. Ils permettent des connexions haut débit et une grande capacité de transmission de données et sont un élément essentiel de l'architecture de ces réseaux [15, 16].

Le récepteur doit répondre aux conditions suivantes :

-Excellente flexibilité en bande de fréquence et un gain adapté aux exigences de l'application.

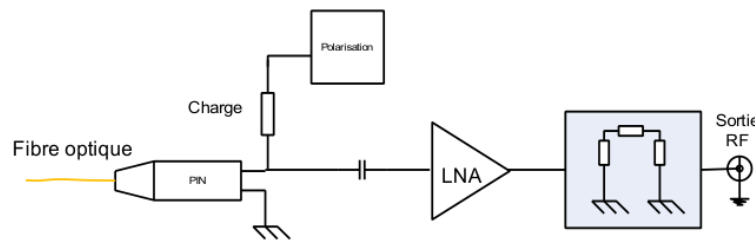


Figure I. 4 : Schéma d'un récepteur pour liaison RoF [14].

I.3.2 Performances des systèmes RoF

I.3.2.1 Bande passante

La capacité de transmettre des données sur un canal de communication optique est connue sous le nom de bande passante dans les systèmes radio sur fibre (RoF). Elle peut être exprimée en bits par seconde (bps) et en mégabits par seconde (Mbps). La fréquence d'images, le nombre de canaux physiques transmis simultanément sur un câble de fibre optique, le débit binaire et la compression vidéo, la résolution vidéo, etc. déterminent la bande passante d'un système RoF [17]. Le Calculateur de bande passante d'Opticom Technologies est un outil de simulation et de calcul qui permet de déterminer la bande passante nécessaire pour une configuration spécifique du système RoF. Les systèmes RoF peuvent parvenir à des débits de transmission dépassant le Gbit/s en exploitant la bande passante exceptionnellement élevée de la fibre optique. La connexion RoF est compatible avec les protocoles de transmission, autorisant ainsi la transmission de signaux RF conformes aux normes spécifiques à la bande millimétrique à 60 GHz, incluant des formats de modulation complexes. Il est possible d'effectuer cette mesure en amplitude ($20 \cdot \log_{10} \frac{A_1}{A_2}$) ou en puissance ($10 \cdot \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$) [18].

Par ailleurs, il est important de noter que tous les appareils et câbles employés doivent posséder la même impédance de référence, qui est de 50Ω . La figure I.5 présente la bande passante caractéristique d'une liaison RoF fabriquée. Elle s'étend de 65 MHz à 3 GHz, avec une atténuation de -3 dB. Le gain moyen sur l'ensemble de la plage de fréquences est de 0 dB, et l'ondulation maximale de la bande passante est de 2 dB. La bande 100-870 MHz, qui est utilisée pour la transmission audiovisuelle, a un gain d'environ -1dB et une ondulation d'environ 1dB, ce qui explique la faible variation de puissance sur cette bande [13].

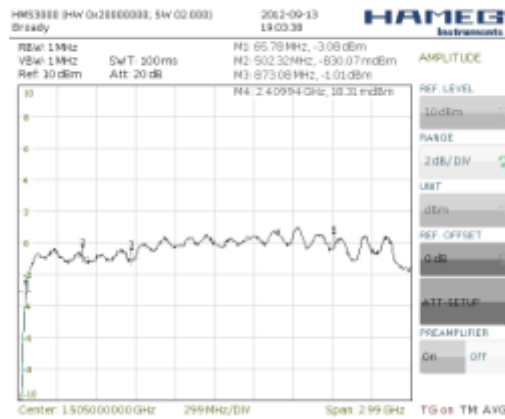


Figure I. 5: Bande passante lien ROF [14].

I.3.2.2 Point de compression : P1dB

La puissance d'entrée à laquelle la puissance de sortie diminue de 1 dB par rapport à la puissance de sortie théorique est désignée sous le terme de P1dB. Le circuit ou le système entre dans la zone non linéaire dès lors que la puissance fournie à l'entrée, P_s , est inférieure à la puissance générée, P_e . Ce seuil représente la limite supérieure, et pour utiliser l'appareil de mesure dans sa plage linéaire, il serait nécessaire d'ajouter une amplitude d'au moins 10 dB.

La figure I.6 ci-dessous illustre la relation entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée à la fréquence de 650 MHz. La courbe bleue représente la courbe de gain idéale, tandis que la courbe rouge représente la mesure de sortie de la liaison RoF. Le lien RoF produit un P1dB d'entrée de +6,5dBm. Par conséquent, il ne faut pas utiliser le lien RoF créé au-delà de cette capacité [13].

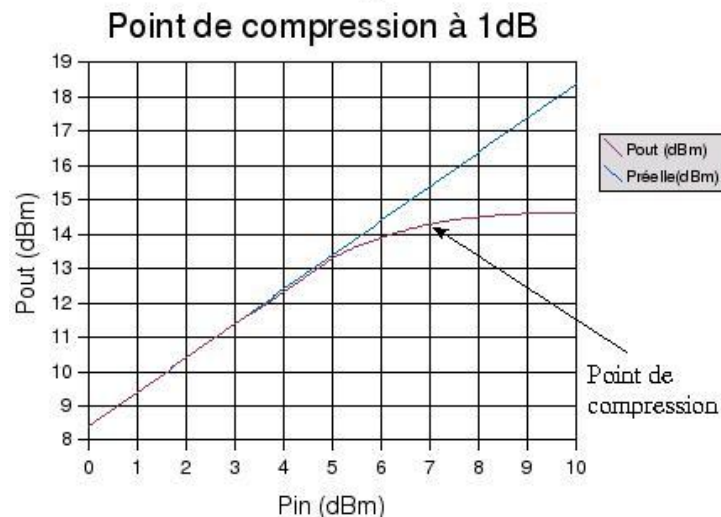


Figure I. 6: Mesure du point de compression [20].

I.3.2.3 Point d'interception d'ordre 3

Le point d'interception d'ordre 3 est une mesure de la linéarité d'un système de communication. Le niveau de puissance d'entrée fait référence au seuil à partir duquel les produits d'intermodulation d'ordre 3 atteignent la même puissance que le signal d'entrée. En d'autres mots, c'est à ce moment que les distorsions significatives commencent à être provoquées par la non-linéarité du système. Selon la recommandation SM.1837 de l'UIT, le point d'interception d'ordre 3 est généralement évalué à l'aide d'une procédure d'essai normalisée. Il est possible d'utiliser les caractéristiques de l'amplificateur, telles que le gain et le point de compression à 1 dB (P1dB) pour calculer le point d'interception d'ordre 3 [20].

Pour les systèmes de communication, le point d'interception d'ordre 3 revêt une importance capitale, car il définit la plage de puissance d'entrée dans laquelle le système peut fonctionner sans engendrer de distorsions significatives. Les produits d'intermodulation d'ordre 3 ont la capacité de perturber et déformer les signaux de communication, ce qui peut entraîner une diminution de la qualité de la transmission. C'est pourquoi le point d'interception d'ordre 3 revêt une grande importance pour évaluer la linéarité et la qualité d'un système de communication [21].

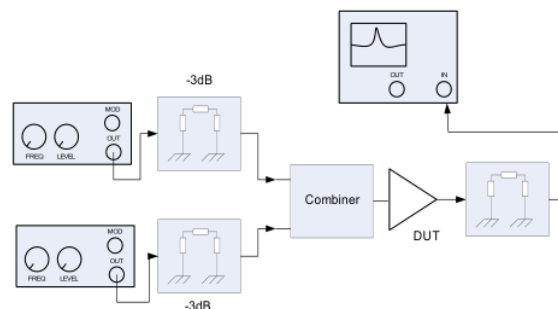


Figure I. 7: Mesure OIP3 [14].

Pour déterminer l'OIP3 du DUT. Il est situé entre la sortie du combineur et l'atténuateur. Il est nécessaire de modifier la puissance de l'émetteur en même temps et d'augmenter le niveau de modulation. Cependant, En raison du niveau élevé d'intermodulation en sortie du combineur, il devient difficile d'obtenir des mesures précises. Il est nécessaire d'utiliser des isolateurs à chaque entrée afin de réaliser ces mesures dans de bonnes conditions. La figure I.8 présente l'illustration de la mesure du niveau d'intermodulation d'ordre 3 (IMD3) à la sortie de la liaison RoF. La courbe rouge représente le niveau IMD3 correspondant à la fréquence $2.f_2 - f_1$, tandis que la courbe bleue indique le niveau IMD3 correspondant à la fréquence $2.f_1 - f_2$. Étant donné que la contribution

d'intermodulation d'entrée inclut le niveau d'intermodulation de sortie, il n'est pas possible de réduire davantage la puissance. L'IMD3 évolue rapidement avec une augmentation de la puissance d'entrée [14].

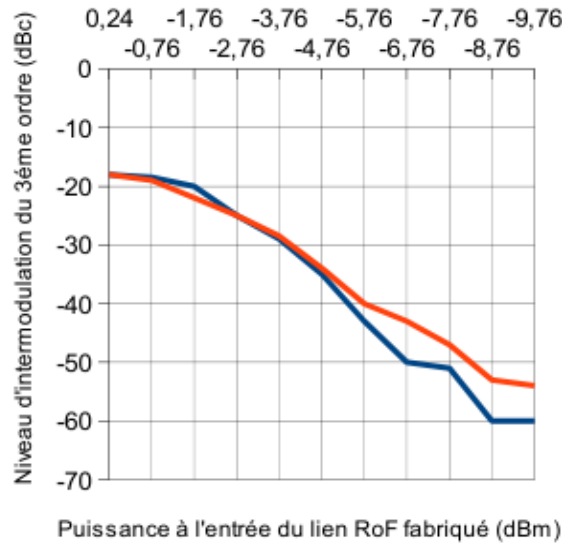


Figure I. 8: Niveau d'intermodulation généré par le lien ROF en fonction de la puissance d'entrée [14].

I.3.2.4 Facteur de bruit

Le facteur de bruit est utilisé pour mesurer la détérioration relative du rapport signal/bruit d'un dispositif électronique, qu'il soit actif ou passif [22, 24]. Il est fourni par le rapport S/B d'entrée et de sortie d'un étage électronique. [23]. Même un amplificateur parfait qui ne produirait aucun bruit amplifierait le bruit et le signal de la même manière, donc le gain de l'étage n'affecte pas le facteur de bruit. Tant que l'amplificateur fonctionne de manière linéaire, le facteur de bruit de celui-ci demeure indépendant du niveau du signal d'entrée [22]. Les mesures du facteur de bruit sont généralement utilisées pour évaluer les amplificateurs, les convertisseurs de fréquence et d'autres [24].

Le facteur de bruit quantifie la diminution du signal par rapport au bruit lorsqu'il traverse un appareil de l'entrée à la sortie.

$$F = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{entrée}}{\left(\frac{S}{N}\right)_{sortie}} = 1 + \left(\frac{NA}{G.NE}\right) \quad (I.2)$$

En présence d'une liaison RoF, le facteur F est défini comme le rapport entre le gain G du dispositif, le bruit spécifique au système NA et le bruit minimum N généré par la résistance de 50 Ω dans la bande passante. Étant donné que le rapport signal/bruit (SNR) en entrée est

toujours supérieur au SNR en sortie, le facteur F est supérieur à 1, indiquant une dégradation du signal [24]:

$$N_A = G \cdot N_E + N_{RIN} + N_{shot} \quad (I.3)$$

Mesure du bruit à la seule aide d'RX :				
Fréquence :	Nmesure(dBm) :	Gain ampli :	Nfloor(dBm) :	Nfloor_lin(pW) :
0.65 GHz	-84.1	20	-104.1	39
1 GHz	-84.8	19	-103.8	41.7
2GHz	-89	15	-104	39.8

Tableau I. 1: Mesure le bruit d'un récepteur ROF [14].

Au niveau de la résistance de sortie R0, la puissance de -103 dBm avec un gain de 14 dB. Dans la bande 200 kHz, le seuil de bruit est de -100 dBm à 650 MHz, donc pour démoduler un signal analogique, le rapport signal/bruit doit être au moins 15 dBm pour obtenir une sensibilité de -85 dBm . Lorsque la valeur est de -100 dBm, la densité spectrale du bruit est de -153 dBm/Hz et le facteur de bruit F est de 19 dB. Cela indique un gain de liaison de 0 dB et une perte optique inférieure à 1 dB. La valeur du RIN (NSD_tx du tableau I.2 ci-dessous) augmente avec la fréquence, elle augmente de 6 dB entre 650 MHz et 2 GHz [14].

Mesurer le bruit sur RX en utilisant le TX connecteur et bouchonne							
Fréquence :	Nmesure (dBm) :	Gain ampli :	Nfloor(dBm) :	Nfloor_lin(W) :	Ntx(W)	Nfloor_tx(dBm) :	NSD_tx(dBm/Hz) :
0.65GHZ	-80	20	-100	1.00E-010	6.11E-011	-102.14	-155.14
1GHz	-80	19	-99	1.26E-010	8.42E-011	-100.75	-153.75
2GHz	-81	15	-96	2.51E-010	2.11E-010	-96.75	-149.75

Tableau I. 2: Mesures bruit TX+RX [14].

La figure I.9 illustre la variation de la densité spectrale de puissance de la contribution au bruit TX. Dans la plage de fréquences de 100 MHz à 1 GHz, on observe une augmentation progressive du bruit avec la fréquence, la densité spectrale de bruit augmentant d'environ 3 dB [14].

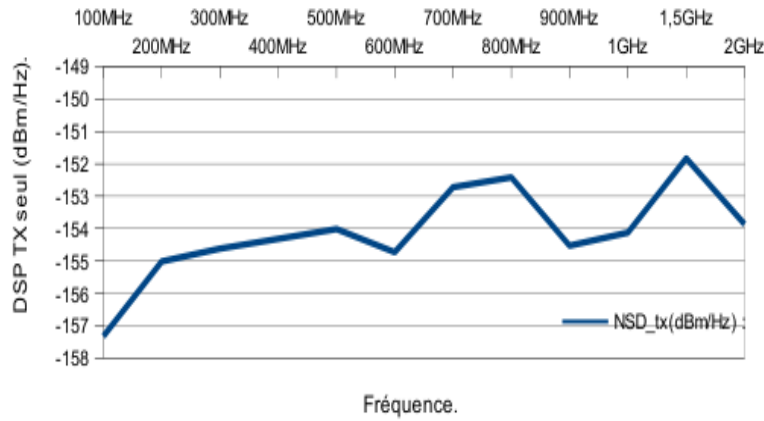


Figure I. 9: Densité spectrale de bruit du TX seul [14].

I.3.2.5 Adaptation en entrée (S11)

L'adaptation d'entrée, également appelée facteur de réflexion d'entrée et représentée dans les circuits RF par le paramètre S_{11} , est une mesure de l'efficacité avec laquelle un dispositif électronique peut transférer la puissance d'entrée d'un signal sans le refléter. La réflexion du signal à l'entrée du dispositif est mesurée par le paramètre S_{11} et est exprimée en termes de coefficient de réflexion. Un faible S_{11} indique une bonne adaptation en entrée, ce qui signifie que le dispositif absorbe efficacement la puissance du signal d'entrée. Une mauvaise entrée peut entraîner des pertes de signal, une distorsion et une inefficacité du système. Par conséquent, l'optimisation de l'adaptation d'entrée est essentielle pour maximiser les performances des circuits RF [25].

L'expression du coefficient de réflexion est fonction de l'impédance de charge est exprimée par :

$$S_{11} = \Gamma = \frac{\frac{Z}{R_0} - 1}{\frac{Z}{R_0} + 1} \quad (I.4)$$

Le coefficient de réflexion permet d'exprimer l'impédance en fonction de celui-ci au moyen de l'équation :

$$Z = R_0 \cdot \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (I.5)$$

La mesure combinée de l'entrée du transmetteur est illustrée à la figure I.10. D'environ 200 MHz à 1,5 GHz, le paramètre de réflexion est inférieur à 15 dB. Ainsi, ces deux fréquences s'adaptent bien [14].

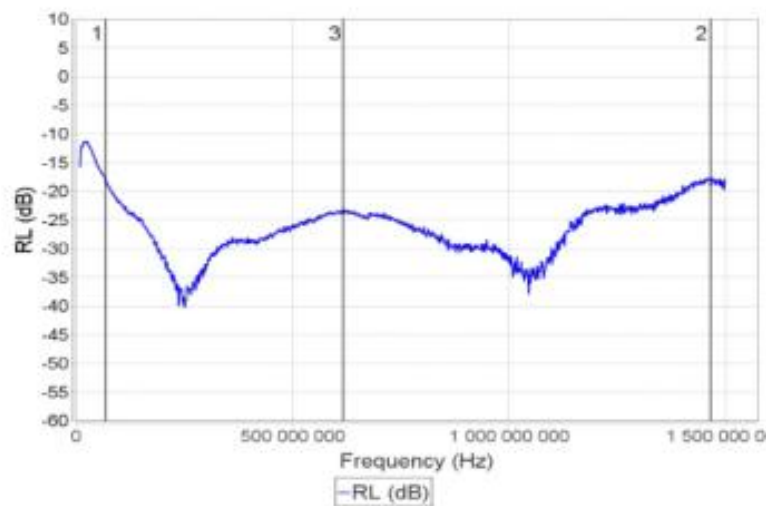


Figure I. 10: Mesure du S11 d'un émetteur [14].

I.3.2.6 Adaptation en sortie (S22)

L'adaptation en sortie vise à optimiser le transfert de puissance ou de signal entre une source et une charge. Dans le cadre de l'adaptation en sortie, il s'agit de sélectionner ou de modifier l'impédance de la charge de manière à ce qu'elle soit égale ou conjuguée à l'impédance de la source, en fonction des circonstances. De cette manière, les pertes et les réflexions sur la ligne de transmission entre la charge et la source sont réduites. De nombreux domaines, tels que les réseaux électriques, les systèmes radioélectriques et les réseaux de télécommunications, utilisent l'adaptation en sortie [26].

I.4 Systèmes RoF pour le standard 5G

Les solutions de transmission de signaux radio sur fibre optique sont offertes par les systèmes radio sur fibre, qui sont considérés comme une option intéressante pour les réseaux 5G. La technologie RoF permet de surmonter les limitations de propagation des ondes aux fréquences millimétriques, où les pertes dans l'espace libre sont élevées et où les ondes ne peuvent pas se propager à travers les murs [27].

D'après des études de recherche, la technologie RoF peut être employée pour offrir des services à large bande passante, ainsi que pour permettre la mise en place de réseaux évolutifs et faciles à gérer [27]. L'utilisation de RoF dans le contexte du fronthaul 5G est abordée dans une publication particulière intitulée « 5G-Mobile Fronthaul UsingRoF Technology » [29]. Emine Moutaly, dans sa thèse de doctorat, a étudié l'architecture RoF pour le réseau de liaison 5G, la partie du réseau 5G qui gère les signaux radio entre l'antenne

et l'unité de base (BBU) [30]. L'organisme de normalisation 3GPP a approuvé un projet de spécification pour les réseaux 5G axé sur la mise en œuvre du RoF, créant une architecture RAN centralisée (C-RAN) qui permettra aux systèmes 5G NR d'utiliser la 5G pour la communication entre la radio et le combiné (DL) tout en s'appuyant sur la communication 4G existante pour la communication entre le combiné et la liaison radio montante (UL) [31].

I.4.1 Défis et objectifs de la 5G

La 5G est une évolution majeure des réseaux sans fil et vise à répondre à des besoins supplémentaires tels que des débits accrus, la prise en charge des communications longue portée et à faible consommation pour les objets connectés, ainsi qu'à d'autres nouveaux usages tels que les véhicules autonomes et connectés, la santé et les objets connectés [32].

L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) et 3GPP ont proposé 5G, qui utilise des fréquences millimétriques pour fournir des vitesses beaucoup plus élevées que la 4G [32].

Les défis de la 5G incluent la conception de réseaux complexes, la gestion de la fréquence des ondes millimétriques, la virtualisation du réseau, la prise en charge de millions d'appareils connectés et la sécurité du réseau [32, 33]. La 5G offre également des avantages tels qu'une latence imperceptible, une flexibilité dans le découpage du réseau et les portions de bande passante, et la possibilité d'adapter les ressources réseau à différentes applications avec une qualité de service élevée.

Les objectifs de la 5G sont ambitieux et diversifiés, visant à répondre aux besoins croissants de connectivité et de performance. En effet, la 5G vise à offrir des services à large bande passante pour permettre des communications plus rapides et fluides, tout en supportant l'Internet des objets (IoT) à grande échelle pour une interconnectivité accrue entre les appareils. De plus, L'objectif essentiel pour assurer des temps de réponse minimaux est de réduire la latence, essentiels pour les applications sensibles au temps comme la réalité virtuelle et augmentée. Par ailleurs, la 5G ouvre la voie à de nouvelles opportunités économiques et industrielles, étant perçue comme un catalyseur majeur de la transformation numérique dans de nombreux pays, offrant ainsi un potentiel considérable pour l'innovation et la croissance [32, 33].

I.4.2 Architectures du réseau d'accès et réseau cœur 5G

L'architecture du réseau 5G est principalement constituée de deux sous-systèmes, le réseau d'accès et le réseau cœur 5G:

Réseau d'accès radio (RAN) 5G :

- Utilise la technologie New Radio (NR) pour transmettre des données.
- Pour mettre en place la 5G, les stations de base (gNB) se connectent aux terminaux mobiles et au réseau. Ces stations de base peuvent être installées au même endroit que les stations de base 4G (eNB) en mode non autonome (NSA). Dans ce mode, la 4G sert de support pour la signalisation et le contrôle, alors que la 5G se charge du transfert des données. Ce mode permet d'économiser les coûts d'installation et de bénéficier de la couverture existante de la 4G.
- La 5G peut fonctionner en mode autonome (SA), sans avoir besoin du réseau 4G. Dans ce mode, des stations de base (gNB) sont déployées pour assurer la gestion de la signalisation, du contrôle et du transfert des données. Ce mode offre plus de flexibilité et d'efficacité que le mode non autonome (NSA).

La partie réseau cœur 5G (Core Network (5GC)) assure les fonctionnalités suivantes :

- Défini par la spécification 3GPP et constitue une évolution majeure du 4G Core Network (EPC).
- L'architecture de services (SBA) permet de gérer toutes les fonctions et interactions de la 5G, telles que l'authentification, la sécurité et la segmentation.
- La 5GC répond aux exigences de débit plus élevé, de latence plus faible et de flexibilité requises par les applications 5G.
- Les deux composants d'un réseau 5G sont interdépendants et travaillent ensemble pour fournir des services 5G.

Le mode NSA est actuellement le plus largement déployé, mais le mode SA devrait offrir les avantages les plus importants de la 5G, tels qu'une latence réduite et la capacité de gérer un grand nombre d'appareils connectés [35, 36, 37].

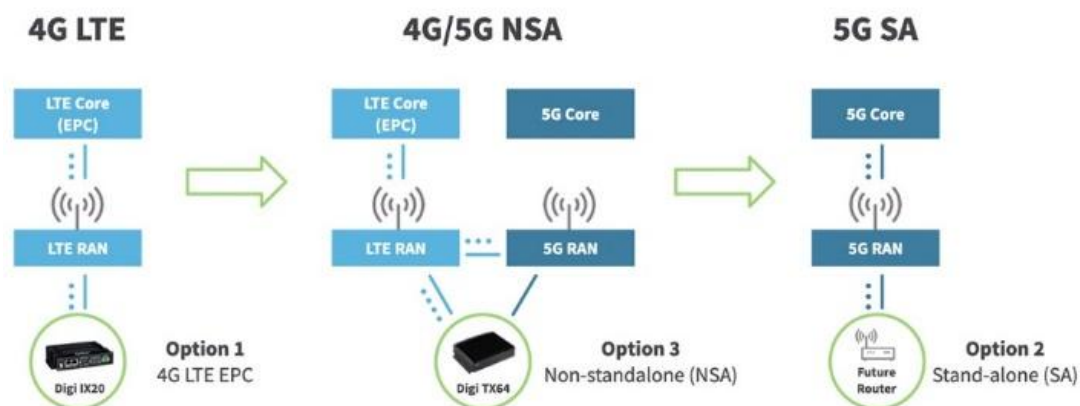


Figure I. 11: Architecture 5G core.

I.5 Applications des systèmes RoF

La technologie RoF trouve de nombreuses applications, notamment dans les communications par satellite, les communications radio mobiles, les services vidéo distribués multipoints, le haut débit mobile, les communications routières et les réseaux locaux. Le réseau optique est interconnecté avec les technologies sans fil. Voici une synthèse des principaux domaines d'application selon la référence [38]:

Réseaux cellulaires : La technologie RoF est couramment utilisée dans les réseaux cellulaires pour répondre aux besoins croissants de capacité, dus à l'augmentation du nombre d'abonnés mobiles et à la demande croissante de services à large bande. Grâce aux avantages offerts par la fibre optique, le trafic mobile peut être acheminé de manière efficace entre la station de contrôle et la station de base [39].

Communication par satellite : La communication par satellite a été la première application de la technologie RoF pour acheminer les signaux d'antennes vers les emplacements appropriés. Dans ce cas, des liaisons optiques à courte distance (moins de 1 km) sont utilisées, fonctionnant dans une plage de fréquences de 1 GHz à 15 GHz. Cela permet de concentrer les dispositifs à haute fréquence de manière efficace [39].

Les systèmes de distribution vidéo : tels que les services de distribution vidéo multipoint (MVDS), représentent un domaine d'application prometteur pour la technologie RoF. Le MVDS est un système de transmission mobile terrestre utilisé spécifiquement pour la diffusion de vidéos. À l'origine, il était conçu pour la diffusion unidirectionnelle, mais il a récemment intégré un canal de retour (uplink) pour offrir une interactivité accrue. Le MVDS peut être utilisé pour couvrir des zones de la taille d'une petite ville [39].

I.5.1 Limitations des systèmes Radio sur Fibre

La dispersion au niveau de la fibre : La longueur des liens est souvent limitée par une contrainte spécifique. Dans le cas des fibres monomodes (SMF), la dispersion chromatique constitue la principale limitation, tandis que pour les fibres multimodes (MMF), c'est la dispersion multimode qui pose principalement problème.

Bruit et Non-linéarité du dimensionnement du système, il est essentiel de prendre en compte les imperfections spécifiques telles que le bruit (facteur de bruit : NF) et la non-linéarité IP3 (point de compression de troisième ordre), qui sont dues à l'utilisation de signaux analogiques. La plage dynamique (DR) d'une liaison radio fibre optique est limitée par ces limites. En respectant les limites d'interférence (SNR) et la non-linéarité (distorsion

du signal), La dynamique se réfère à l'écart entre les signaux les plus puissants et les plus faibles qui circulent sur l'ensemble de la liaison [40].

I.6 Conclusion

La transmission optique et la transmission radio se complètent dans les systèmes Radio-sur-Fibre (RoF), qui sont des solutions innovantes. Ces systèmes offrent de multiples avantages, notamment une grande flexibilité, une large bande passante, une faible latence, une faible consommation énergétique et une facilité de déploiement. Ils conviennent bien aux applications de réseaux d'accès, de réseaux cœur, de réseaux in-building/indoor et de réseaux green. Ils respectent aussi les exigences du standard 5G, Ces systèmes répondent aux demandes croissantes de connectivité, de mobilité, de qualité de service et de variété des services. Dans ce travail, nous avons donné un aperçu global sur les systèmes RoF, en expliquant les principes de base, les architectures, les performances et les applications de ces systèmes. Nous avons aussi relevé les principaux défis et limitations des systèmes RoF, comme la distorsion non linéaire, le bruit, l'adaptation d'impédance, la dispersion chromatique et la compensation de dispersion. Nous avons suggéré des axes de recherche pour améliorer les performances des systèmes RoF et les rendre plus efficaces et plus fiables [41].

II.1 Introduction

En raison de l'augmentation significative du nombre d'utilisateurs, la 5G crée de nouvelles exigences pour les réseaux de communications mobiles. Ces exigences concernent notamment la capacité, la latence et la densité de connexion. En raison de l'apparition de la 5G, Pour gérer une large gamme de services à large bande, les systèmes de communication sans fil doivent respecter des normes plus strictes. Dans ce contexte, la technologie radio sur fibre permet la transmission de signaux à très haute vitesse sur de longues distances en contournant les limitations de propagation dans l'air [42].

Dans ce chapitre, nous étudierons comment la technologie RoF optimise la transmission de signaux numériques de haute complexité. Ce chapitre vise à examiner en détail les performances de la technologie OFDM dans la transmission sans fil et sur fibre optique, Pour apprécier la constance et la performance des échanges d'informations destinées aux applications 5G sans fil, tout en soulignant les bénéfices et les difficultés liés à l'utilisation de la RoF dans ce contexte.

II.2 Techniques de modulation de la radio –sur-fibre ROF

Il est essentiel d'utiliser des méthodes pour moduler par la radio sur fibre afin d'assurer une transmission efficace des signaux radio via des liaisons optiques. Les signaux radio peuvent être convertis en signaux optiques grâce à ces techniques, ce qui permet une distribution efficace des signaux vers divers points d'accès sans fil. Selon les recherches, la modulation directe du laser par les signaux radio et la détection quadratique peuvent être utilisées pour recevoir les signaux optiques [43]. En outre, l'étude de l'Orthogonal Frequency Division Multiplexing et de ses différentes versions a été menée pour l'interface radio 5G, mettant en évidence l'évolution continue des techniques de modulation dans le domaine de la radio sur fibre [30].

II.2.1 Modulation directe

Au sein des réseaux de télécommunication en fibre optique, la modulation directe consiste à réguler directement l'intensité ou la puissance optique de la source laser sans avoir besoin de composants externes. Malgré les contraintes en matière de bande passante par rapport à la modulation externe, cette méthode est plus facile à appliquer et moins onéreuse. Des vitesses de 25 Gbps par laser peuvent être atteintes par les lasers à modulation directe [44].

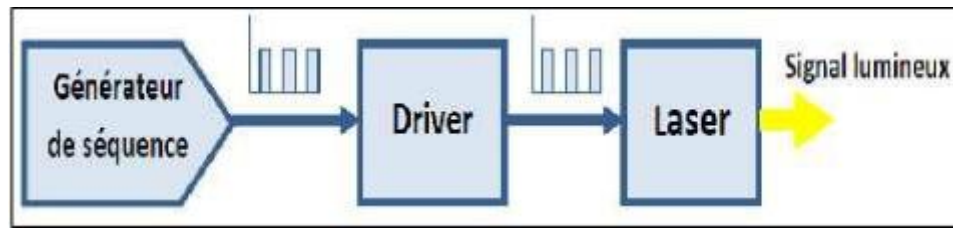


Figure II. 1: Modulation directe [45].

II.2.2 Modulation externe

Au cœur des systèmes de télécommunication qui intègrent la fibre optique, En modulant directement le faisceau lumineux émis par le laser sans altérer le courant d'alimentation du laser, la modulation externe permet d'enregistrer des données électriques sur un signal optique continu. Les composants tels que les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA), les modulateurs acousto-optiques (AOM) et les modulateurs électro-optiques (EOM) jouent un rôle dans la modulation du signal optique [46, 47]. Son importance est primordiale pour assurer une qualité de transmission optimale, particulièrement à des vitesses élevées excédant 5 Gbits/s [47].

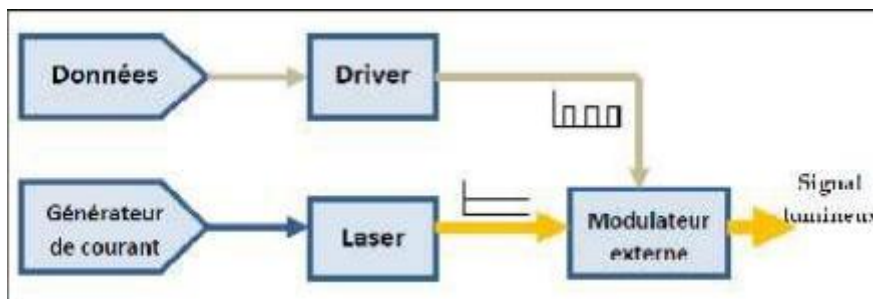


Figure II. 2: Modulation externe [45].

II.2.2.1 Modulation d'intensité avec détection (IM-DD)

La modulation d'intensité avec détection directe (IM-DD) utilise une photodiode pour détecter directement l'enveloppe du signal optique. La méthode implique l'utilisation d'un signal de modulation RF pour adapter l'intensité du signal optique transmis à travers la fibre optique, et l'intensité optique est directement détectée au bout d'une photodiode [49]. Cette méthode a plusieurs avantages, notamment sa simplicité, son efficacité énergétique et ses performances pour les systèmes de télécommunications optiques [49].

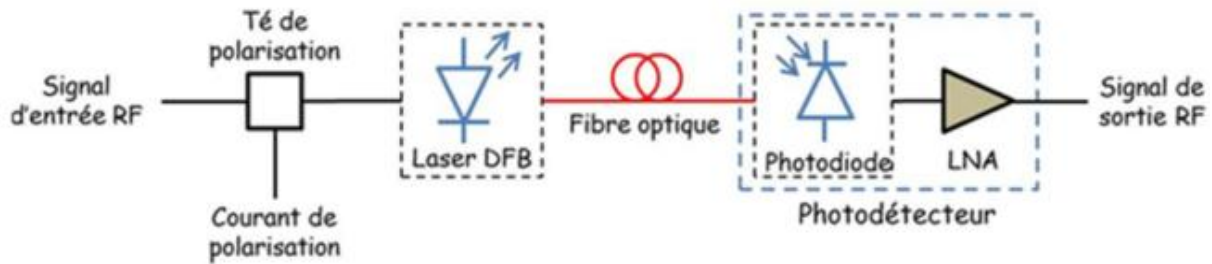


Figure II. 3: Liaison à modulation directe [49].

II.2.2.2 Modulation d'intensité avec détection cohérente (IM-CD)

Dans le domaine de la communication optique, la modulation d'intensité avec détection cohérente (IM-CD) est une méthode couramment employée. Elle consiste à moduler l'intensité du signal optique et à le détecter de manière cohérente, ce qui offre des bénéfices en termes d'efficacité énergétique et de performances [2, 9]. Habituellement, ce système utilise une modulation vectorielle telle que la M-PSK ou la M-QAM pour encoder les données. Cette approche maximise l'efficacité de la bande passante à disposition. La détection cohérente s'appuie sur l'analyse linéaire de l'enveloppe complexe du signal optique. Cela simplifie l'application d'algorithmes sophistiqués de traitement numérique du signal conçus pour les systèmes de communication radio [50].

II.2.2.3 Modulation de phase avec détection directe (PM-DD)

La technique de modulation avancée appelée modulation PM-DD est employée dans les systèmes de communication optique. Lors de ce processus, l'information à communiquer est encodée dans la phase d'un signal optique. Par la suite, ce signal modulé en phase est envoyé sur le canal de communication, tel une fibre optique. La modulation PM-DD à la réception se distingue par sa capacité à détecter directement la phase du signal, ce qui permet d'éviter de le convertir en une autre forme, telle que l'ampleur. De nombreux avantages découlent de cette méthode, notamment une meilleure efficacité spectrale, une résistance à certaines distorsions et une exploitation optimisée de la bande passante à disposition. Toutefois, la modulation PM-DD peut aussi engendrer des difficultés, comme une sensibilité plus élevée aux variations de phase et aux défauts du canal de transmission. Bien que ces éléments soient pris en considération, elle continue d'être une option préférée dans les systèmes de communication optique modernes et contribue à améliorer les performances globales de la transmission des données [51].

II.2.2.4 Modulation de phase avec détection cohérente (PM- CD)

Une technique de modulation sophistiquée utilisée dans les systèmes de communication optique est la modulation de phase avec détection cohérente (PM-CD). En modulant la phase d'un signal optique et en détectant de manière cohérente la phase à la réception, cette technique permet la transmission de données. Contrairement à la détection directe qui mesure directement la phase du signal, la détection cohérente utilise une référence cohérente pour déterminer la phase du signal reçu. Il est envisageable de générer cette référence cohérente de manière locale ou elle peut être envoyée avec le signal modulé. La détection cohérente permet d'obtenir une phase du signal plus précise, ce qui présente des bénéfices importants en matière de sensibilité et de performance du système. La modulation PM-CD permet aux systèmes d'atteindre des débits de données élevés tout en maintenant une qualité de signal élevée, ce qui en fait une technique essentielle dans les réseaux de communication optique à haut débit et à longue distance [52].

II.3 Modulateurs optiques

Le fonctionnement d'un modulateur optique implique d'intégrer un signal dans une onde optique porteuse en modifiant l'un ou plusieurs des paramètres spécifiques de cette onde. Ces dispositifs ont pour fonction de réguler différentes propriétés de la lumière, habituellement provenant d'un faisceau optique tel qu'un faisceau laser. On distingue différents types de modulateurs optiques en fonction de l'attribut de la lumière contrôlée, tels que les modulateurs de phase et les modulateurs d'intensité. Un modulateur optique peut jouer un rôle crucial dans les réseaux à fibres optiques en tant que commutateur pour les signaux optiques, tout comme un transistor agit comme un commutateur pour les signaux électroniques [53, 54].

II.3.1 Modulateurs électro-optiques

Les modulateurs électro-optiques sont des dispositifs spécialement conçus pour ajuster les propriétés d'un faisceau lumineux en réaction à l'influence d'un champ électrique. Ces dispositifs peuvent influencer des aspects comme l'état de polarisation, l'intensité, la fréquence, la phase, la position ou l'orientation du faisceau lumineux. Ils se démarquent particulièrement par leur large plage de fréquences, qui s'étend sur plusieurs dizaines de gigahertz [55].

II.3.1.1 Modulateur de phase

Le modulateur de phase est utilisé pour modifier la phase de la porteuse du signal en accord avec le signal modulateur. Cela indique que la phase de la porteuse change de façon linéaire par rapport au signal à transmettre. La modulation de phase permet de transmettre les informations en modifiant la phase de la porteuse plutôt que son amplitude.

La modulation de phase consiste à ajuster la phase de la porteuse selon le signal de modulation, ce qui fait que la phase instantanée change de manière linéaire en fonction du signal modulant [56]. La différence entre la modulation de phase et la modulation de fréquence réside dans la possibilité de lier directement la phase de la porteuse au message ou à la totalité du message.

Un modulateur de phase peut être utilisé pour réaliser une modulation de phase, qui peut être adapté à un modulateur AM traditionnel pour effectuer une modulation de phase à bande étroite. Il est envisageable de concevoir un module de fréquence à bande étroite en ajoutant un module de fréquence à bande étroite à l'entrée d'un modulateur de phase [57].

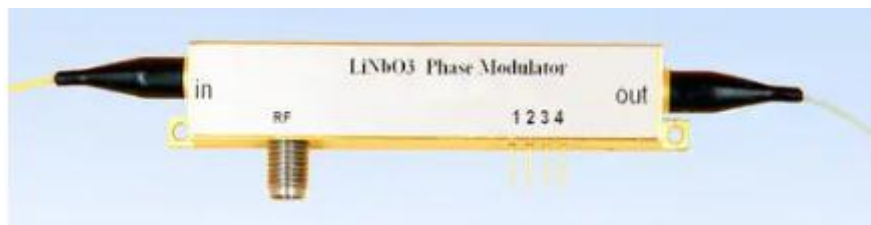


Figure II. 4: Modulateur de phase [58].

II.3.1.2 Modulateur d'intensité de Mach-Zehnder

L'interférométrie de Mach-Zehnder est un dispositif électro-optique utilisé pour contrôler l'intensité lumineuse d'un faisceau en utilisant le principe de l'intensité de Mach-Zehnder. En ajustant la tension appliquée à la polarisation, il est envisageable de changer la façon dont le faisceau passe à travers le dispositif, ce qui permet de réguler de façon précise et contrôlée l'intensité du signal optique. Grâce à ses performances remarquables et à sa stabilité remarquable, ce type de modulateur est fréquemment utilisé dans divers domaines, comme les télécommunications et le traitement optique de l'information.

La modulation de l'intensité de Mach-Zehnder se fait en ajustant l'indice de réfraction du matériau en réponse aux champs électriques. Lorsque cet indice est ajusté, la phase de l'onde optique qui traverse le dispositif change, ce qui a des répercussions sur l'intensité lumineuse transmise. Il est possible de réguler le point de fonctionnement du modulateur en ajustant la

tension de polarisation, ce qui permet d'obtenir diverses amplitudes de modulation Selon les critères particuliers de l'application.

Les modulateurs d'intensité de Mach-Zehnder sont des outils essentiels dans de nombreuses applications qui requièrent une modulation précise et rapide de l'intensité lumineuse, notamment dans les secteurs des communications optiques et des systèmes laser. Étant donné leur grande capacité de transmission et leur grande flexibilité, ils sont fréquemment employés, ce qui permet d'ajuster l'intensité du signal optique en fonction des besoins spécifiques de chaque application. Les modulateurs de Mach-Zehnder sont essentiels pour améliorer l'efficacité et les performances des systèmes optiques dans divers secteurs industriels et de recherche en raison de leurs caractéristiques[59].

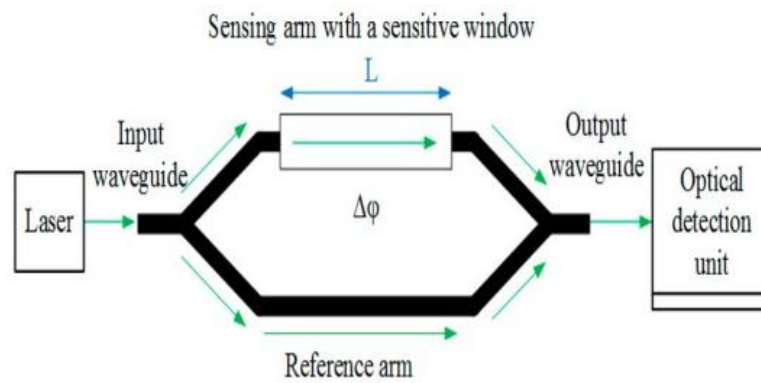


Figure II. 5: Schéma de fonctionnement du modulateur Mach Zehnder [60].

II.3.1.3 Modulateurs à électro-absorption (MEA)

Les modulateurs à électro-absorption exploitent l'effet optique connu sous le nom de Franz-Keldysh pour réguler l'intensité lumineuse d'un faisceau. On réalise cette modulation en utilisant un champ électrique externe pour influencer la bande d'absorption d'un matériau semi-conducteur. En utilisant simplement une tension électrique, ces dispositifs permettent de réguler avec précision et rapidité l'intensité, ou la puissance optique, d'un faisceau laser.

On utilise fréquemment des guides d'ondes munis d'électrodes comme des modulateurs à électro-absorption, qui permettent d'appliquer un champ électrique perpendiculaire au faisceau lumineux en modulation. Ces individus utilisent l'effet Stark quantique restreint dans une structure de puits quantique afin d'atteindre un rapport d'extinction élevé. À la différence des modulateurs électro-optiques, ceux qui font appel à l'électro-absorption ont la capacité de fonctionner à des tensions relativement basses, d'environ quelques volts, au lieu de nécessiter des centaines de milliers de volts.

De plus, ils proposent une plage de modulation allant jusqu'à plusieurs dizaines de gigahertz, ce qui les rend indispensables pour les communications à grande vitesse par fibre optique [61].

II.4 Transmission de signaux sur les liaisons RoF

La technologie RoF permet de transporter des signaux radiofréquences à travers des fibres optiques, en passant des signaux radio aux signaux optiques, et vice versa. Ces connexions permettent une répartition efficace des signaux à haut débit en combinant les avantages des communications optiques et sans fil. Ils ont la capacité de transmettre des signaux en bande de base, en fréquence intermédiaire ou en fréquence radio, ce qui les rend extrêmement flexibles pour une variété d'applications, y compris les bandes millimétriques. Des avantages majeurs sont offerts par les systèmes RoF, tels qu'une réduction restreinte de la fibre optique, une vaste plage de transmission, une protection contre les interférences électromagnétiques et une amélioration de l'efficacité. En raison de ces propriétés, il convient parfaitement à de nombreuses applications sans fil qui nécessitent une transmission fiable et rapide de signaux à haut débit [62].

II.4.1 Liaison RoF à modulation externe avec EML

Un laser électroluminescent (EML) et une photodiode rapide sont employés pour étudier la connexion utilisant la modulation externe. Le gain de cette connexion varie de -38 dB à -49 dB après amplification avec un amplificateur de 30 dB. La réserve de puissance disponible après la transmission dans la liaison RoF est limitée par cette variation. La variation possible de puissance à l'entrée de la liaison RoF est plus restreinte comparée à celle de la liaison Back-to-Back(B2B), car l'oscilloscope définit une puissance minimale de -30 dBm pour obtenir un EVM optimal. La liaison RoF peut recevoir une puissance minimale de -20 à -10 dBm et une puissance maximale de 6 dBm, en fonction du point de polarisation EML. Le schéma synoptique de la liaison RoF est dépeint dans la figure II.6, illustrant le niveau de puissance à considérer à l'entrée de la liaison RoF [47].

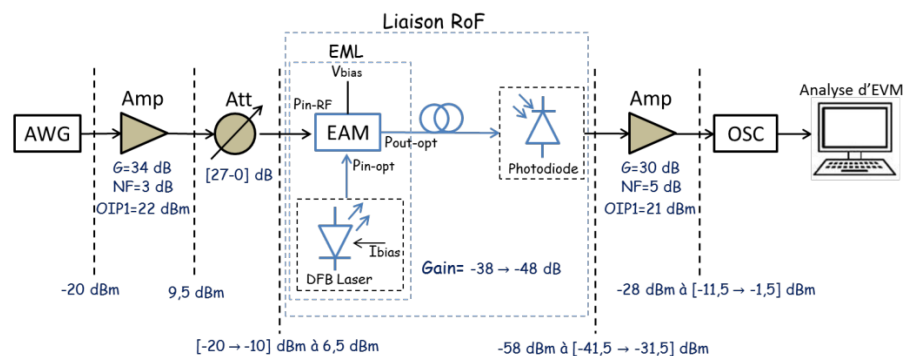
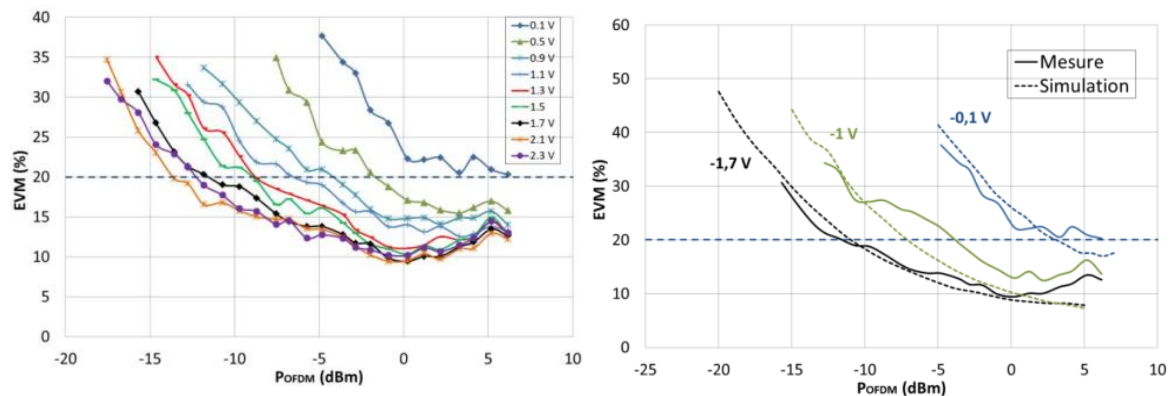


Figure II. 6: Schéma synoptique de la liaison RoF avec l'EML [63].

La figure II.7(a) illustre les mesures de l'Erreur Vectorielle de Modulation (EVM) concernant le format de modulation QPSK, montrant un débit d'environ 3.08 Gb/s avec une polarisation électrique de 50 mA. La figure II.7(b) l'EVM en fonction de la puissance de l'entrée du signal OFDM pour trois tensions de polarisation distinctes : -1,7 V, -1 V et -0,1 V. L'EVM augmente en fonction de l'accroissement de la tension de polarisation du MEA, surtout quand la puissance d'entrée est basse. Cette augmentation est due à l'élévation des densités spectrales de puissance du Bruit d'Intensité Relative (RIN) et du bruit de grenaille sous l'effet des tensions élevées. Bien que la densité spectrale de puissance de la photodiode reste constante pour un courant de polarisation spécifique, elle croît relativement au carré de la puissance optique incidente. De plus, l'amélioration de la performance de la liaison se réduit au-delà de la zone linéaire, contribuant ainsi à l'augmentation de l'EVM, qui est inversement proportionnelle au gain.

Les valeurs d'erreur vectorielle de modulation (EVM) idéal sont obtenues lorsque les points de polarisation se situent dans la région linéaire de la caractéristique statique du modulateur électro-absorbant (MEA) pour des puissances RF d'entrée élevées, ce qui correspond à des niveaux de tension de polarisation allant de -1.5 à -2.1 V. Des valeurs de IP1dB plus élevées sont observées à ces points de polarisation. Le point de polarisation idéal du MEA est -2.1 V, cela réduit l'effet du bruit et des non-linéarités du modulateur.

Selon les normes IEEE 802.15.3c, un EVM de 20% est un critère de qualité du format de modulation QAM. Une plage de puissance à l'entrée est établie en se référant aux courbes de mesure de l'EVM afin d'assurer une transmission de qualité dans des conditions où l'EVM est inférieur à 20%. Dans cette plage de puissance, les points de polarisation dans la zone linéaire peuvent dépasser 20 dB [47].



a) b)

Figure II. 7: Mesure de l'EVM en fonction de la puissance de l'entrée du signal OFDM, avec un format de modulation QAM transmis sur la liaison RoF avec l'EML-2: a) Mesure et b) Simulation [47].

II.4.2 Liaison RoF à modulation externe avec MZM

La connexion avec le modulateur d'intensité de Mach-Zehnder (MZM) permet un gain limité, variant de -43 dB à -49 dB, de la même manière que la connexion avec l'EML. La plage de puissance dynamique est limitée par cette variation à l'entrée de la liaison RoF, qui divers selon le point de polarisation du MZM et comprend une plage de -20 à -14 dBm pour la puissance plus faible et jusqu'à 6,5 dBm pour la puissance plus élevée. Le schéma synoptique de cette liaison RoF est représenté à chaque niveau dans la Figure II.8. Le MZM a une puissance optique de 10 mW.

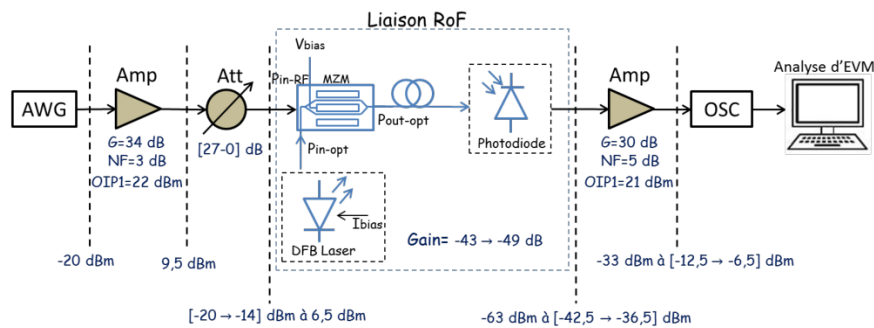


Figure II. 8: Schéma synoptique de la liaison RoF avec le modulateur externe MZM [63].

La Figure II.9 présente l'Erreur Vectorielle de Modulation (EVM) en ce qui concerne le format de modulation QPSK, avec un débit de 3.08 Gb/s. Pour ces mesures, différentes tensions de polarisation du Modulateur d'intensité de Mach-Zehnder (MZM) sont utilisées, allant de 4 V à 9 V [7]. Sous une tension de polarisation de 9 V, La liaison affiche un faible gain et une réponse fortement non linéaire, provoquant un EVM élevé qui ne peut pas être mesuré de manière précise. En revanche, Sous une tension de polarisation de 4 V, le gain de la liaison reste également très restreint, rendant difficile la détection de l'EVM pour les puissances d'entrée faibles. De plus, l'influence des non-linéarités à haute puissance d'entrée est observable, car la plus petite valeur de l'EVM dépasse celle obtenue avec d'autres polarisations [47].

Une fois la tension de polarisation réglée à 5 V et avec de faibles niveaux de puissance en entrée, la qualité de réception du signal OFDM diminue. En conséquence, la

tension de polarisation du modulateur d'intensité de Mach-Zehnder (MZM) augmente, ce qui augmente l'Erreur vectorielle de modulation (EVM). À des niveaux de puissance d'entrée autour de 0 dBm, La saturation due à la non-linéarité du MZM n'a pas encore été atteinte, et l'EVM décroît davantage à mesure que le rapport signal-bruit augmente. La raison en est que le MZM présente une linéarité satisfaisante pour diverses tensions de polarisation, où les valeurs d'IP1dB précédemment mesurées n'avaient pas été atteintes. Le point de polarisation optimal est généralement placé au centre de la plage linéaire de la caractéristique statique du MZM ,à une tension de 6 V. Lorsque l'EVM est limité à 20%, les points de polarisation du MZM situés dans la zone linéaire démontrent une variation de puissance d'entrée supérieure à 22 dB[47].

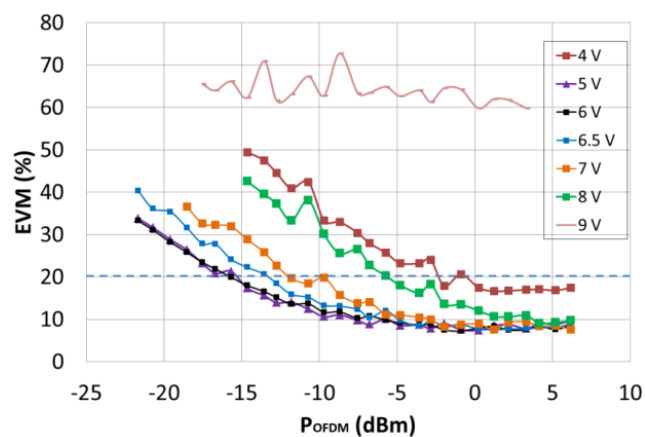


Figure II. 9: Mesures de l'EVM de la liaison RoF à modulation externe avec le MZM pour un format de modulation QPSK et plusieurs tensions de polarisation en fonction de la puissance moyenne à l'entrée [47].

Les études menées sur les valeurs d'Erreur Vectorielle de Modulation (EVM) pour la modulation externe avec le Modulateur d'Intensité de Mach-Zehnder (MZM) indiquaient la faisabilité d'une transmission avec un schéma de modulation plus élaboré, tel que le 64 QAM. Les résultats des mesures de l'EVM pour cette modulation sont illustrés dans la figure II.10(b), avec un débit de 9,24 Gb/s. Les tensions de polarisation idéales ont été sélectionnées pour être à 5, 6 et 7 V. Les valeurs d'EVM dépassant 12 % sont considérées comme erronées dans ce format de modulation. D'où la limitation de cette étude à une plage de puissance d'entrée restreinte, allant de -13 à 6 dBm. D'après les critères du standard IEEE 802.15.3c, ce format de modulation doit respecter une limite d'EVM de 7%. Une transmission optimale est possible dans une gamme dynamique de puissances d'entrée d'environ 6 dB, permettant ainsi une transmission à très haut débit [47].

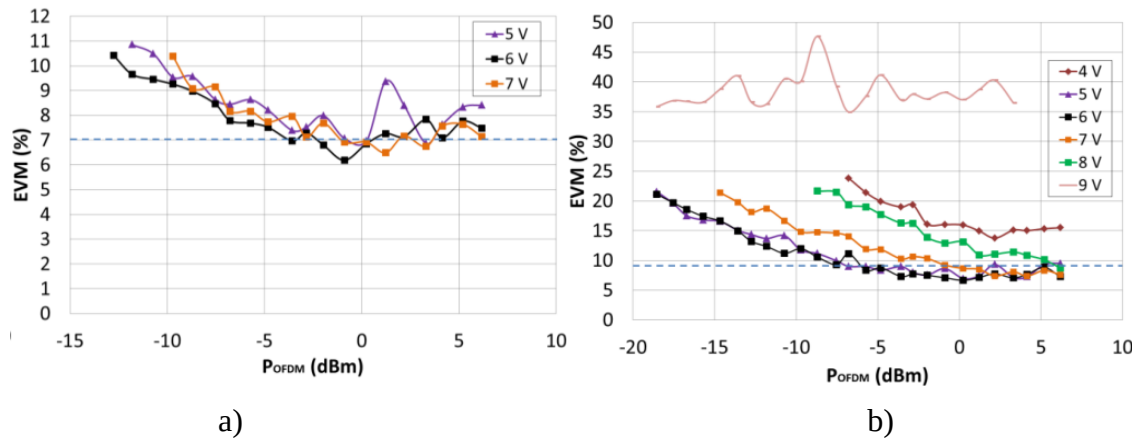


Figure II. 10: Les mesures de l'EVM de la liaison RoF à la modulation externe avec le MZM sont basées sur la puissance d'entrée de la liaison RoF pour plusieurs tensions de polarisation et deux formats de modulation: a) 16 QAM et 64 QAM [47].

II.4.3 Intégration de la liaison sans fil à 60 GHz

La recherche se concentre principalement sur les réseaux sans fil domestiques à 60 GHz. Au niveau de la polarisation, la puissance optique en sortie du MZM est augmentée, ce qui entraîne une augmentation du bruit total à la réception et contribue à l'EVM, ou depuis un point d'accès vers d'autres secteurs, car la portée radio pour de telles applications est restreinte à la dimension d'une pièce. Pour évaluer l'Erreur Vectorielle de Modulation (EVM) chez l'utilisateur final, nous avons inclus un canal sans fil dans nos simulations. Le canal radio à 60 GHz a été ajouté à la configuration de la liaison RoF simulée. La figure II.10 représente le cadre de cette liaison. Pour effectuer la conversion de la fréquence entre la fréquence intermédiaire IF et la fréquence radio en bande millimétrique, il est essentiel d'utiliser des oscillateurs locaux à 60 GHz [47].

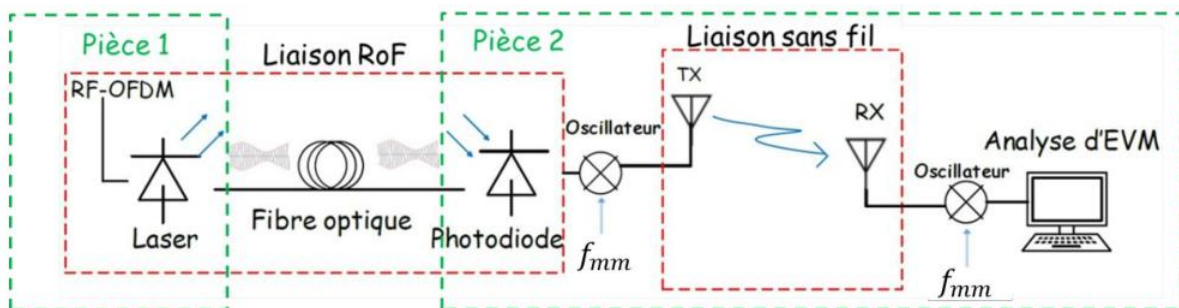


Figure II. 11: Schéma synthétique de la connexion RoF avec la connexion sans fil [63].

La bande millimétrique de 60 GHz présente des paramètres de transmission qui diffèrent grandement de ceux des bandes WPAN / WLAN de 2 à 5 GHz. En fait, la transmission à 60

GHz est presque optique et les différences principales entre la transmission sans fil des bandes centimétriques et millimétriques sont les suivantes[47] :

- La propagation à 60 GHz entraîne une augmentation de 20 à 30 dB de la perte électrique par rapport aux bandes de 2 à 5 GHz.
- Les phénomènes de diffraction (Shadowing fading) sont nettement moins prononcés lorsque le champ électromagnétique se propage derrière les obstacles que dans la bande 2- 5 GHz.

II.5 Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM)

L'OFDM permet de moduler les signaux numériques en répartissant les données sur plusieurs porteuses voisines, chacune étant chargée d'une petite partie de la largeur de bande. Les interférences et la qualité de transmission sont réduites grâce à l'utilisation de sous-porteuses orthogonales entre elles dans cette méthode. L'OFDM est souvent employé dans les liaisons sans fil à débit élevé, tels que le Wi-Fi, les télécommunications cellulaires et similaires, grâce à ses bénéfices en termes de protection contre les interférences, d'efficacité spectrale, de résistance aux interférences entre symboles et de simplification de l'égalisation des canaux [63].

II.5.1 Avantages de l'OFDM

Résistance aux perturbations : Les perturbations ont une largeur de bande limitée et ne sont pas affectées par tous les sous-canaux.

La performance du spectre : Effectuer une utilisation optimale du spectre disponible. L'ISI présente une grande résistance à la perturbation entre les symboles et les trames. La simplification de l'égalisation des canaux permet une égalisation facile des canaux.

II.5.2 Inconvénients de l'OFDM

Il est crucial de ne pas être linéaire afin d'éviter les perturbations dans les systèmes de transmission et de réception OFDM. Les perturbations entre les porteuses peuvent être causées par la distorsion de l'intermodulation en raison de la non-linéarité.

L'OFDM est utilisé dans diverses technologies de communication en raison de ses performances et de sa capacité à gérer de manière efficace les défis liés à la transmission de données à large bande passante, comme le Wi-Fi, les télécommunications cellulaires, le LTE et d'autres liaisons sans fil à haut débit [64].

L'OFDM est couramment employé dans différents secteurs, comme les communications sans fil et les communications filaires. Voici quelques exemples d'utilisations de l'OFDM comme indiqué dans les sources fournies :

ADSL: Répandu dans les réseaux de communication filaire pour transmettre des informations à une vitesse élevée.

Le Wi-Fi est utilisé par les réseaux locaux sans fil afin d'assurer des connexions sans fil rapides et fiables [65].

Le LTE (4G) est intégré dans les réseaux cellulaires de quatrième génération et offre des communications sans fil de haute qualité.

La transmission efficace des signaux est assurée par les systèmes de télévision numérique terrestre qui utilisent le TNT .

Proposé pour les futurs réseaux mobiles en collaboration avec des approches d'accès multiples.

Ces exemples soulignent la variété et l'efficacité de l'OFDM dans différents domaines de communication, que ce soit pour la transmission de données à grande capacité, la diffusion de contenu audiovisuel ou les réseaux sans fil avancés [65].

II.6 Systèmes de transport des données à 60 GHz par RoF

Les techniques de transmission des informations à 60 GHz par Radio sur Fibre offrent une solution aux difficultés rencontrées lors du transport de signaux à très haut débit. Grâce à la technologie RoF, ces appareils surpassent les limitations de distance causées par les fréquences élevées dans l'espace libre. Les signaux numériques complexes sont transmis à 60 GHz via la technique de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence. Ces dispositifs sont conçus dans le but d'assurer des performances optimales en matière de débit et de qualité de transmission, en utilisant les bénéfices de l'OFDM et de la technologie RoF, afin de satisfaire la demande grandissante en bande passante des communications mobiles et sans fil, en particulier dans le cadre de la 5G [66].

Les réseaux RoF classiques utilisent la modulation d'amplitude OOK de type NRZ pour transmettre le signal numérique. Cependant, la station centrale (SC) présente deux configurations lorsqu'elle utilise divers formats de modulation tels que l'OFDM. Pour la transmission RoF en bande de base, il est nécessaire d'utiliser deux modulateurs Mach-Zehnder lors de la conversion optique des ondes millimétriques RF à 60 GHz. Dans le cas opposé, la conversion des ondes millimétriques RF est effectuée par l'utilisation d'un

mélangeur (transmission RoF en RF). L'objectif de cette option est de mettre en place un système RoF-OFDM avec une station de base (BS) simple et économique, cela permet de diminuer les frais d'entretien et de favoriser l'utilisation de composants actifs moins onéreux.

II.6.1 Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant 2 MZM

Pour mettre en place un système de transmission optique à 60 GHz ROF-OFDM avec deux MZM, il est nécessaire d'utiliser deux modulateurs Mach-Zehnder. Ce système vise à générer et à transmettre des signaux OFDM via une liaison Radio sur Fibre à haute fréquence.

Les deux MZM sont utilisés dans cette configuration pour contrôler le signal optique, ce qui permet de transmettre de manière efficace des signaux OFDM à 60 GHz [41].

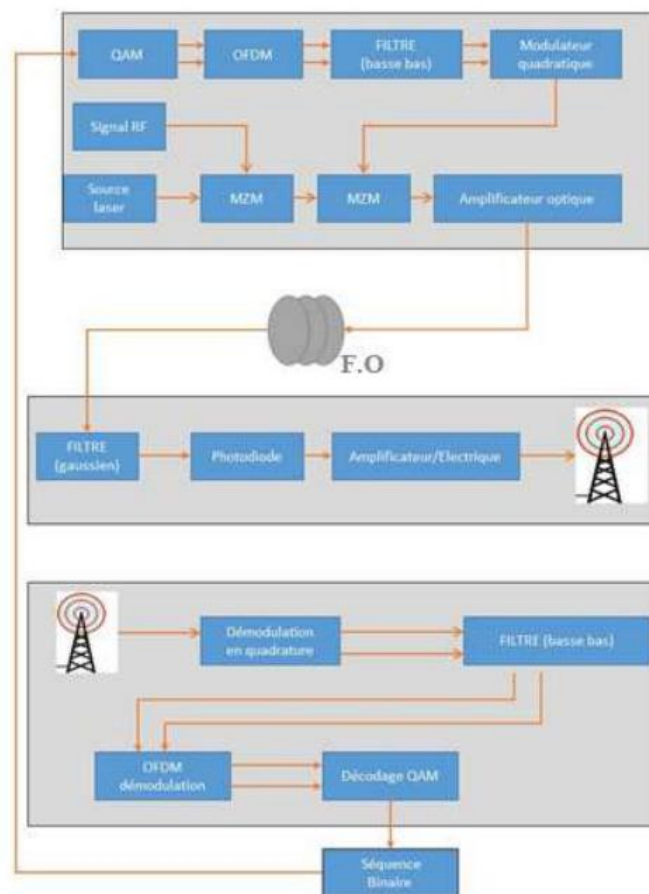


Figure II. 12: Architecture ROF-OFDM utilisant 2 MZM [67]

La figure II.12 présente l'architecture ROF-OFDM utilisant deux modulateurs Mach-Zehnder pour convertir les ondes millimétriques à 60 GHz.

Dans la station centrale (CS), le générateur de séquence de bits PRBS interne est utilisé pour produire une suite de bits. Ensuite, on subdivise cette séquence en deux sous-séquences

parallèles. Lors de l'installation d'un modulateur QAM, il est possible de transmettre chacune de ces sous-séquences sur deux porteuses en quadrature [68].

Une fois que les informations sont transmises, Il est faisable de changer l'intensité d'un signal en accord avec les symboles émis par la source.

Chaque port de sortie possède une amplitude qui correspond à l'une des valeurs de l'ensemble d'amplitudes [69] :

$$a_i = (2i - 1 - M)i=1,2,\dots,M. \quad (II.1)$$

- M est le nombre de séquences possibles de chiffres binaires, calculé selon :

$$M = 2^{\frac{h}{2}} \quad (II.2)$$

- h est le nombre de bits par symbole. L'ensemble QAM équivalent est donné par le carré de M.

Cela signifie si :

- h = 2, M = 2 alors nous avons un 4-QAM
- h = 4, M = 4 alors nous avons un 16-QAM.
- h = 6, M = 8 alors nous avons un 64-QAM
- h = 8, M = 16 alors nous avons un 256-QAM

Un flux de données à faible débit affecte chacune des sous-porteuses orthogonales du spectre disponible à l'aide d'un modulateur OFDM. L'objectif de ce format est de minimiser fortement les interférences entre les ports et les symboles (ICI et ISI) [70].

Le signal RF de 60 GHZ commande le MZM-1 et est transmis à une porteuse optique fabriquée par un laser. Le signal généré par le MZM-1 agira comme un module quadrature pour contrôler le second MZM-2.

Le signal modulé est amplifié avant de le transmettre à la section de réception à travers une fibre optique [71].

L'une des bandes latérales est éliminée par un filtre à la station de base (section de réception).

La fonction de transfert peut être définie de la manière suivante [72]:

$$H(f) = \alpha e^{-\ln(2)\sqrt{2}\left(\frac{f-f_c}{B/2}\right)^{2N}} \quad (II.3)$$

Où :

- H (f) : est la fonction de transfert du filtre,
- α : le paramètre Affaiblissement d'insertion,

- f_c : la fréquence centrale du filtre définie par le paramètre Fréquence,
- B : la Largeur de bande, N le paramètre Ordre et f la fréquence.

Puis une photodiode PIN est employée pour générer un courant électrique en transformant un signal optique en un courant électrique. La photodiode amplifiera le signal et le transmettra à l'antenne de réception de la station mobile (MS) en utilisant une antenne émettrice. Le démodulateur quadratique pour le MS implique d'utiliser un démodulateur analogique qui intègre un dispositif de transport pour les composants quadratures Q et I. Le signal en sortie est réduit en fonction de [72]:

$$V_I(t) = [G_{V_{in}}(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_c)] * h_{low}(t) \quad (II.4)$$

$$V_Q(t) = [-G_{V_{in}}(t) \sin(2\pi f_c t + \phi_c)] * h_{low}(t) \quad (II.5)$$

Ou :

- V_{in} : est le signal électrique d'entrée
- G : le paramètre gain
- f_c : la fréquence porteuse
- Φ_c est la phase de la porteuse
- H_{low} : la réponse temporelle du filtre passe-bas.

En ce qui concerne le MS, une antenne collecte les données, les démodule en quadrature, les démultiplexe en OFDM, puis les récupère à l'aide d'un décodeur QAM.

II.6.2 Architecture ROF-OFDM à 60 GHz utilisant un mélangeur

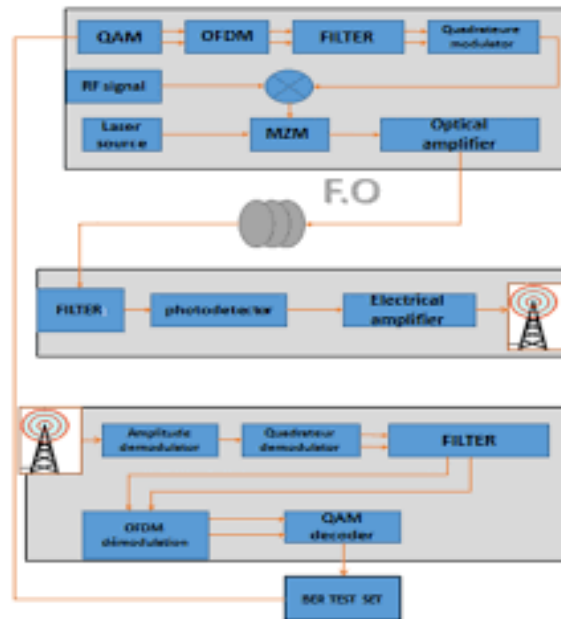


Figure II. 13: Conception d'une architecture ROF-OFDM basée sur un seul MZM [67]

Les données sont modulées par la station centrale (CS) en utilisant un traitement OFDM, Ceci demande la mise en œuvre de la séquence PRBS et la génération préalable de QAM (64-QAM). Donc, le signal OFDM transformé en un signal analogique RF à l'aide d'un mélangeur RF-IQ, une modulation en quadrature adéquate.

Par la suite, le signal obtenu est transmis à une porteuse analogique de 60 GHz en utilisant une méthode de multiplication, qui utilise une porteuse optique pour gérer le MZM à partir d'une source laser. Ensuite, cette information est transmise à travers la fibre optique, où elle est amplifiée par un EDFA pour renforcer le signal.

Un amplificateur électrique amplifie les signaux reçus de la fibre optique de la photodiode à la station de base, puis les transfère vers la station mobile grâce à une antenne.

En ce qui concerne la station mobile, Les données sont captées grâce à une antenne, puis démodulées par un démodulateur RF suivi d'un démodulateur en quadrature. Ensuite, on effectue un démultiplexage OFDM, suivi d'un décodeur QAM pour récupérer les données transmises [72].

II.7 Transmission de formes d'onde 5G sur le fronthaul

Pour garantir une interaction efficace et sûre entre les unités radio et les processeurs centraux dans les infrastructures 5G, l'adoption de solutions technologiques de pointe telles que la radio sur fibre est cruciale pour acheminer les signaux 5G via le fronthaul. Le fronthaul, qui assure des transmissions à grande vitesse et à latence réduite, est déterminant pour le succès de diverses fonctionnalités de la 5G, notamment le haut débit mobile amélioré (eMBB), les communications massives machine-type (mMTC) et les communications ultra-fiables et à faible latence (uRLLC). L'utilisation de techniques avancées comme le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) et le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) optimise les connexions en fibre optique du fronthaul, répondant ainsi aux besoins des réseaux 5G en matière de haut débit et de faible latence [73].

II.7.1 Transmission mono-porteuse sur la liaison montante PM-DD

La transmission des formes d'onde 5G (CP-OFDM et F-OFDM) sur la liaison PM-DD dans un contexte de transmission mono-porteuse est illustrée dans la figure II.14. Les différentes étapes de génération du signal en bande de base sont réalisées à l'aide de Matlab, Cela implique la génération d'échantillons 64-QAM dans le domaine des fréquences. L'insertion des symboles pilotes pour la reconnaissance du canal. L'incorporation du préfixe cyclique et du filtrage (pour F-OFDM). Ensuite, les échantillons temporels I (In-phase) et Q

(Quadrature) sont chargés dans un générateur de signaux arbitraires (AWG), qui enregistre également le signal sur une porteuse RF de fréquence 2 GHz. Par la suite, le signal RF est acheminé vers l'entrée RF du modulateur de phase. Le signal optique modulé est transmis à travers le lien optique, où il est détecté par une interférométrie, puis le photocourant est enregistré sur un oscilloscope rapide. Enfin, Le signal capturé par l'oscilloscope est démêlé par Matlab afin d'évaluer l'Erreur Vectorielle de Modulation (EVM) durant la phase de post-traitement [30].

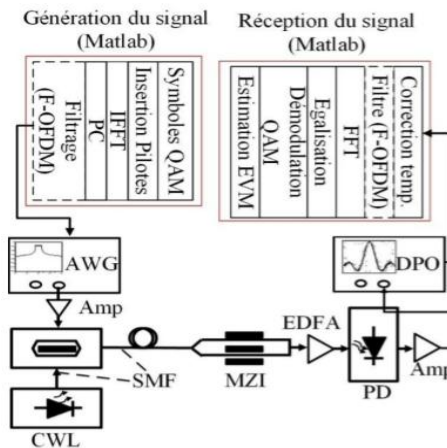


Figure II. 14: Banc de mesure expérimental de l'EVM [62].

II.7.2 Transmission multi-porteuse sur la liaison montante PM-DD

Le processus de multiplexage est réalisé à l'aide de Matlab (figure II.15), comme pour la transmission à un seul port, où plusieurs canaux sont multiplexés dans le domaine des fréquences, puis transformés dans la dimension temporelle soutien d'une transformée de Fourier inverse (IFFT). Le générateur de formes d'ondes arbitraires (AWG) est utilisé pour transférer le signal multiplexé alentour d'une porteuse radiofréquence (RF) à bande latérale unique (SSB) pour les mesures expérimentales. Dans les simulations, un bloc d'interpolation est utilisé pour représenter l'AWG, suivi un convertisseur SSB est employé pour calibrer le multiplex à la fréquence RF voulue. Après correction temporelle, le récepteur démultiplie les canaux à l'aide d'une banque de filtres numériques et d'un module d'égalisation de fréquence. Enfin, la magnitude du vecteur d'erreur (EVM) est estimée pour chaque canal [30].

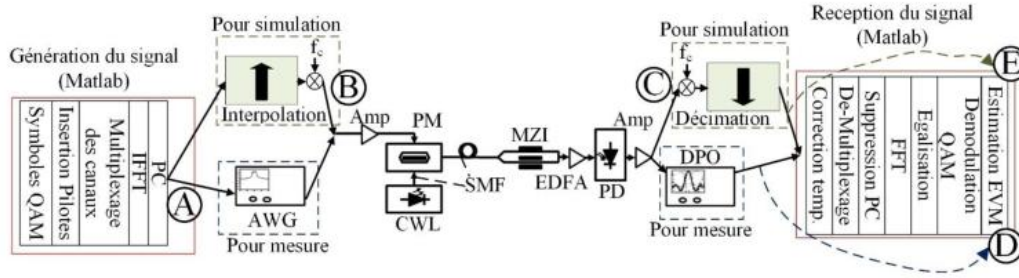


Figure II. 15: Évaluation des performances de la transmission multi-canaux sur un banc de mesure [62].

II.7.3 Transmission mono-porteuse sur la liaison descendante IM-DD

Le laser et la photodiode sont utilisés pour transmettre un signal OFDM sur une liaison IM-DD à l'aide de circuits équivalents. Les valeurs EVM obtenues pour des niveaux de signal d'entrée allant de -20 à +20 dBm sont présentés à la figure II.16, sur la base de différentes fréquences RF. Le laser fonctionne avec un courant de polarisation de 300 mA, qui correspond à une puissance optique de 17 dBm, est utilisé pour obtenir ces mesures. Pour des puissances RF dépassant 1 dBm, l'EVM reste constant sur la bande de fréquences 2-5 GHz. Étant donné que la source RF est située dans la station DU, il est possible d'atteindre cette puissance pour assurer la transparence de la liaison à la fréquence IF tout en restant dans la plage de fonctionnement sans perturbation. Lorsque l'EVM est inférieur à 8%, la plage de puissance RF s'étend de -15 à +19 dBm pour la fréquence de 3,6 GHz, ce qui représente une plage dynamique de 33 dB.

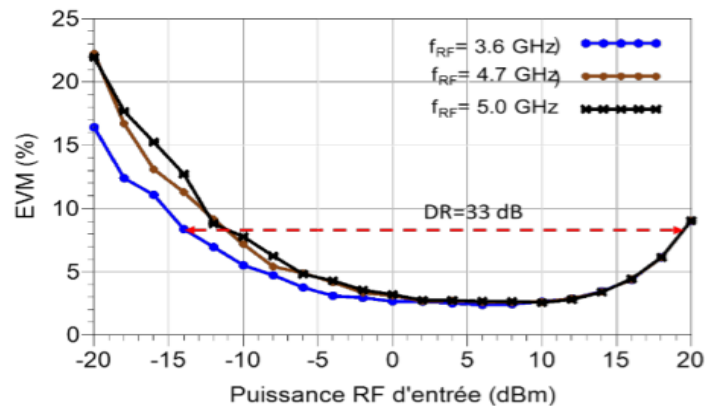


Figure II. 16: Évaluation de l'EVM en utilisant la puissance RF d'entrée pour différentes valeurs de la fréquence RF, le courant de polarisation est de 300 mA, la tension DC est 6 V [30].

II.7.4 Transmission multi-porteuses sur la liaison descendante IM-DD

Il est crucial que le nouveau poste radio soit capable de diffuser des signaux combinés utilisant diverses numérotologies. Pour évaluer les performances des agrégations de porteuses IM-DD, un multiplex comportant deux ensembles de 18 sous-porteuses chacun est transmis à travers la liaison. Pour le premier groupe, la première numérotologie consiste en une TFR de 1024, avec 600 sous-porteuses de données et un espacement de 60 kHz entre chacune d'elles. La FFT du deuxième groupe est de 512, incluant 300 sous-porteuses de données et un espacement de 30 kHz entre chaque sous-porteuse. Une modulation 16-QAM est employée pour les deux numérotations. Dans cette configuration, le débit global de modulation SSB cumulée atteint 3,3 Gbit/s. Un système de mesure identique à celui montré dans la figure II.17 est utilisé pour évaluer les performances de la liaison. La Figure II.17 montre le spectre en bande latérale positive du multiplex obtenu à l'oscilloscope. Optimiser les intervalles de garde entre les groupes de porteuses avec des numérotologies différentes est requis pour améliorer l'efficacité spectrale tout en garantissant un filtrage efficace de chaque bande [30].

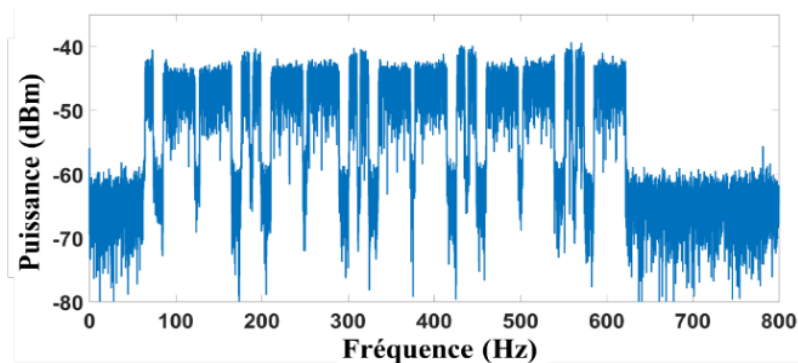


Figure II. 17: Spectre en bande de base du multiplex mixte en réception avec deux numérotologies 5G [75].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis l'accent sur l'importance et les performances de l'adoption de la technologie Radio sur Fibre (RoF) dans le déploiement des réseaux 5G. Elle souligne la diversité des méthodes de modulation, telles que la modulation directe et la modulation externe, qui sont essentielles pour une transmission efficace via les systèmes RoF. L'utilisation de modulateurs optiques, y compris les modulateurs électro-optiques et à électro-absorption, est déterminante pour maintenir la qualité et la fiabilité des transmissions.

Ainsi, l'intégration de la RoF est cruciale pour assurer une connectivité sans fil de haute performance dans l'ère de la 5G. Il propose des méthodes comme la transmission

mono-porteuse et multi-porteuse sur différentes liaisons afin de répondre à la demande croissante en connectivité et en transmission de données à grande vitesse.

III.1 Introduction

La technologie Radio over Fiber (ROF) s'est révélée être une solution performante pour la transmission des signaux radiofréquences à grande vitesse des et sur de longues distances en utilisant des fibres optiques comme support de communication. La combinaison des domaines des communications sans fil et de la photonique présente des bénéfices significatifs, spécifiquement en ce qui concerne la large bande passante, la faible atténuation du signal et une plus grande plasticité.

Afin de développer et améliorer les systèmes ROF, il est essentiel d'employer des outils de simulation précis et exhaustifs. Ce chapitre examine comment l'outil OptiSystem peut être utilisé pour simuler et analyser divers aspects de la liaison ROF. Les performances de la liaison ROF pourront être évaluées dans diverses conditions de fonctionnement, tels que la distance entre la fibre, la puissance du signal et le type de modulation employé.

III.2 Description de Simulateur Optisystem

Le logiciel OptiSystem est créé par la société canadienne Optiwave, conçu pour les ingénieurs et les chercheurs afin de concevoir, simuler et analyser des systèmes de transmission optique. Il permet de créer des schémas de systèmes optiques en utilisant une bibliothèque de composants qui peuvent être personnalisés avec des fonctions définies par l'utilisateur.

OptiSystem fournit également des outils de visualisation avancés, tels que le son du signal, les diagrammes de l'œil et l'état de polarisation. Il est utilisé dans diverses applications, telles que la conception de systèmes de communication, Il est nécessaire de calculer le taux d'erreur binaire (TEB) et le bilan de liaison, de concevoir des réseaux optiques TDM/WDM et passifs (PON), de créer un espace libre pour les systèmes optiques (OSA), ainsi que de concevoir des émetteurs et des amplificateurs de canaux.

Le logiciel est connu pour sa modélisation réaliste des systèmes de communication par fibre optique, fournissant un aperçu des performances du système, un accès direct aux données de caractérisation et une présentation virtuelle des options de conception. Afin d'appliquer une étude dans OptiSystem, il est nécessaire de créer un schéma en blocs, puis d'analyser le schéma.

La figure III.1 montre l'interface d'OptiSystem ainsi que ses barres d'outils et la bibliothèque des composants.

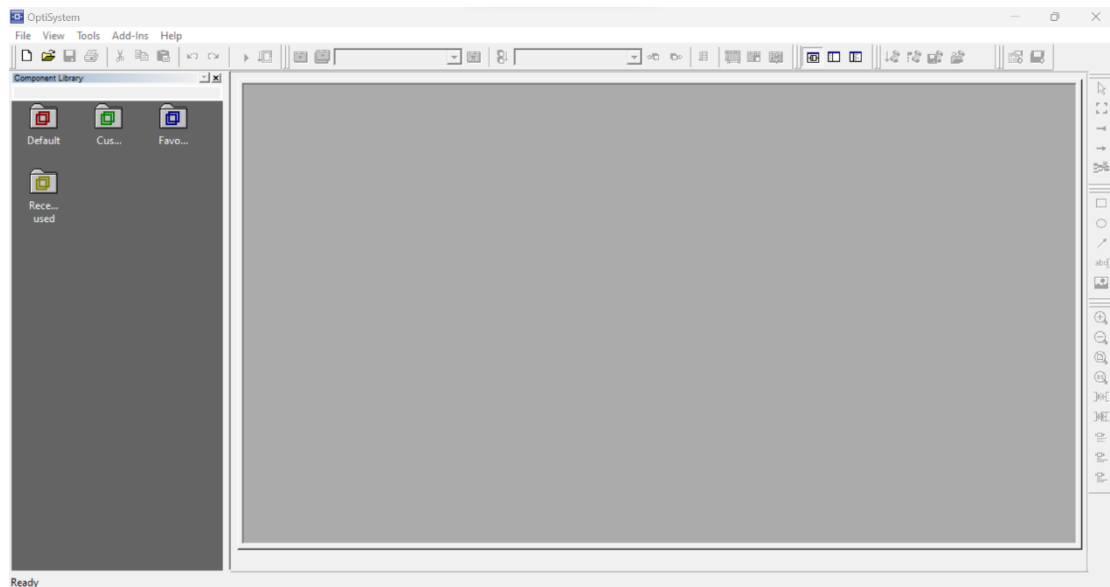


Figure III. 1: Interface optisystem.

Dans la bibliothèque des composants, dans la fenêtre « Default », on peut accéder à plusieurs types de composants optiques ou électriques, que ce soit des composants d'émission, de transmission, de réception ou de visualisation.

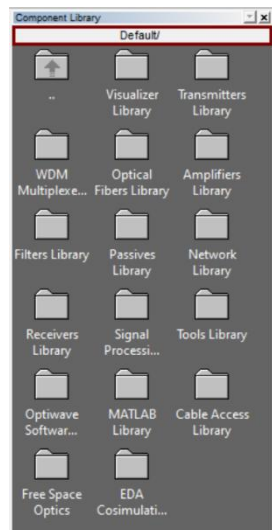


Figure III. 2: Bibliothèque des composants.

III.2.1 Les avantages de l'optisystem

OptiSystem est un logiciel permettant aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal, allant des dispositifs les plus élémentaires aux systèmes de communication complets. Il propose des outils digitaux performants, des fonctionnalités graphiques performantes et une interface conviviale. Voici quelques-uns des avantages de l'utilisation d'Optisystem :

- **Aperçu des performances** : Optisystem offre une vision globale des résultats des systèmes de fibres optiques.
- **Accès direct aux données** : Il permet d'accéder directement aux ensembles de données de description du système.
- **Options de conception virtuelles** : Optisystem propose une présentation virtuelle des options de conception.
- **Bibliothèque de composants** : Les paramètres provenant d'appareils réels peuvent être intégrés dans la bibliothèque de composants, ce qui permet d'utiliser ces paramètres dans des équipements de test et de mesure provenant de divers fournisseurs.
- **Outils de visualisation avancés** : Optisystem offre des outils de visualisation avancés, y compris le signal sonore, le diagramme de l'œil et l'état de polarisation.
- **Flexibilité d'application** : Optisystem est utilisé dans diverses applications, telles que la conception de systèmes de communication optique, du niveau des composants à la couche physique, Calculer le BER et le bilan de liaison, concevoir des réseaux optiques passifs (PON) et des TDM/WDM, l'optique en espace libre et la conception d'émetteurs et d'amplificateurs de canaux.
- **Facteurs de qualité** : Le facteur de qualité Q, le BER (TEB) et le diagramme de l'œil sont les trois critères de qualité principaux utilisés par Optisystem pour évaluer les systèmes de transmission.

III.3 les critères de qualités d'un système optique

III.3.1 Taux d'erreur binaire (BER)

Le BER est une mesure de performance fréquemment employée afin d'évaluer la qualité d'un système de communication optique. Il correspond au nombre d'erreurs de transmission par bit transmis et est généralement exprimé comme le rapport entre la probabilité d'une erreur de bit et la probabilité d'un bit correct. Le BER joue un rôle crucial dans l'évaluation de la qualité d'un système de transmission optique, car Il offre la possibilité d'évaluer la probabilité d'erreurs lors de la transmission de données.

Le BER d'un système optique est maintenu à un niveau très faible, inférieur ou égal à 10^{-9} .

$$BER = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre total de bits transmis}} \quad (\text{III.1})$$

III.3.2 Diagrammes de l'œil

Le diagramme de l'œil est un outil visuel couramment utilisé dans le domaine des télécommunications pour visualiser les données numériques reçues par un récepteur. Il se présente sous la forme d'un oscillogramme qui superpose plusieurs traces du signal reçu sur une période de temps spécifique.

Ce diagramme permet d'analyser divers aspects du signal reçu, tels que l'ouverture de l'œil, qui indique la fenêtre temporelle durant laquelle le signal peut être échantillonné lors de la démodulation, et la hauteur de l'œil, qui reflète le niveau de bruit admissible pour garantir une distinction claire entre les niveaux du signal. Un œil ouvert traduit un signal avec peu de distorsion, tandis qu'une distorsion de la forme d'onde se manifeste par une fermeture de l'œil. Ce diagramme est essentiel pour évaluer la qualité d'un émetteur de signaux, fournissant ainsi de multiples critères de performance pour optimiser la transmission des données.

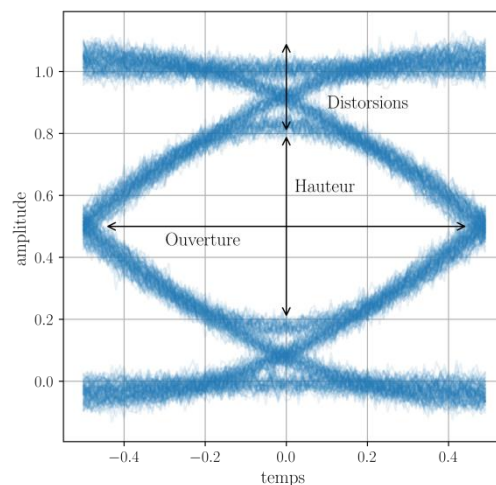


Figure III. 3: Diagramme de l'œil.

III.3.3 Facteur de qualité

Le facteur de qualité (Q) est l'élément clé de la communication optique est le rapport signal/bruit à l'entrée du circuit de décision du récepteur. On l'emploie afin de mesurer la qualité du signal transmis et reçu dans un système de transmission optique.

Un indice de qualité élevé indique une amélioration de la qualité du signal, tandis qu'un indice de qualité inférieur peut signaler une détérioration du signal et une augmentation du bruit. La qualité (Q) joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la performance et de la fiabilité des systèmes de communication optique.

III.4 Système étudié

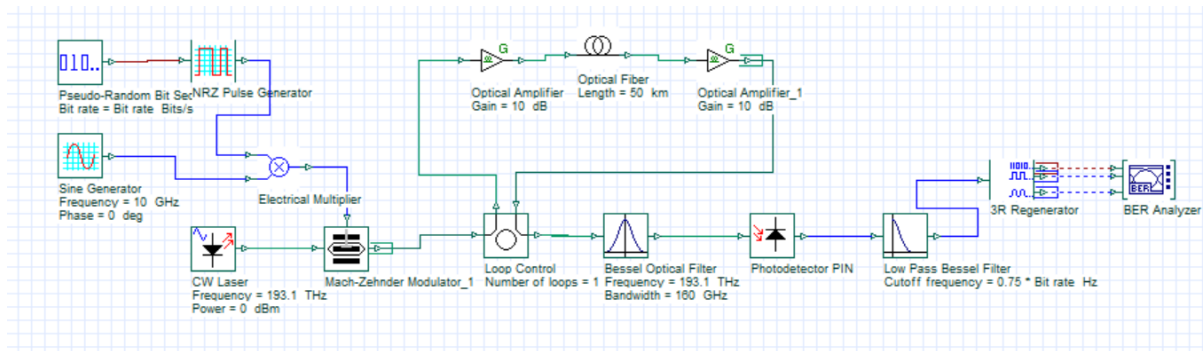


Figure III. 4: Système ROF étudié.

Dans cette étude, une succession de bits générée par un pseudo-générateur est codée par un codeur NRZ. Ce signal est ensuite transmis en passant par un modulateur Mach-Zehnder. Le laser utilisé a une fréquence de 193,1 THz. Le modulateur Mach-Zehnder est utilisé pour moduler les signaux RF en utilisant des signaux optiques provenant d'un laser à onde continue (CW) d'une puissance de 0 dBm, puis les combiner dans le modulateur.

Le signal modulé par le modulateur Mach-Zehnder est transmis via un canal de transmission d'une longueur de 50 km. Le signal optique est amplifié par deux amplificateurs optiques, un préamplificateur et un post-amplificateur, avec un gain de 20 dB.

Au niveau de la réception, le signal est filtré avec un filtre optique Bessel du premier ordre. On utilise une photodiode afin de transformer le signal optique en un signal électrique original. Ensuite, le signal obtenu est transmis à un filtre passe-bas. À l'extrémité de réception, l'analyseur de BER évalue le taux d'erreur binaire (BER), le facteur de qualité (Q) et le taux d'erreur binaire minimum.

III.4.1 Partie émission

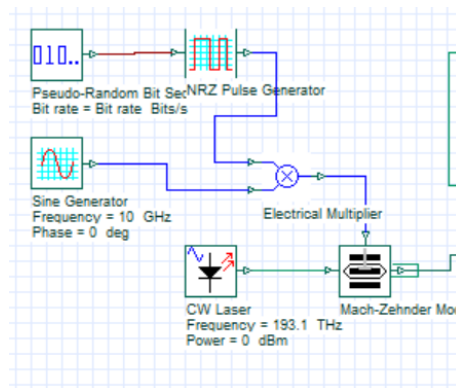


Figure III. 5: Partie émission du système ROF

- **Pseudo-random bit sequence generator**

Est un outil utilisé pour créer des séquences binaires qui présentent un caractère statistiquement aléatoire, ce qui les rend difficiles à prédire. Ces générateurs sont essentiels dans divers domaines tels que les télécommunications, le cryptage, la simulation.

- **NRZ pulse generator**

Est un outil utilisé pour créer une séquence d'impulsions sans retour à zéro qui sont codées par un signal numérique d'entrée.

- **Sine generator**

Un générateur sinusoïdal est un outil qui produit une onde sinusoïdale pure à une fréquence donnée.

Fréquence=60Ghz.

Déphasage=0deg.

- **CW laser**

Est un type de laser qui émet un faisceau constant de lumière, par opposition aux lasers à impulsions qui émettent de la lumière en courtes salves.

Fréquence=193.1Thz.

Puissance=0dBm.

- **Mach-Zehnder Modulator**

Est une structure interférométrique utilisée pour moduler les signaux lumineux dans les systèmes de communication optique.

III.4.2 Canaux de transmission

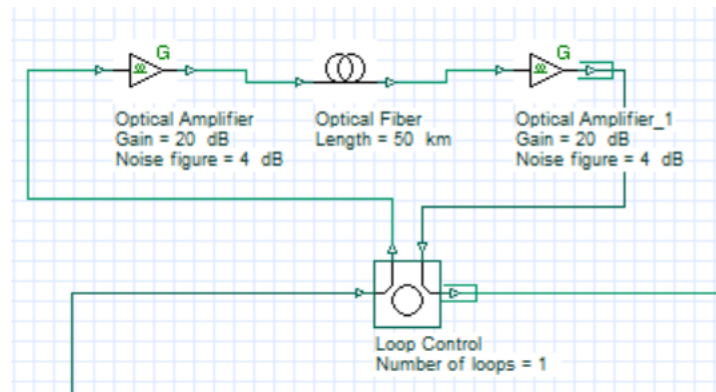


Figure III. 6: Canal de transmission.

- **Optical amplifier**

Un amplificateur optique est un dispositif qui amplifie directement un signal optique sans avoir besoin de le convertir d'abord en signal électrique.

Gain=20dB.

Facteur de bruit=4dB.

- **Optical fiber**

Est une méthode de transmission de données qui utilise des impulsions lumineuses voyageant le long d'une longue fibre.

- **Loop control**

Un loop de contrôle est une méthode de contrôle qui permet de répéter l'exécution d'un bloc d'instructions.

III.4.3 Partie de réception

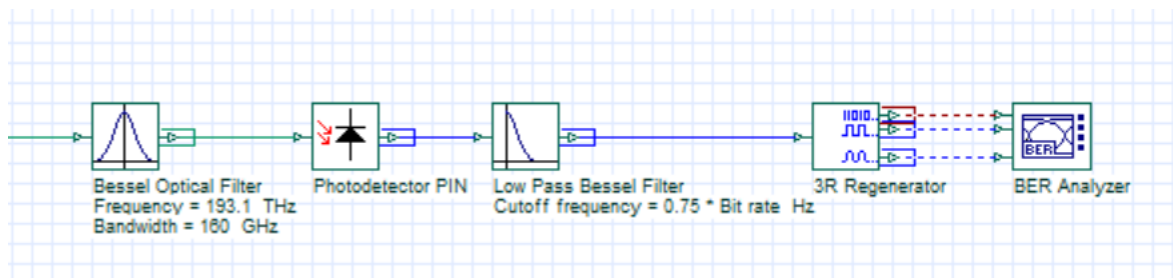


Figure III. 7: Partie réception du système ROF

- **Bessel optical filter**

Est un type de filtre linéaire analogique utilisé dans les systèmes de communication optique qui présente un retard de groupe maximale plat, La forme d'onde des signaux filtrés est conservée dans la bande passante. Le filtre est nommé en l'honneur du mathématicien allemand Friedrich Bessel, qui a élaboré la théorie mathématique qu'il utilise.

- **Photodétecteur PIN**

L'objectif de la photodiode est de transformer un signal lumineux en un signal électrique en minimisant les distorsions. Afin d'être efficace, une photodiode doit répondre à critères principaux :

Rendement = 1 A/W.

Courant d'obscurité = 10 nA.

Bruit Thermique 10^{-22} W/Hz.

La fréquence centrale 193.1 THz.

- **Low Pass Bessel Filter**

Il s'agit d'un filtre analogique linéaire qui se distingue par un retard de groupe maximale plat, ce qui permet de conserver la forme d'onde des signaux filtrés dans la bande passante.

- **3R Regenerator**

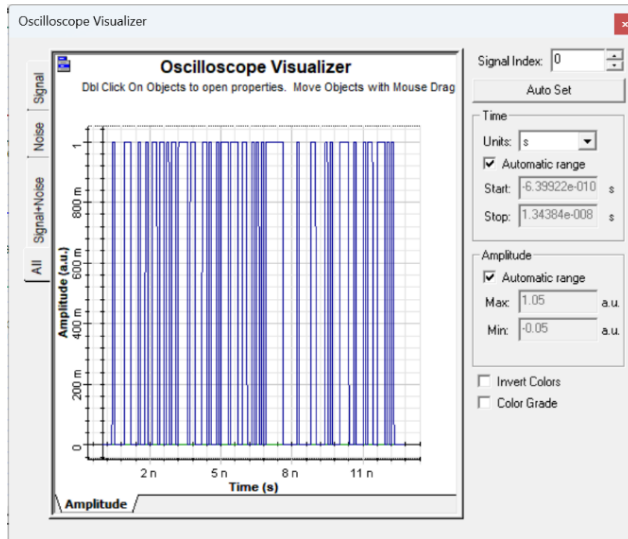
Un régénérateur 3R est un dispositif utilisé dans les systèmes de communication optique pour régénérer et conditionner un signal numérique dégradé. Les "3R" signifient : Ré amplification, Reprogrammation, Remise en forme.

III.5 les résultats de simulation

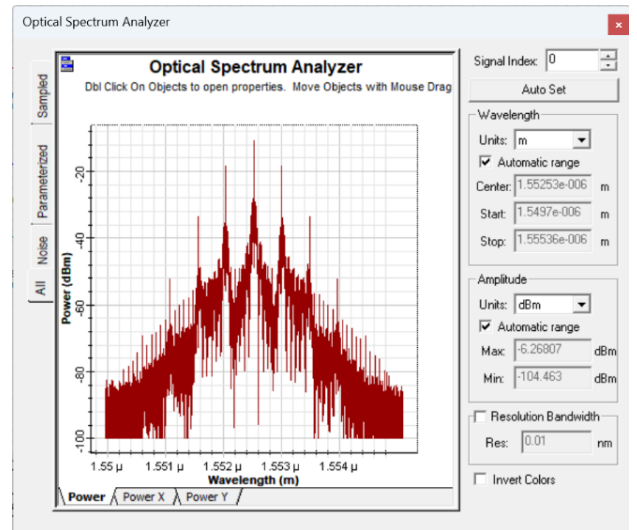
III.5.1 Spectres des signaux d'entrée et de sortie

La figure III.8.a illustre le signal au niveau du circuit d'émission, l'objectif est de convertir les données binaires provenant d'une séquence de bits pseudo-aléatoire (PRBS) en impulsions électriques sans retour à zéro (NRZ). Ce processus de conversion génère un signal en bande de base, prêt à être transmis.

La figure III.8.b présente le spectre du signal optique après avoir été modulé par le modulateur MZM.



(a)

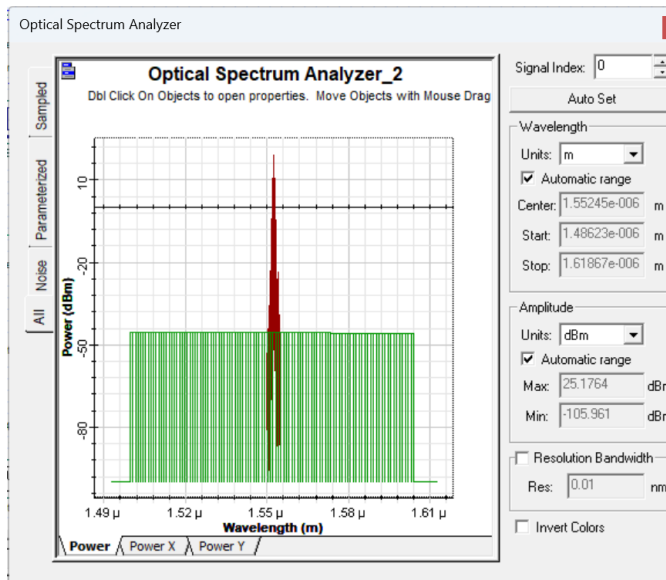


(b)

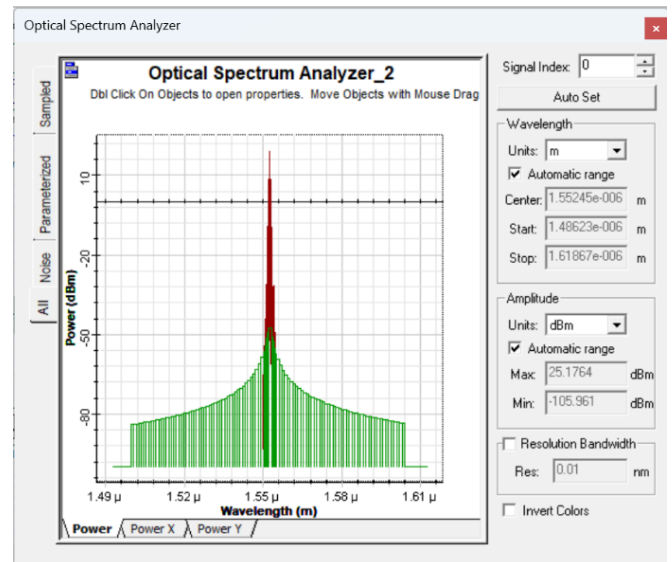
Figure III. 8: Signaux au niveau du circuit d'émission

La Figure III.9.a illustre le signal modulé amplifié à la sortie du canal de transmission, montrant l'ajout de bruits dans le spectre dû à l'effet du canal.

La Figure III.9.b présente le signal après avoir été filtré par un filtre passe-bas de Bessel, mettant en évidence l'impact du filtre sur le spectre du signal.



(a)



(b)

Figure III. 9: Signaux au niveau du canal.

La figure III.10.a montre le signal reçu dans le domaine temporel et converti par le photodétecteur PIN avec une légère distorsion. Ce signal présente une forme d'onde caractéristique, avec des variations d'amplitude et de durée en fonction du temps. Malgré

cette légère distorsion, Le signal garde ses caractéristiques essentielles et peut être employé pour l'analyse et le traitement des données dans le domaine temporel.

La figure III.10.b illustre le même signal que précédemment, mais après qu'il ait traversé un filtre de Bessel passe-bas. On remarque alors une légère distorsion et une petite quantité de perte de puissance, causées par les différents éléments de la chaîne de transmission. Malgré ces effets, le signal conserve ses principales caractéristiques. Finalement, on constate que le même message binaire est récupéré en sortie du filtre.

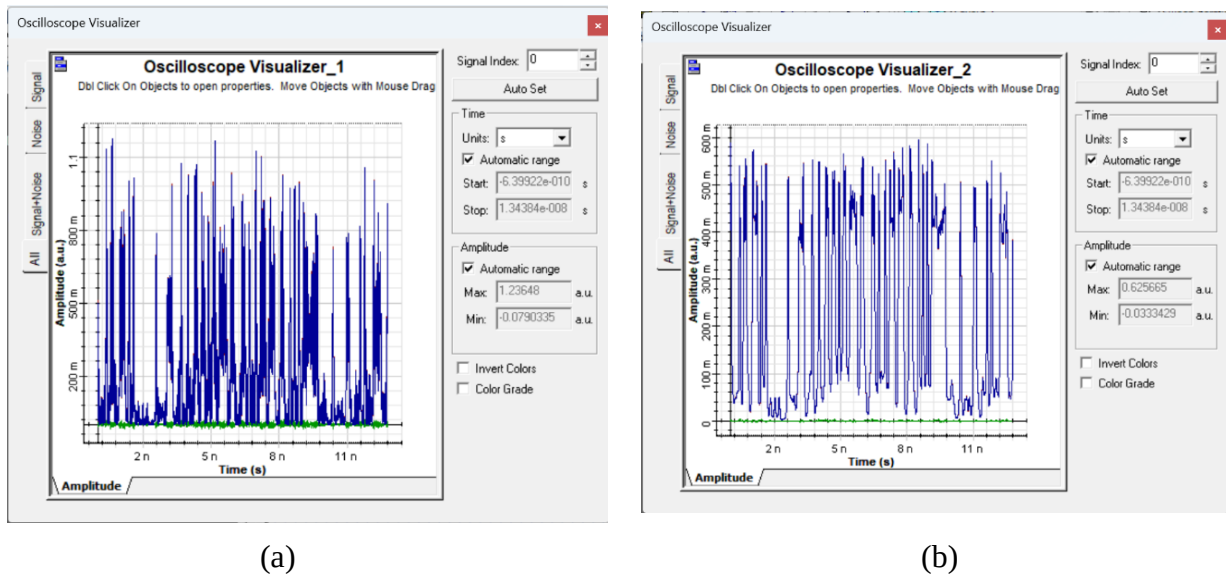


Figure III. 10: Signaux au niveau du circuit de réception.

III.5.2 Effet de variation de débit

Pour examiner ce système de manière plus approfondie et évaluer la qualité de la transmission, nous allons ajuster divers paramètres. Tout d'abord, nous modifierons le débit en utilisant des fibres optiques de longueurs comprises entre 50 et 100 km. La fréquence sera fixée à 60 GHz, L'émission de puissance est de 0 dBm, la réduction de la fibre est de 0,2 dBm et la longueur d'onde est de 1550 nm.

Nous calculerons le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur de qualité pour chaque configuration. Le BER indique la proportion d'erreurs dans la transmission des données, tandis que le facteur de qualité est un indicateur de la qualité globale du signal. En faisant varier la longueur de la fibre, L'effet de ce paramètre sur les performances du système de transmission sera observé.

Les résultats de ces mesures nous permettront d'évaluer les limites du système et d'identifier les options idéales en ce qui concerne le débit et la qualité de transmission. Cette

étude permettra d'approfondir notre compréhension du fonctionnement de ce genre de système et de repérer les éléments essentiels qui impactent ses performances.

- **L=50 km**

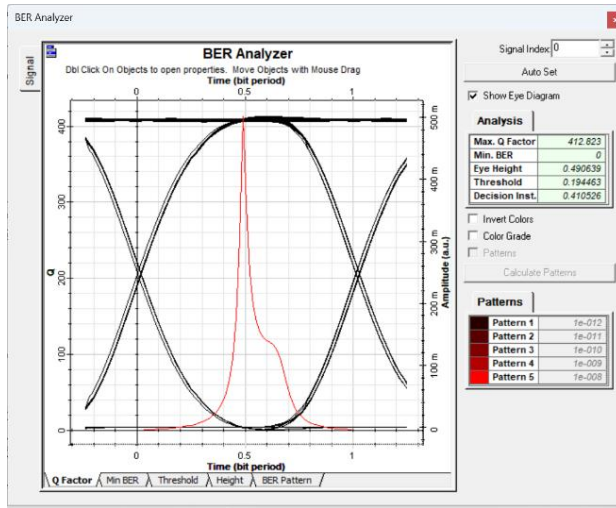
Le tableau III.1 illustre les résultats de simulation du facteur qualité et du taux d'erreur binaire pour le système ROF avec une longueur de 50 km en fonction de débit.

Débit Gbps	1	5	10	15	20
Q.Facteur	412.823	30.7338	14.12	3.66141	5.53473
BER	0	9.56298×10^{-208}	1.38999×10^{-45}	9.50664×10^{-5}	1.45347×10^{-8}

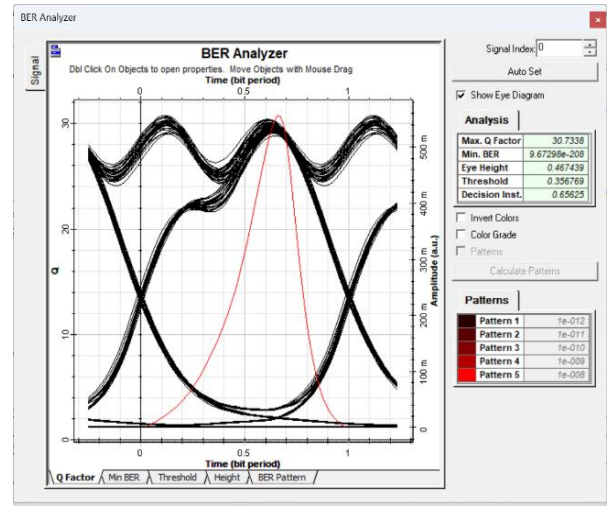
Tableau III. 1: Facteur de qualité et le TEB en fonction du débit.

La figure III.11 présente le diagramme de l'œil pour une liaison Rof (Radio sur Fibre) d'une longueur de 50 km, avec un débit variant de 1 à 20 Gbps. On observe que lorsque le débit augmente, Le taux d'erreur binaire augmente, ce qui entraîne une diminution du facteur de qualité. Cela entraîne automatiquement une fermeture du diagramme de l'œil, ce qui indique une diminution de la qualité de transmission.

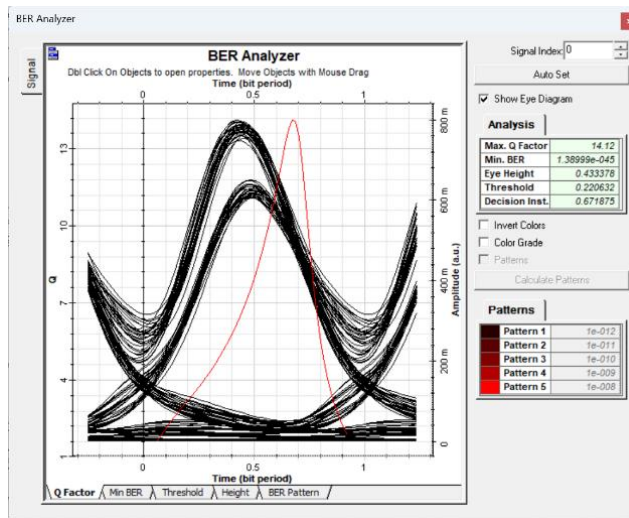
En d'autres termes, plus le débit de données transmises sur cette liaison optique est élevé, plus la qualité du signal se dégrade. Le facteur de qualité, qui mesure la fiabilité de la transmission, chute lorsque le débit augmente. En même temps, la variation du taux d'erreur binaire, qui correspond au pourcentage d'erreurs par rapport au nombre total de bits transmis, augmente. Ces deux phénomènes se traduisent par une fermeture du diagramme de l'œil, un outil d'analyse de la qualité des signaux numériques. Lorsque le débit augmente, cette fermeture indique une détérioration de la qualité de transmission sur la liaison Rof de 50 km.



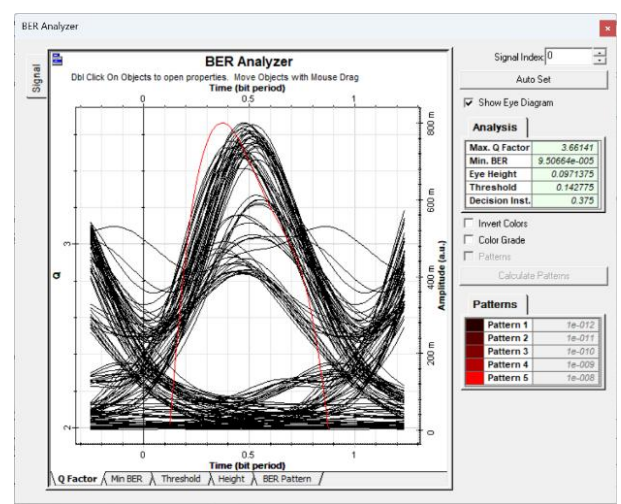
(a)



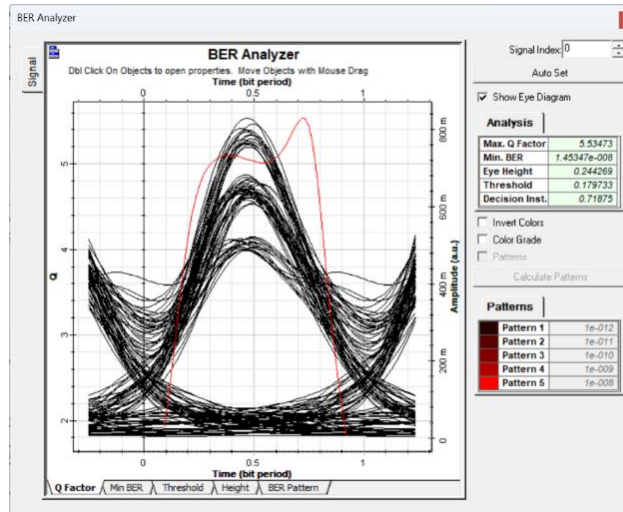
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III. 11: Diagramme de l'œil pour des débits de (a)1Gbps, (b)5Gbps,(c)10Gbps,(d)15Gbps,(e)20Gbps,et L=50km.

• **L=100 km**

Le tableau III.2 illustre les résultats de de simulation en terme de facteur qualité et du taux d'erreur binaire pour le système ROF, la longueur de la fibre optique est fixée =100 km.

Débit Gbps	1	3	5	7	9	10
Q. Facteur	222.304	8.58279	6.33487	4.31282	4.25341	2.78414
BER	0	4.61821 ^e -18	1.18584 ^e -10	7.25083 ^e -10	9.94567 ^e -06	0.0018347

Tableau III. 2: Facteur de qualité et le TEB en fonction du débit.

La Figure III.12 présente le diagramme de l'œil pour une liaison Rof de 100 km de longueur.

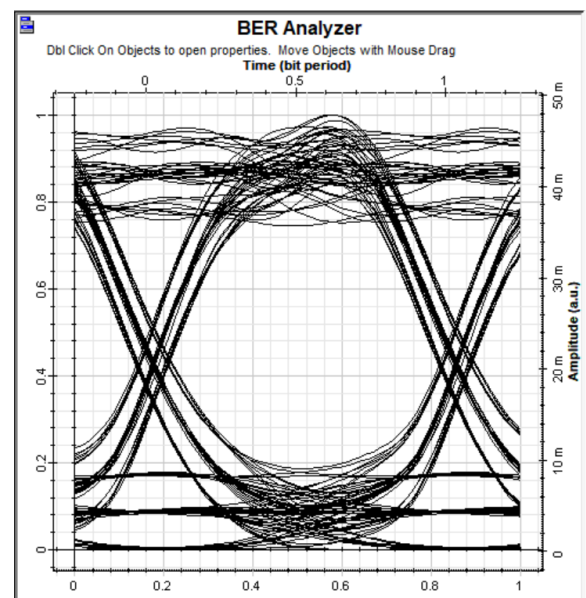
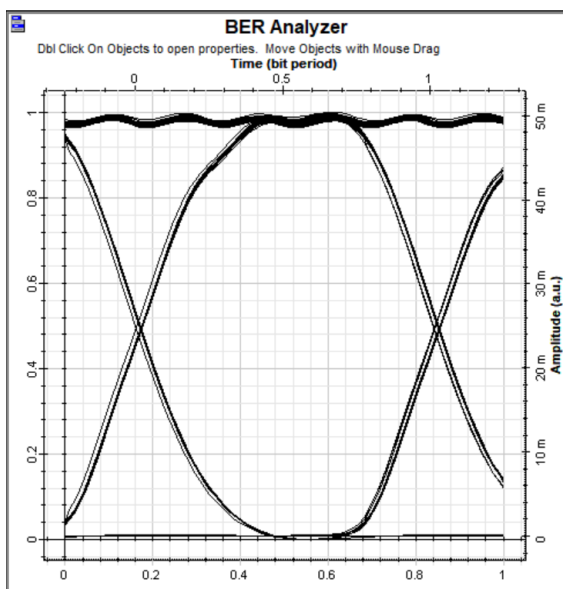
Le débit varie de 1 à 10 Gbps sur cette liaison.

Tableau III. 2: Facteur de qualité et le BER pour L=100 km

Une observation importante se dégage de cette figure : lorsque le débit augmente, on constate :

- Une diminution du facteur de qualité
- Une augmentation du taux d'erreur binaire
- Une fermeture automatique du diagramme de l'œil

L'ensemble de ces éléments témoigne d'une dégradation de la qualité de transmission sur cette ligne Rof de 100 km. Le débit augmente à mesure que la qualité du signal diminue.



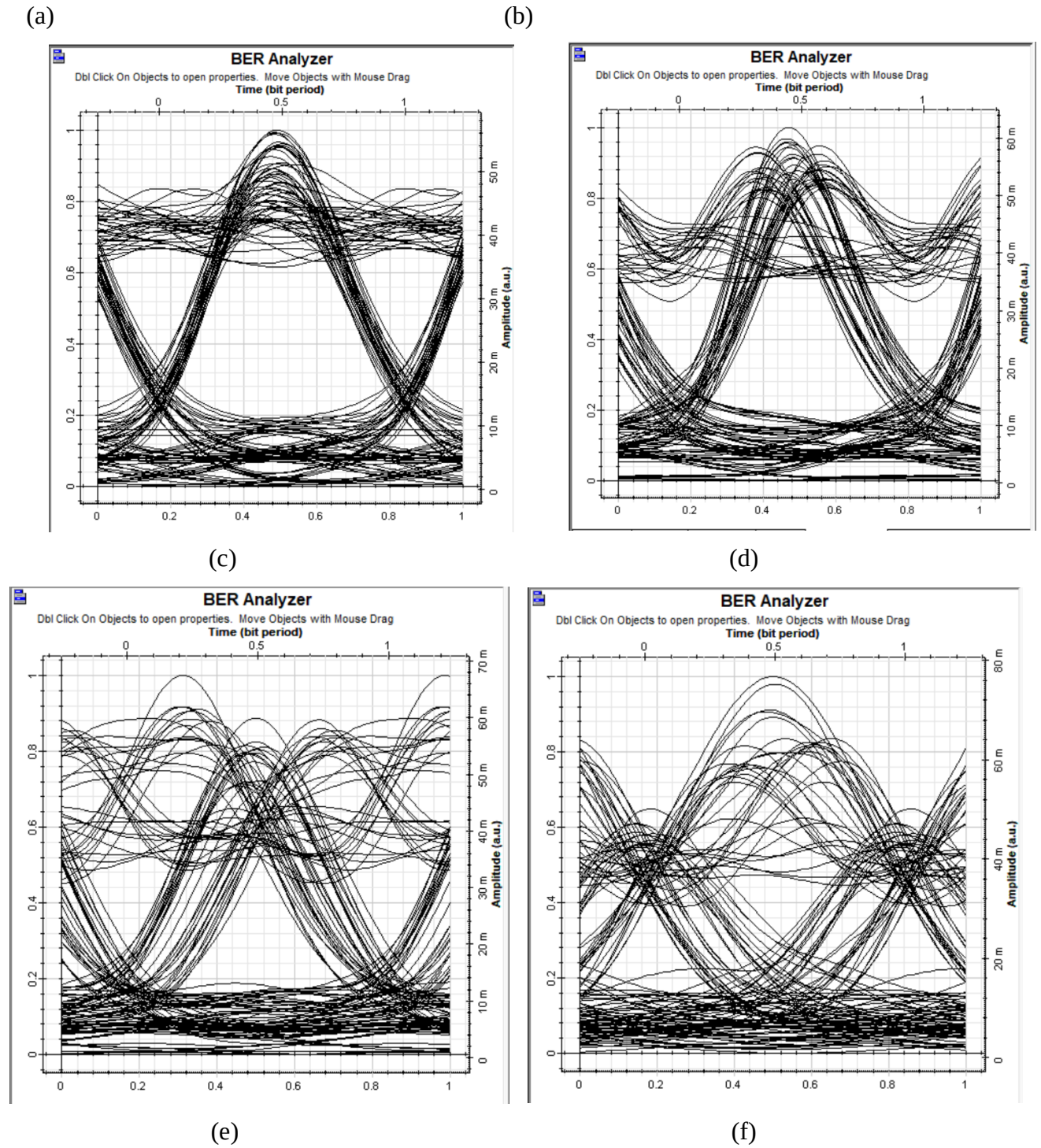
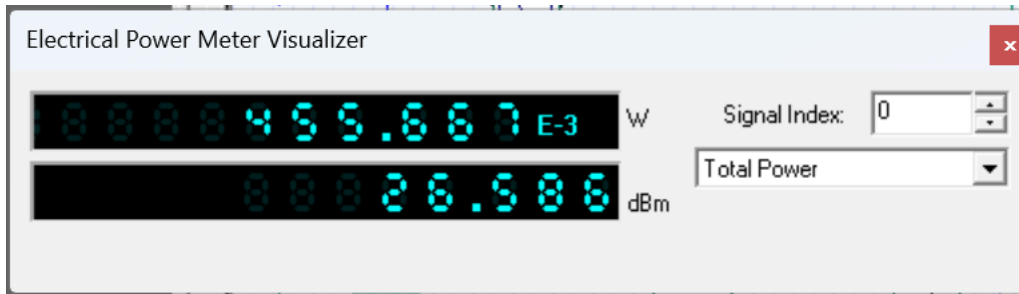


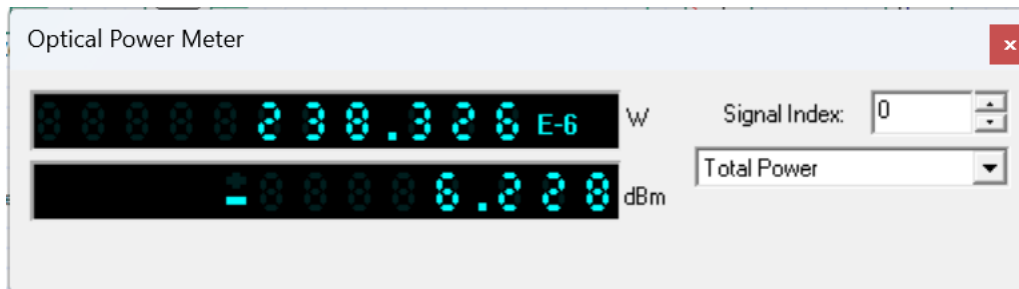
Figure III. 12: Diagramme de l'œil pour des débits de
(a)1Gbps, (b)3Gbps,(c)5Gbps,(d)7Gbps,(e)9Gbps,(f)10Gbps,et $L=100\text{km}$.

La figure III.13 illustre les niveaux de puissance pour chaque point de la connexion ROF. Il est à noter que des pertes de puissance surviennent au niveau de la section d'émission.

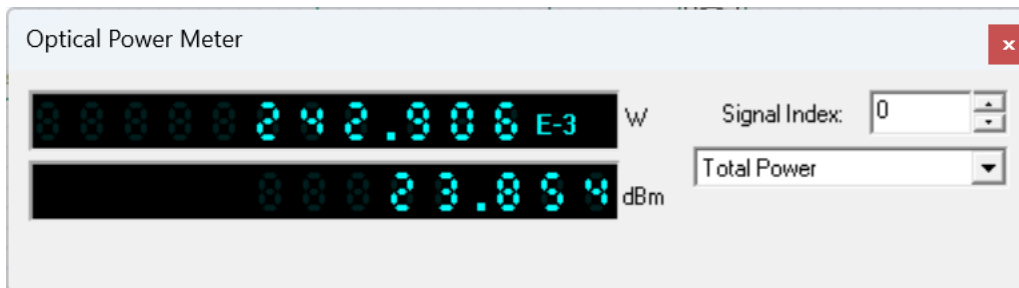
Afin de compenser ces pertes, des amplificateurs optiques sont intégrés au canal de transmission. Suite à cette intervention, la perte enregistrée est de 6.051 dBm.



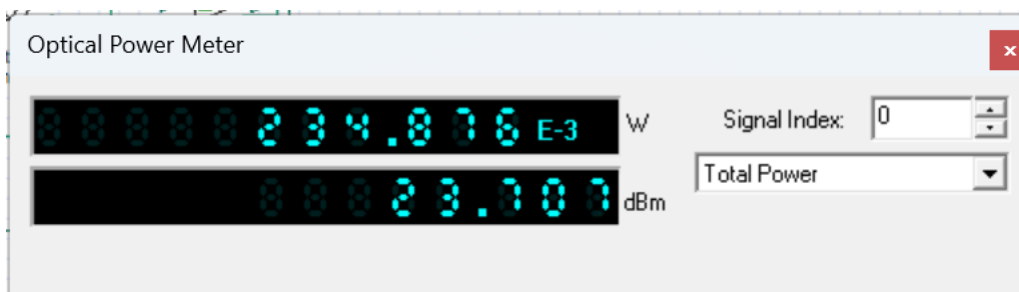
Sortie de NRZ



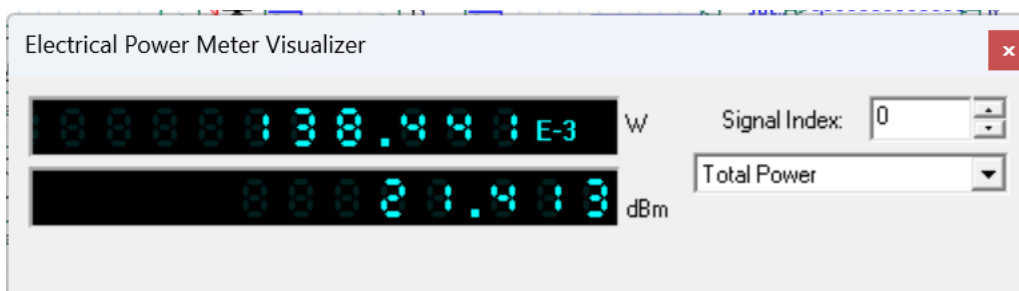
Sortie de MZM 2



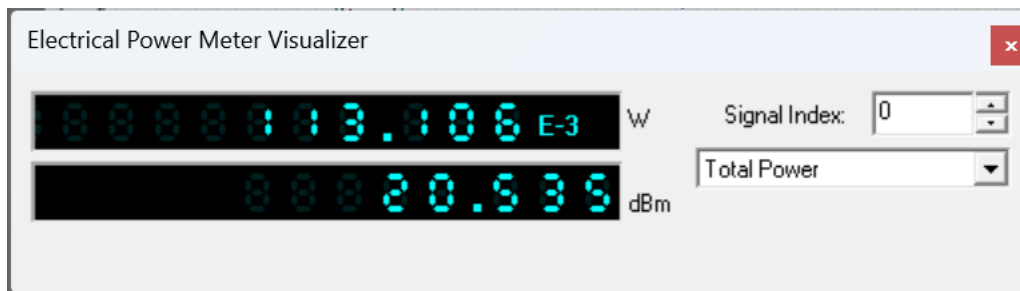
Sortie de canal



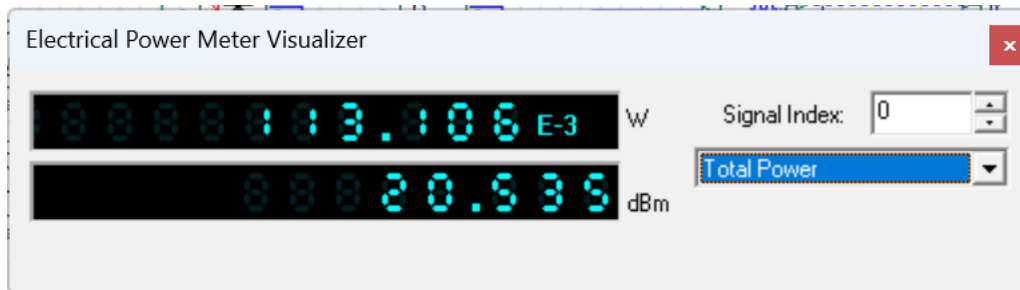
Sortie de Bessel Optical filtre



Sortie de PIN



Sortie de filtre passe bas



Réception

Figure III. 13: Résultats de visualiser.

Les diagrammes du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire en fonction du débit sont présentés dans les figures III.14 et III.15. On constate qu'un débit plus élevé entraîne une baisse du facteur de qualité, tandis que le taux d'erreur binaire augmente.

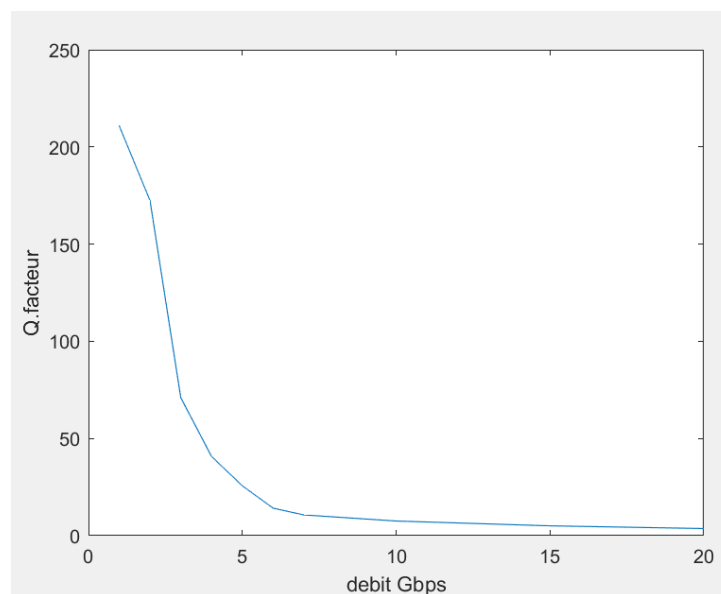


Figure III. 14: Facteur de qualité Q en fonction du débit.

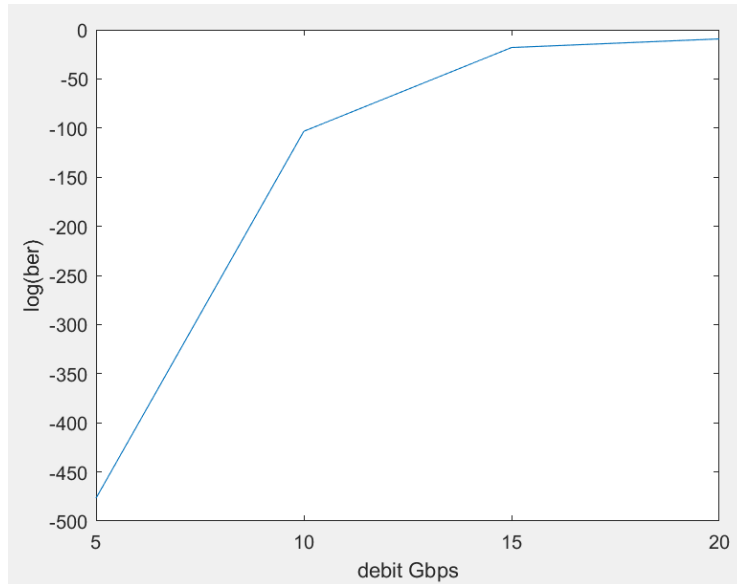


Figure III. 15: Taux d'erreur binaire log (BER) en fonction du débit.

III.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons conçu un système Rof tout en effectuant des études paramétriques sur les variations dans la qualité de transmission en ajustant différents paramètres, tels que la longueur de la fibre optique et le débit binaire de notre système. Différents critères ont été établis afin d'améliorer à la fois le signal et la qualité de transmission, tels que le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire.

L'augmentation du débit binaire d'émission et de la longueur de la fibre entraînant une baisse du facteur de qualité en raison de la perte d'informations. Cependant, nous pouvons conclure que la qualité de transmission reste préservée malgré ces pertes.

Conclusion générale

Les télécommunications connaissent une évolution rapide et significative, entraînant des changements majeurs dans les structures des systèmes de transmission. Les innovations technologiques se succèdent à un rythme soutenu, modifiant profondément l'architecture des systèmes de transmission de données et de communication.

Cette étude souligne l'importance de la technologie analysée pour répondre à la demande croissante de capacité de transmission et de fiabilité des réseaux mobiles naissants. La combinaison des avantages de la fibre optique et des technologies sans fil confère aux systèmes radio-sur-fibre une efficacité notable, ouvrant la voie à des services innovants et à une connectivité sans précédent pour les utilisateurs. Elle met également en évidence la nécessité d'une recherche continue et du développement de solutions technologiques avancées pour faciliter la transition vers des réseaux mobiles plus performants, fiables et optimisés.

L'objectif principal de ce projet de fin d'études était de concevoir une liaison radio-sur-fibre économique et d'en simuler le fonctionnement. Cela a motivé l'analyse initiale d'une connexion via fibre optique et l'exploration approfondie des composants des liaisons fibres optiques, ainsi que des contraintes courantes rencontrées lors de la transmission du signal.

Le second chapitre s'est attaché à l'application de la technologie radio-sur-fibre aux réseaux sans fil 5G, mettant en lumière son potentiel dans ce contexte.

Pour conclure, des simulations ont été réalisées en ajustant certains paramètres de notre système Radio sur fibre optique, tels que les signaux de fibre, les fréquences et le taux de transmission binaire, permettant ainsi d'évaluer les capacités de cette technologie prometteuse.

Références Bibliographiques

- [1] N.Boutaleb A.Temmar «Contribution de la modulation DPSK dans les systèmes de transmission d'un signal radio sur fibre » Communication Science & technologie N° 11. Juillet 2013.
- [2]SalsabilaShitaPutriNugroho; YusNatali; CaturApriono, “Design of Millimeter-Wave based Radio over Fiber for 5G Applications”, 1st International Conference on Information System & Information Technology (ICISIT), 2022.
- [3] Hexin LIU «Radio sur fibre : réseaux, couvertures radio, architectures et dimensionnements matériels » these doctorat .Université de Bretagne Occidentale, 2013
- [4] HTF <https://fr.fiber-optical-transceivers.com/> site web consulte le 22/02/2024
- [5] Rafik Missaoui . <https://fr.linkedin.com/>
- [6] Sarah BENAMEUR, « La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission tique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable », thèse doctorat, université Djilali liabes, sidi Belabbes, Juin 2015.
- [7] <https://www.exoco-lmd.com/>, «reseau-d'accès-optique » consulte le 22/02/2024
- [8] «Installation D'un réseau en fibre optique dans les immeubles neufs a usage d'habitation ou à usage mixte » .2012
- [9] <https://fr.fmuser.org/> site web consulte le 22/02/2024
- [10] Solution Green-DSL, http://www.alcatel-lucent.com/eco/networks/fixed_access.html. Site web consulté le 22/02/2024.
- [11] Hexin Liu «Radio sur Fibre : réseaux, couverture radio, architectures et dimensionnements matériels. » Thèse de Doctorat 'Université de Bretagne Occidentale 2013
- [12] <https://ieeexplore.ieee.org/>« An Overview of Radio over Fiber (RoF) Technology»
- [13] <https://www.opticalzonu.com/> site web consulte le 22/02/2024
- [14] Christian Vellin. «Solution radio sur fibre pour le déport de signaux VHF : application à l'oreillette». CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS PARIS. 2015
- [15] <https://www.alcadelectronics.com/> site web consulte le 22/02/2024
- [16] <https://www.fibermall.com/> site web consulte le 22/02/2024
- [17] A. Bennour «Modèle de phototransistor SiGe/Si haute-fréquences: effet de distribution spatiale bi-dimensionnelle » Laboratoire de Traitements Et Transmission De l'information (LTTI), Faculté des Sciences Techniques, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès – Maroc. 2017

- [18] <https://opticomtech.com/> site web consulte le 22/02/2024
- [19] « Procédure d'essai pour mesurer le niveau du point d'interception de troisième ordre (IP3) des récepteurs de contrôle des émissions». Recommandation UIT-R SM.1837-1 .2018
- [20] <http://portelatine.chez-alice.fr/electronique/hf/mesures.html> site web consulte le 22/02/2024
- [21] <https://fr.wikipedia.org/> site web consulte le 22/02/2024
- [22] Giovanni D'Amore, «Comprendre le facteur de bruit dans les systèmes radiofréquences». Marketing Brand Manager, Keysight Technology.2017
- [23] <https://www.techno-science.net/> site web consulte le 22/02/2024
- [24] <https://www.rohde-schwarz.com/> site web consulte le 22/02/2024
- [25] Zachariah Peterson, «Paramètre S11, perte de retour et coefficient de réflexion : quand sont-ils identiques ?» 2020
- [26] Thierry Ditchi «Lignes de transmission» UPMC, Sorbonne Universites.
- [27] Beddiaz Safia, YaAHIA Selma, «Technologie Radio sur Fibre pour les applications sans fil (5G) mémoire fin etude master 2019 Université 8Mai 1945 – Guelma
- [28] Hamza Hallak Elwan « Optical systems for next wireless standard (5G) generation delivery »these doctorat Université Grenoble Alpes, 2018
- [29] Sara Jawad, Raad Fyath, «5G-Mobile Fronthaul Using RoF Technology». LAP Lambert Academic Publishing.2018
- [30] Emine Moutaly, « Etude d'une architecture radio-sur-fibre pour le fronthaul 5G », Thèse de doctorat d'Université Paris-Est En cotutelle avec l'Université de Nouakchott Al Asryaa ,2019
- [31] livre blanc EXFO : L'évolution des réseaux mobiles 5G : le quoi, le pourquoi et le comment 2021
- [32] <https://www.oezratty.net/wordpress/2018/nombreux-defis-5g/> Site web consulté le 22/02/2024
- [33] <https://www.ibwave.com/fr/5g-networks> Site web consulté le 22/02/2024
- [34] Pierre Manière «5G : les 5 enjeux d'un défi technologique» .latribune .2019
- [35] <https://www.sofrecom.com/> Site web consulté le 22/02/2024
- [36] <https://www.viavisolutions.com/> Site web consulté le 22/02/2024
- [37] Xavier Lagrange. «Architecture des réseaux 5G Principes du réseau cœur 5G» MT Atlantique/IRISA, Rennes, France. 2022
- [38] General Public License., Spectre lumineux d'une LED de couleur, article, 2009

- [39] A. Benammar, « Système de transmission par fibre optique», mémoire, master, Université Aboubak Belkaïd– Tlemcen, 2017
- [40] B. Ayma, « la diode laser », mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2018
- [41] Michel JOINDOT, Irène JOINDOT «Systèmes de transmission sur fibre optique».2016
- [42] Beddiaz Safia, Yahia Selma. «Technologie Radio sur Fibre pour les applications sans fil (5G)». Université 8Mai 1945 – Guelma, 2019
- [43] Hugues Le Bras. «Étude des réseaux radio sur fibre dans le contexte des réseaux d'accès et privés», Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2008
- [44] Richard Dieu-Donne. «Techniques de modulation en transmission haut débit par fibre optique». Editions Universitaires Européennes.2016
- [45] Arribi Meriem, Elmahi Aicha. «La technique WDM en télécoms optiques avancées». Université Mustapha Stambouli de Mascara, Mémoire de master, 2016.
- [46] www.AeroDiode.com «Tutorial: High Speed Fiber Modulator Basics». Consulté le 27/02/2024.
- [47] Isidor Rabesalama, «Etude des atténuations dans une transmission par fibre optique». Athénée Saint Joseph Antsirabe, mémoire de Master, 2016
- [48] Ali Kabalan. «Etude de systèmes radio sur fibre pour des applications de réseaux domestiques en bande millimétrique», Thèse doctorat, Université Paris-Est.2016.
- [49] Bnammar Amine Miloudi Walid . «Etude d'une liaison optique WDM Radio sur Fibre». mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2017
- [50] Omid Zia-Chahabi. «Techniques de traitement numérique du signal pour les systèmes de transmission optique ultra haut débit à détection cohérente». Thèse de Doctorat. Sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne.2013.
- [51] <https://en.wikipedia.org/> Phase modulation site web consulte le 03/03/2024
- [52] Maadhour Hind Berregui Asma. «Etude et simulation d'une liaison de communication 5G NR», mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ourgla, 2021
- [53] <https://www.techniques-ingenieur.fr/> consulte le 09/03/2024
- [54] <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/> consulte le 09/03/2024
- [55] Jean Billard. «Mise au point - Les modulateurs électro-optiques». Revue de Physique Appliquée, pp.311-324.1966.
- [56] <https://public.iutenligne.net/> consulte le13/03/2024
- [57] http://wcours.gel.ulaval.ca/2017/a/GEL3006/default/5notes/notes_GEL3006_2017_09_modulation_angle.pdf, Modulation de fréquence et modulation de phase

- [58] <https://www.directindustry.fr/> consulte le13/03/2024
- [59] Rachid Radouani. «Dérive dans les modulateurs électro-optiques Mach-Zehnder : analyse physique et résolution». Thèse doctorat. Université Paul Verlaine. 2018
- [60] Rajbir Singh. «Study and performance evaluation of Radio over Fiber using Mach Zehnder Modulator», 2015-19, IJARCS All Rights Reserved
- [61] <https://www.rp-photonics.com/> consulté le 17/03/2024
- [62] <https://www.rapport-gratuit.com/> consulté le18/03/2024
- [63] <https://www.researchgate.net> consulté le28/03/2024
- [64] <https://iotindustriel.com/> consulté le28/03/2024
- [65] Dahoumane Tahar. «Applications de l'OFDM», mémoire de Master, Ecole Nationale Polytechnique, 2012.
- [66] Galyna Piskonova. «Transmission OFDM pour la téléphonie cellulaire». Thèse de doctorant, École de Technologie supérieure, Université de Québec, 2003
- [67] L. N. Hazra.« Performance evaluation of a 60-GHz RoF-OFDM system for wireless applications », Journal of Optics, 2024.
- [68] R. Prasad et R. van Nee, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 2000.
- [69] A. Glavieux et M. Joindot, Communications numériques: introduction, Ellipses: Collection pédagogique de telecommunication , 1996.
- [70] R.-Y. Wei, «Differential encoding by a look-up table for quadrature-amplitude modulation», IEEE Transactions on Communications,vol 59, issu 1 , pp. 84 - 94, 11 November 2010.
- [71] L. Mehedy, M. Bakaul et A. Nirmalathas, «Spectrally-Efficient 100 Gb/s Transmission in Next Generation Optical Access Networks Employing Directly Detected Optical-OFDM,» chez Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, Auckland, New Zealand, 31 Oct.-3 Nov. 2010.
- [72] J. C. Cartledge , «Combining self-phase modulation and optimum modulation conditions to improve the performance of 10-Gb/s transmission systems using MQW Mach-Zehnder modulators,» Journal of Lightwave Technology,vol 18,issue5 pp. 647 - 655, May 2000.
- [73] Y. Liu et al., “Waveform Design for 5G Networks: Analysis and Comparison,” IEEE Access, 2017