

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



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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par :

MOUALID Imane

ZENASNI Nermine Nour El-Houda

Sujet

Intégration des techniques de chaos optique pour la sécurisation des systèmes MIMO-RoFSO basés sur le DWDM dans les applications 5G

Soutenu, le 09/06/2025, devant le jury composé de :

Mr. DERRAZ Foued	Maitre de conférences A	Univ. Tlemcen	Président
Mr. HADJILA Mourad	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
Mr. KAMECHE Samir	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadrant
Mlle. DEROUICHE Samra	Doctorante	Univ. Tlemcen	Co-Encadrante

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur **KAMECHE Samir**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour nous avoir proposé ce sujet passionnant, qui nous a permis de faire nos premiers pas dans le domaine de la recherche scientifique. Son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et sa disponibilité constante ont été essentiels à la bonne conduite et à la réalisation de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent également à Mademoiselle **DEROUICHE Samra**, co-encadrante de ce travail, pour sa disponibilité et son précieux soutien tout au long de ce projet.*

*Nous souhaitons exprimer notre profond respect et notre sincère gratitude à Monsieur **DERRAZ Foued**, Maître de Conférences, classe A à l'Université de Tlemcen, qui nous a fait l'honneur de présider ce jury, malgré ses nombreuses responsabilités.*

*Nous remercions également Monsieur **HADJILA Mourad**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce mémoire avec attention et bienveillance.*

Enfin, nous ne saurions conclure sans adresser nos plus sincères remerciements à nos parents, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants et l'amour qu'ils nous ont témoigné tout au long de notre parcours.

Dédicace

Je dédie ce mémoire, avec tout mon amour et ma gratitude, à ma précieuse famille.

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs innombrables sacrifices, leur soutien moral et matériel, et surtout pour avoir toujours cru en moi. Vous êtes les piliers de ma réussite.

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur bienveillance et leurs encouragements constants tout au long de ce parcours.

À mes grands-parents, pour leurs prières sincères, leur sagesse et leur présence réconfortante, même à distance, dans les moments d'incertitude comme dans ceux de réussite.

À tous les membres de ma famille, proches ou éloignés, merci pour votre soutien indéfectible. Ce travail est aussi le fruit de votre présence à mes côtés.

Moualid Imane

À ma mère et à mon père,

Aucune parole ne saurait traduire pleinement l'immensité de la reconnaissance et de l'amour que je vous porte.

Depuis le premier jour, vous avez été ma source de force, de guidance et d'espoir. Vos sacrifices silencieux, votre patience infinie et votre foi inébranlable en moi ont été les fondements de ce chemin.

À toute ma famille,

Merci pour votre présence réconfortante, vos encouragements discrets et votre amour constant. Votre force m'a accompagnée à chaque étape, même dans les moments les plus incertains.

À mes amis,

Merci pour votre soutien fidèle, votre écoute bienveillante, vos rires partagés et votre amitié sincère. Vos mots et vos silences ont souvent été la lumière dont j'avais besoin. Votre présence a été précieuse tout au long de ce parcours.

Ce mémoire est le reflet de tout ce que vous m'avez apporté. Je ne l'ai pas accompli seule.

Zenasni Nermin Nour-Elhouda

Résumé

La vision des systèmes de 5ème génération (5G) est de fournir une large gamme de services avec des vitesses de données révolutionnaires sur un réseau unifié. La radio sur l'optique en espace libre (RoFSO) se distingue comme une technologie prometteuse qui pourrait faciliter le déploiement rapide des réseaux 5G grâce à son installation sans tracas. Pour améliorer la capacité de données, la communication DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), qui utilise plusieurs longueurs d'onde, peut être employée. Cependant, les liaisons en espace libre peuvent être sensibles aux perturbations atmosphériques telles que la pluie, le brouillard et la brume. Dans des conditions défavorables comme celles-ci, les émetteurs-récepteurs à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) entrent en jeu pour améliorer les performances de la liaison. Afin d'ajouter une couche supplémentaire de sécurité aux transmissions de données, l'intégration de techniques chaotiques optiques s'avère pertinente. Ce type de chaos optique, fondé sur la dynamique non linéaire des signaux lumineux, permet de dissimuler les informations transmises, renforçant ainsi la confidentialité des communications. Dans cette étude, nous utilisons le logiciel OptiSystem pour évaluer les performances des liaisons DWDM MIMO RoFSO transmettant des ondes millimétriques, tout en intégrant des mécanismes de sécurité via des systèmes chaotiques optiques. Ces techniques permettent non seulement d'améliorer la robustesse des liaisons en termes de capacité et de sécurité, mais également de mieux résister aux conditions atmosphériques difficiles, assurant ainsi un système de communication à haute performance et sécurisé, adapté aux exigences des réseaux 5G.

Les mots clés : DWDM, ondes millimétriques, MIMO-FSO, chaos optique.

Abstract

The vision of fifth-generation (5G) systems is to deliver a wide range of services with groundbreaking data rates over a unified network infrastructure. Free-space optical radio (RoFSO) emerges as a promising technology that can support the rapid deployment of 5G networks due to its hassle-free and flexible installation. To further enhance data capacity, Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) can be employed, allowing the simultaneous transmission of multiple wavelengths. However, free-space links are inherently susceptible to atmospheric disturbances such as rain, fog, and haze. Under such challenging conditions, Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) transceivers play a crucial role in improving link performance. Additionally, to ensure secure data transmission, the integration of optical chaos-based techniques offers a robust solution. Optical chaos, rooted in the nonlinear dynamics of light signals, provides a means of masking transmitted information, thereby strengthening communication confidentiality. In this study, we utilize OptiSystem software to evaluate the performance of DWDM-MIMO-RoFSO links transmitting millimeter waves, incorporating optical chaos-based security mechanisms. These techniques not only enhance link robustness in terms of capacity and security but also improve resilience under adverse weather conditions, resulting in a high-performance and secure communication system tailored to meet the stringent requirements of 5G networks.

Keywords: DWDM, millimeter waves, MIMO-FSO, optical chaos.

ملخص

تهدف رؤية أنظمة الجيل الخامس (5G) إلى توفير مجموعة واسعة من الخدمات بسرعات بيانات ثورية عبر شبكة موحدة. وتُعتبر تقنية "الراديو عبر الألياف البصرية في الفضاء الحر (RoFSO) من التقنيات الواعدة التي يمكن أن تُسهم في تسريع نشر شبكات الجيل الخامس بفضل سهولة تركيبها. ولتعزيز سعة البيانات، يمكن استخدام تقنية تقسيم الطول الموجي الكثيف (DWDM) التي تعتمد على استخدام أطوال موجية متعددة. ومع ذلك، فإن الروابط البصرية في الفضاء الحر قد تكون حساسة للاضطرابات الجوية مثل المطر والضباب والدخاني. وفي مثل هذه الظروف غير المواتية، تلعب أنظمة الإرسال والاستقبال متعددة المداخل والمخارج (MIMO) دورًا مهمًا في تحسين أداء الاتصال. ومن أجل إضافة طبقة إضافية من الأمان إلى عمليات نقل البيانات، يُعد دمج تقنيات الفوضى البصرية خطوة فعّالة. حيث تسمح هذه الفوضى البصرية، المبنية على الديناميكيات غير الخطية للإشارات الضوئية، بإخفاء المعلومات المرسلّة، مما يعزز سرية الاتصالات. في هذه الدراسة، نستخدم برنامج OptiSystem لتقييم أداء روابط DWDM MIMO RoFSO التي تنقل الموجات المليمترية، مع دمج آليات أمان عبر أنظمة الفوضى البصرية. وتُساهم هذه التقنيات ليس فقط في تحسين قوة وكفاءة الروابط من حيث السعة والأمان، بل تساعد أيضًا في مقاومة الظروف الجوية القاسية، مما يضمن نظام اتصالات عالي الأداء وأمن، يلبي متطلبات شبكات الجيل الخامس..

الكلمات المفتاحية: الموجات المليمترية, DWDM, MIMO-FSO, الفوضى البصرية.

Table de matières

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
ملخص.....	v
Table de matières.....	vi
Liste des figures.....	ixi
Liste des tableaux.....	xii
Liste des abréviations.....	xii
Introduction générale.....	2

Chapitre I : La Technologie Radio sur Optique en Espace Libre (RoFSO)

I.1 Introduction	5
I.2 Introduction aux réseaux 5G et leurs exigences	5
I.2.1 Les principales exigences de la 5G.....	6
a. La latence.....	6
b. La mobilité.....	7
c. Débit maximal et débit perçu par l'utilisateur.....	7
d. Efficacité énergétique.....	7
e. Capacité de trafic d'une zone.....	7
f. Densité de connexion.....	7
I.2.2 Les applications de la 5G.....	8
a. L'eMBB (enhanced Mobile Broadband)	8
b. Le mMTC (massive Machine-Type Communications)	8
c. L'uRLLC (ultra-Reliable and Low Latency Communications).....	8
I.2.3 Fréquence MMW pour l'eMBB 5G.....	9
I.3 Technologie FSO.....	10
I.3.1 Emetteur.....	10
I.3.1.1 Les sources optiques.....	11
a. Les diodes électroluminescentes.....	11
b. Les diodes lasers.....	11
c. La différence entre la diode LED et la diode Laser.....	11

I.3.1.2	Techniques de modulation.....	12
a.	La modulation directe.....	12
b.	Modulation externe.....	12
I.3.2	Canal FSO.....	13
I.3.2.1	Atténuation par le brouillard.....	14
I.3.2.2	Atténuation par pluie.....	15
I.3.3	Récepteur.....	16
I.3.3.1	Les Photo détecteurs.....	16
a.	Photodiodes PIN (Positive Intrinsic Negative Photodiodes).....	17
b.	Photodiodes APD (Avalanche Photo Diode).....	17
I.4	Radio sur optique en espace libre RoFSO.....	18
I.5	Les avantages des systèmes RoFSO dans les réseaux 5G.....	19
I.6	Les applications des systèmes RoFSO.....	19
I.7	Conclusion.....	20
	Références bibliographiques du chapitre I.....	21

Chapitre II : Techniques de Multiplexage et de Sécurité pour les Systèmes Optiques DWDM-MIMO-FSO

II.1	Introduction.....	24
II.2	Technique DWDM pour augmenter la capacité des systèmes optique.....	24
II.2.1	Composants et architecture d'un réseau DWDM.....	24
II.2.2	Principe et fonctionnement du DWDM	25
II.2.3	Avantages de l'intégration DWDM-FSO.....	25
II.3	Système MIMO dans les liaisons FSO.....	26
II.3.1	Principe de la technologie MIMO.....	27
a.	La diversité spatiale MIMO.....	28
b.	Le multiplexage spatial MIMO.....	28
II.4	Sécurité des communications optique par chaos.....	28
II.4.1	Objectif de crypto-system	28
II.4.2	Principe du chaos optique dans la communication optique	29
II.4.3	Synchronisation chaotique	30
II.4.4	Types de synchronisation chaotique.....	30
II.4.5	Techniques de cryptage optique	30
a.	Cryptage par addition.....	31

b.	Cryptage par commutation.....	31
c.	Cryptage par modulation.....	32
d.	Cryptage par inclusion.....	33
II.4.6	Les avantages des sécurités optique chaos.....	33
II.5	Conclusion.....	34
	Références bibliographiques du chapitre II.....	35

Chapitre III : Simulation et Analyse des résultats

III.1	Introduction.....	38
III.2	Introduction au logiciel OptiSystem.....	38
III.2.1	Applications du logiciel OptiSystem.....	39
III.3	Critères d'évaluation des performances.....	40
III.3.1	Facteur de qualité (Q)	40
III.3.2	Taux d'erreur binaire (BER)	40
III.4	Système de communication MIMO-RoFSO basé sur le DWDM.....	40
III.4.1	Génération de signal optique chaotique	40
III.4.2	Conception d'un système MIMO-RoFSO sécurisé par chaos optique basé sur DWDM	42
III.5	Résultats de simulation.....	45
III.5.1	L'impact des conditions météorologiques sur le système MIMO-RoFSO.....	46
a.	Pluie légère.....	46
b.	Pluie modérée.....	47
c.	Brume légère.....	48
III.5.2	Effet des conditions atmosphériques sur le système sécurisé 4×4 MIMO-RoFSO basé sur DWDM.....	49
a.	Pluie légère.....	49
b.	Pluie modérée.....	50
c.	Brume légère.....	51
III.6	Conclusion.....	52
	Références bibliographiques du chapitre III.....	53
	Conclusion générale.....	55
	Perspectives.....	56

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1. Architecture de la 5G [2]	6
Figure I-2. Les exigences du standard 5G [3]	6
Figure I-3. Les cas d'usage de la 5G	9
Figure I-4. Schéma de la bande de fréquence des ondes millimétriques [10]	9
Figure I-5. Système de communication FSO en visibilité directe [12]	10
Figure I-6. Schéma bloc de l'émetteur FSO [12]	11
Figure I-7. Principe de base d'une modulation directe [13]	12
Figure I-8. Principe de base d'une modulation externe [13]	13
Figure I-9. Les phénomènes qui affectent le faisceau optique [12]	13
Figure I-10. Schéma bloc du récepteur FSO [12]	16
Figure I-11. Coupe transversale d'une diode PIN [13]	17
Figure I-12. Schéma fonctionnel de base de la transmission RoFSO [11]	18

Chapitre II

Figure II-1. Architecture d'un réseau WDM [6]	25
Figure II-2. Principe et fonctionnement du WDM [4]	25
Figure II-3. Schéma d'un système MIMO -FSO [10]	26
Figure II-4. Principe de la technologie MIMO [13]	27
Figure II-5. Principe d'une communication sécurisée par chaos [15]	29
Figure II-6. Principe du chiffrement chaotique par addition [15,19,20]	31
Figure II-7. Principe du chiffrement chaotique par commutation [15,19,20]	32
Figure II-8. Principe du chiffrement chaotique par modulation [15,19,20]	33
Figure II-9. Principe du chiffrement chaotique par inclusion [15,20]	33

Chapitre III

Figure III-1. Interface graphique d'OptiSystem	39
Figure III-2. Architecture d'un système MIMO-RoFSO sécurisé par chaos optique basé sur DWDM.....	42
Figure III-3. Analyseur de spectre RF des signaux transmis : (a) signal en bande de base et (b) signal en ondes millimétriques.....	44

Figure III-4. Forme d'onde du signal dans le domaine temporel avant et après la transmission basée sur le chaos : **(a)** le signal de message d'entrée d'origine ; **(b)** le signal chaotique produit par le sous-système de chaos optique ; **(c)** le signal transmis de manière sécurisée..... 45

Figure III-5. **(a)** BER et **(b)** facteur Q en fonction de la distance dans des conditions de pluie légère pour trois scénarios : SISO-FSO, 2×2-FSO et 4×4-FSO47

Figure III-6. **(a)** BER et **(b)** facteur Q en fonction de la distance dans des conditions de pluie modérée pour trois scénarios : SISO-FSO, 2×2-FSO et 4×4-FSO48

Figure III-7. **(a)** BER et **(b)** facteur Q en fonction de la distance dans des conditions de brume légère pour trois scénarios : SISO-FSO, 2×2-FSO et 4×4-FSO49

Figure III-8. **(a)** BER et **(b)** facteur Q en fonction de la distance pour la légère pluie50

Figure III-9. **(a)** BER et **(b)** facteur Q en fonction de la distance pour la pluie modérée51

Figure III-10. **(a)** BER et **(b)** facteur Q en fonction de la distance pour le brume légère52

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1. Comparaison entre 5G et 4G selon les exigences [3]	8
Tableau I-2. Tableau comparatif entre la LED et le LASER	11
Tableau I-3. Valeurs du paramètre q selon la distribution des gouttelettes [12, 14]	14
Tableau I-4. Atténuation en fonction de la visibilité via la formule de Kim et KRUSE [11,13]	14

Chapitre III

Tableau III-1. Paramètres physiques clés du laser à semi-conducteurs Chaos	41
---	----

Liste des abréviations

5G	Fifth Generation
4G	Fourth Generation
3G	Third Generation

A

ATM	Asynchronous Transfer Mode
AM	Amplitude Modulation
APD	Avalanche Photodiode

B

BS	Base Station
-----------	--------------

C

CW-laser	Continuous Wave Laser
-----------------	-----------------------

D

DL	Laser Diode
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing

E

eMBB enhanced Mobile Broadband

G

Gbps Gigabits par seconde

F

FSO Free Space Optics

FDM Frequency Division Multiplexing

I

IM/DD Intensity Modulation / Direct Detection

IM Intensity Modulation

IP Internet Protocol

L

LOT Internet Protocol

LOS	Line of Sight
LED	Light Emitting Diode
LiDAR	Light Detection and Ranging
LAN	Local Area Network
LTE	Long-Term Evolution
LPF	Low-Pass Filter

M

mMTC	massive Machine Type Communication
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MAN	Metropolitan Area Network
MMW-RF	Millimeter Wave Radio Frequency
MZM	Mach-Zehnder Modulator

N

NR	New Radio
NRZ	Non-Return to Zero

O

OOK	On-Off Keying
OSA	Optical Spectrum Analyzer

OA Optical Adder

OS Optical Subtractor

P

PN Pseudo-Noise

PON Passive Optical Network

PRBS Pseudo-Random Binary Sequence

PIN Positive-Intrinsic-Negative Diode

Q

Q Quality factor

R

RF Radio Frequency

ROF Radio over Fiber

ROFSO Radio over Free-Space Optics

S

SONET	Synchronous Optical Network
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output

T

TEB	Taux d'Erreur Binaire
TDM/WDM	Time/Wavelength Division Multiplexing

U

uRLLC	ultra-Reliable Low Latency Communication
--------------	--

W

WDM	Wavelength Division Multiplexing
WLAN	Wireless Local Area Network

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte où les échanges de données numériques connaissent une croissance exponentielle, les technologies de communication optique apparaissent comme une solution incontournable pour répondre aux exigences croissantes en matière de débit, de sécurité et de fiabilité. Parmi elles, la technologie Radio over Free Space Optics (RoFSO), qui combine la transmission radiofréquence à la propagation optique en espace libre, suscite un intérêt croissant grâce à sa capacité à fournir une bande passante élevée, une utilisation sans licence et une mise en œuvre rapide, notamment dans les environnements urbains denses ou difficiles d'accès.

Pour améliorer davantage les performances de ces systèmes, l'intégration des techniques MIMO (Multiple Input Multiple Output) permet de multiplier les flux de données transmis simultanément, tandis que le multiplexage en longueur d'onde dense (DWDM) optimise l'exploitation du spectre optique, augmentant ainsi la capacité globale du système. Cependant, ces systèmes demeurent également vulnérables aux interceptions et aux attaques potentielles.

Face à ces enjeux, les techniques chaotiques optiques se présentent comme une solution innovante pour sécuriser les communications. En tirant parti de la nature complexe, imprévisible et sensible aux conditions initiales des signaux chaotiques, elles permettent de dissimuler efficacement l'information, rendant son extraction extrêmement difficile sans une connaissance approfondie du système chaotique employé.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en étudiant la performance et la sécurité d'un système MIMO-RoFSO basé sur le DWDM, renforcé par l'intégration de signaux chaotiques optiques. À travers des simulations réalisées notamment sous l'environnement OptiSystem, différentes configurations seront analysées afin d'évaluer l'impact de l'intégration du chaos optique sur la qualité de transmission, la résilience face aux conditions atmosphériques et la confidentialité des données transmises.

Ce mémoire sera structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre présente la technologie RoFSO, qui permet de transmettre des signaux radio via des faisceaux optiques en espace libre. Cette technologie est prometteuse pour les réseaux 5G grâce à sa large bande passante et à son déploiement rapide, bien qu'elle reste sensible aux conditions atmosphériques.

Le deuxième chapitre est consacré aux systèmes DWDM-MIMO-FSO, qui combinent le multiplexage spectral, la diversité spatiale et des techniques de sécurité afin d'assurer des

transmissions optiques à haut débit, robustes et sécurisées, tout en s'adaptant aux conditions climatiques.

Le troisième chapitre constitue le cœur de notre contribution, avec l'étude et l'évaluation détaillées du système proposé à travers des simulations et des analyses de performances.

Chapitre I

La Technologie Radio sur Optique en Espace Libre (RoFSO)

I.1 Introduction

La cinquième génération (ou 5G) a le potentiel de changer complètement les communications sans fil, en fournissant des augmentations massives de capacité et de performance. Plusieurs facteurs importants font que les systèmes de transmission à ondes millimétriques (ou MMW) et la transmission de données par des liaisons optiques en espace libre (ou FSO) constituent une part importante de la révolution 5G pour réaliser cette transformation. Le FSO s'est imposé en raison de sa largeur de bande extrêmement élevée, de sa sécurité de transmission inhérente et de sa faible consommation d'énergie avec une longueur d'onde optique sans licence, bien qu'il soit fortement influencé par le brouillard et les turbulences atmosphériques. En outre, les ondes millimétriques ont été choisies en raison de l'augmentation de la largeur de bande disponible dans cette partie du spectre. Ce premier chapitre offre un aperçu général des technologies FSO et MMW dans le contexte de la 5G. Il présente également les systèmes RoFSO, en mettant en lumière leurs avantages ainsi que leurs principales applications.

I.2 Introduction aux réseaux 5G et leurs exigences

La 5G représente une nouvelle génération de normes pour la téléphonie mobile, destinée à remplacer la 4G LTE. Cette évolution sera déployée sur chaque objet matériel à travers le monde. La 5G ne se présente pas comme une simple progression des réseaux antérieurs, mais plutôt comme une nouvelle base technologique élaborée pour répondre aux exigences grandissantes des clients. Elle répond également à divers besoins, tels que l'accroissement des débits pour les usages mobiles courants et une latence minimale d'une milliseconde ou moins [1].

La technologie mobile 5G présente une architecture réseau nettement améliorée par rapport aux structures précédentes. Les réseaux de grande densité de cellules offrent d'importants avancements en matière de performance. En outre, l'architecture des réseaux 5G procure une sécurité supérieure comparée aux réseaux 4G LTE actuels. L'architecture 5G se compose principalement de trois strates horizontales : « l'activation de service innovante », « la plateforme d'activation » et « la radio hyper-connectée » comme illustre dans la figure (I-1) [1].

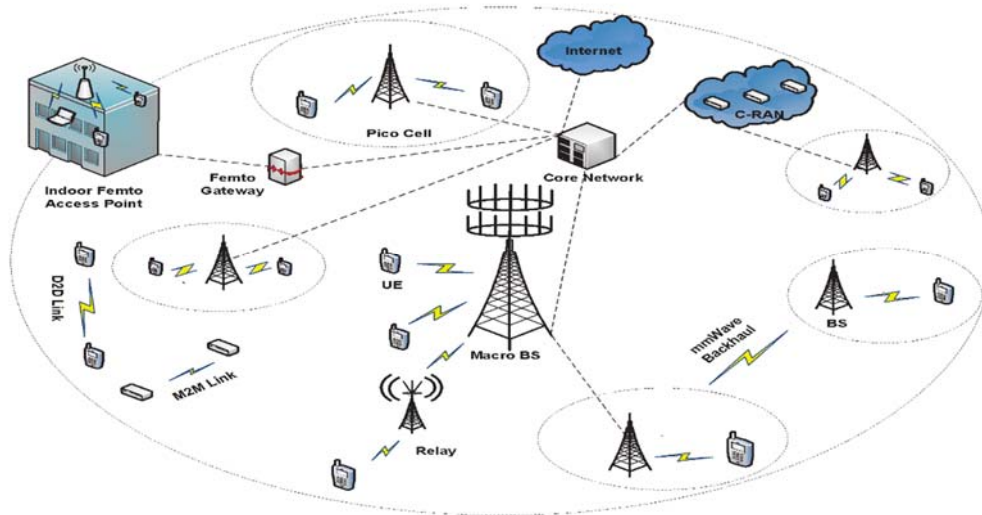


Figure I-1. Architecture de la 5G [2].

I.2.1 Les principales exigences de la 5G

Les réseaux 5G sont censés satisfaire les exigences des applications essentielles de communication 5G comme l'internet des objets (IoT), les smart cités, la chirurgie à distance et les systèmes de transport intelligents. Ce genre d'applications nécessite des performances élevées, comme le montre la figure (I-2) :

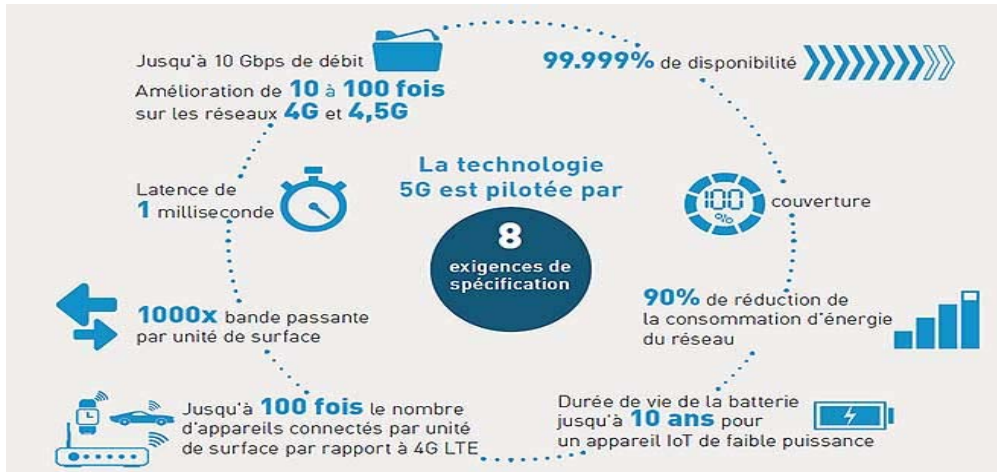


Figure I-2. Les exigences du standard 5G [3].

a. La latence

C'est le laps de temps qu'un paquet de données met pour voyager de sa source à sa destination via un réseau. L'introduction de cette nouvelle norme devrait offrir une latence extrêmement basse [3,4].

b. La mobilité

Dans les réseaux de télécommunications est définie comme la vitesse maximale à laquelle une qualité de service spécifiée peut être maintenue, tout en assurant un passage fluide entre différents nœuds radio appartenant à diverses classes et technologies d'accès. Elle se décline en plusieurs catégories en fonction de la vitesse de déplacement des utilisateurs. Tout d'abord, un utilisateur stationnaire (0 km/h) bénéficie d'une connexion stable sans nécessité de gestion du handover. Ensuite, un utilisateur piéton, se déplaçant entre 0 et 10 km/h, connaît peu de changements de cellule, ce qui minimise l'impact sur la qualité de service. Pour les utilisateurs en véhicule, circulant entre 10 et 120 km/h, une gestion efficace du handover est essentielle afin d'éviter les interruptions de connexion. Enfin, les véhicules à grande vitesse, évoluant entre 120 et 500 km/h, posent des défis majeurs en matière de continuité du service, notamment en raison des transitions rapides entre les cellules et des effets de propagation du signal [3,5].

c. Débit maximal et débit perçu par l'utilisateur

Le réseau 5G offre une connectivité à très haut débit, permettant des vitesses jusqu'à dix fois supérieures à celles proposées par la 4G. Cette avancée se traduit notamment par des taux de transfert de données nettement plus élevés, tant en réception qu'en émission. En effet, le débit de crête en liaison descendante peut atteindre 20 Gbit/s, tandis que celui de la liaison montante peut aller jusqu'à 10 Gbit/s [3,5].

d. Efficacité énergétique

Correspond au quotient de l'efficacité spectrale en usage (bit/canal) et la puissance délivrée en usage (Joule/canal). Elle implique de consommer moins d'énergie (efficacité énergétique) du réseau d'accès radioélectrique tout en garantissant la même prestation ou l'identique performance. Sur le plan de l'utilisateur, des technologies en état d'alerte permettent d'économiser la batterie et facilitent les communications directes entre appareils [3,6].

e. Capacité de trafic d'une zone

Il s'agit du volume de trafic total, exprimé en (Mbit/s/m^2), correspondant au nombre de bits correctement reçus répartis par zone géographique. En ce qui concerne la 5G, la capacité de trafic en liaison descendante est particulièrement importante, avec une valeur cible de 10 Mbit/s/m [3,4].

f. Densité de connexion

Il s'agit du nombre d'appareils connectés par kilomètre carré (km^2). En 5G, cette densité sera multipliée par dix par rapport à la 4G, atteignant ainsi 10^6 objets/ km^2 [3,7].

Le tableau (I-1) ci-dessous présente une comparaison synthétique entre la 5G et la 4G, en mettant en évidence les principales exigences techniques propres à chaque génération de réseau.

Performances/Génération	4G	5G
Débit maximal (Gbit/s)	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale	1x	3x
Vitesse (km/h)	350	500
Latence (ms)	10	1
Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km ²)	105	106
Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
Débit sur une zone (Mbit/s/m ²)	0.1	10

Tableau I-1. Comparaison entre 5G et 4G selon les exigences [3].

I.2.2 Les applications de la 5G

La 5G de télécommunication sans fil, connue sous le nom de nouvelle radio (NR), représente une avancée majeure dans le domaine des réseaux mobiles. Cette technologie est conçue pour répondre à divers cas d'usage, que l'on peut regrouper selon plusieurs catégories principales [8].

a. L'eMBB (enhanced Mobile Broadband) : pour le haut débit mobile amélioré, autrement dit, des communications mobiles à très haut débit. Cette application s'inscrit dans la lignée des générations précédentes de téléphonie mobile et offre une solution face à l'accroissement fulgurant de l'usage des données mobiles. Les applications de cette classe sont généralement des flux vidéo de haute qualité en constante amélioration, ainsi que des applications de réalité virtuelle et augmentée. Ainsi, l'objectif est de satisfaire une demande croissante en matière de volume de données et de rapidité de transfert [8].

b. Le mMTC (massive Machine-Type Communications) : Cette catégorie inclut l'internet des objets. Cette catégorie permet de gérer un nombre extrêmement élevé de connexions (pouvant atteindre jusqu'à un million par kilomètre carré). Généralement, la transmission de données est soumise à des restrictions en termes de volume et la vitesse de transfert n'est pas rigide. Un exemple courant d'application est la smart city, qui utilise des réseaux de capteurs pour coordonner divers services [8].

c. L'uRLLC (ultra-Reliable and Low Latency Communications) : Pour des communications dites critiques, connues sous le nom de communication à faible latence ultra fiable, où la fiabilité et la rapidité de réponse sont primordiales. Le véhicule autonome est la principale application de cette catégorie, mais les communications des services d'urgence et de sécurité sont aussi

impliquées. Il ne doit aucunement y avoir de défaillance ou d'interruption de communication, et la transmission doit se faire dans les délais les plus brefs [8].

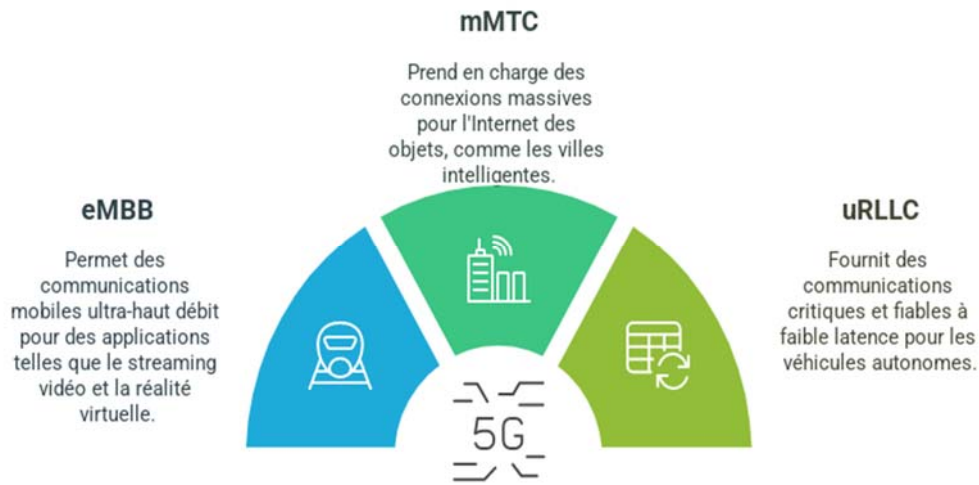


Figure I-3. Les cas d'usage de la 5G.

I.2.3 Fréquence MMW pour l’eMBB 5G

Les ondes millimétriques sont des ondes radioélectriques possédant une longueur d'onde réduite, variant de 1 à 10 mm. Normalement, leur fréquence varie de 30 à 300 GHz, comme illustré dans la figure (I-4) [9].

L'usage de bandes millimétriques est l'une des innovations majeures de la 5G. Ce terme fait référence aux fréquences dépassant les 6 GHz qui n'ont pas encore été considérées pour l'installation de réseaux mobiles en raison de leur maturité technologique et de leur qualité de propagation. Face à l'accroissement constant des débits et des volumes de données échangés, il est indispensable d'exploiter de nouvelles bandes possédant des conduits très larges (plus de 100 MHz par utilisateur) [9].

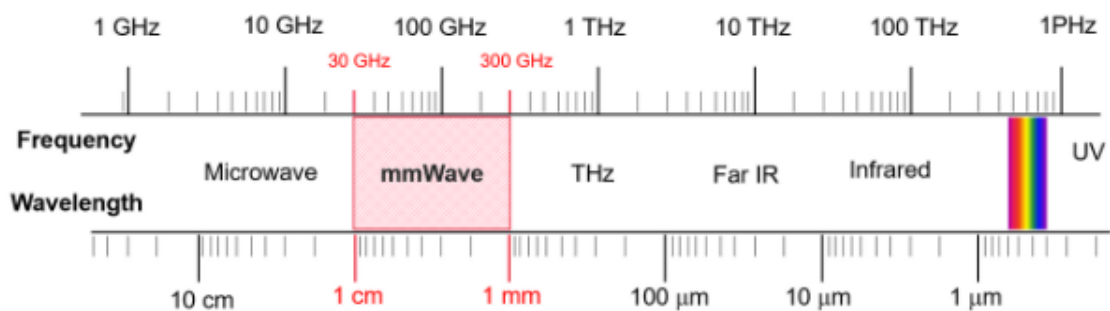


Figure I-4. Schéma de la bande de fréquence des ondes millimétriques [10].

I.3 Technologie FSO

La technologie de transmission FSO, qui exige une ligne de vue directe entre l'émetteur et le récepteur pour assurer une transmission de données sans erreurs, est relativement récente. Ce lien s'appuie sur des technologies similaires à celles de la fibre optique, mais au lieu d'exploiter un canal câblé (fibre optique), les informations sont transmises par voie aérienne à une vitesse extrêmement rapide, pouvant excéder 1 gigabit par seconde (Gbps). Le signal est converti en format numérique et envoyé par un faisceau lumineux infrarouge dans une direction spécifiée [11].

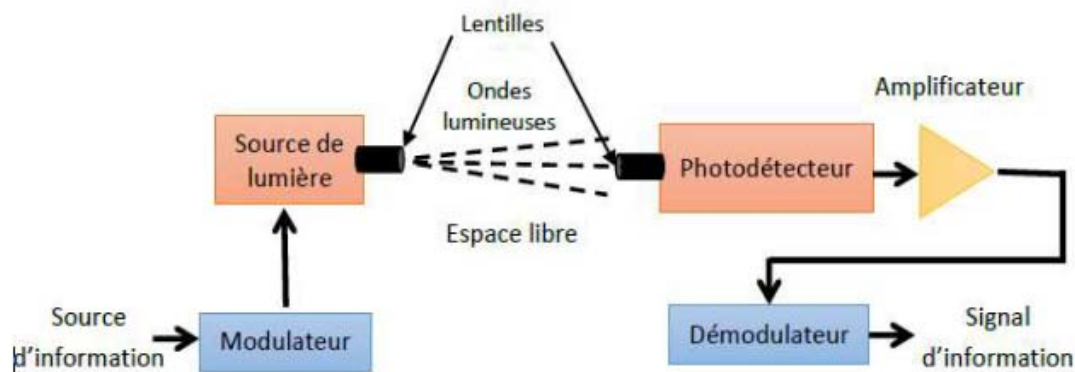


Figure I-5. Système de communication FSO en visibilité directe [12].

I.3.1 Emetteur

Un émetteur optique est un appareil constitué de plusieurs composants (source optique, modulateur, etc.). Il est utilisé pour émettre un signal optique sur lequel sont enregistrées les informations que l'on souhaite transmettre au moyen du support de communication. Elle a pour rôle de transformer les impulsions électriques en signaux lumineux [11 ,12].

Certaines conditions doivent être respectées par les émetteurs optiques :

- Ils doivent fonctionner à température ambiante ;
- Ils doivent avoir la capacité de moduler la lumière qu'ils émettent à une fréquence élevée ;
- Émission de puissance significative ;
- Longue longévité.

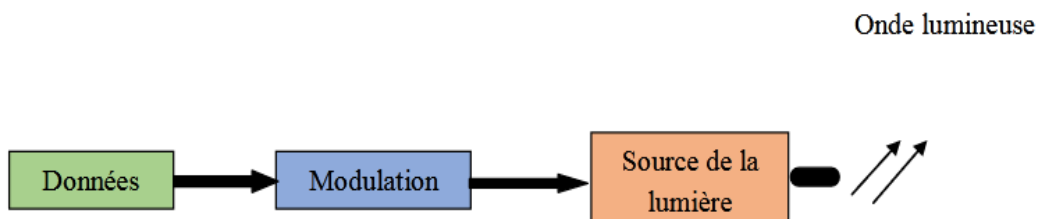


Figure I-6. Schéma bloc de l'émetteur FSO [12].

I.3.1.1 Les sources optiques

Les sources optiques, qui sont des composants actifs, ont pour rôle principal de convertir l'énergie électrique en rayonnement optique. À cet effet, on utilise généralement une diode laser (DL) ou une diode électroluminescente (LED) comme source lumineuse [6].

a. Les diodes électroluminescentes

La diode DEL (Diode Émettrice de Lumière) (LED) (Light Emitting Diode) est une source incohérente et polychromatique qui offre un spectre d'émission relativement large ainsi qu'un diagramme de rayonnement moins directif. Elle est donc utilisée dans les systèmes de transmission qui n'exigent pas de très large bande passante. Elle fournit une puissance optique de plusieurs centaines de micros watts et propose des vitesses inférieures à 5Mbits/s sur fibre multimode [11,12].

b. Les diodes lasers

Une diode laser est un élément optoélectronique fabriqué à partir de matériaux semi-conducteurs qui traite la lumière en s'appuyant sur trois procédés essentiels : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. La diode laser, étant une source cohérente et monochromatique, trouve son application dans les systèmes de transmission sur de très longues distances et se distingue par une largeur spectrale étroite [11,12].

Les diodes laser sont employées dans les connexions de communication optique en espace libre, étant donné qu'elles possèdent des fréquences supérieures qui améliorent le taux de modulation, et leur faisceau peut atteindre des longueurs d'onde plus importantes [11,12].

c. La différence entre la diode LED et la diode Laser

Le tableau suivant résume les points de différence entre les deux types de diode [11,12] :

La diode LED	La diode laser
Les LED sont de petite taille, ont une durée de vie plus longue, sont fiables et nécessitent peu d'énergie.	Les lasers sont de plus grande taille, ont une durée de vie plus longue, sont moins fiables et nécessitent plus de puissance que les LED.
Génération de photon par émission spontanée.	Génération de photon par émission stimulée.
Les LED produisent un faisceau lumineux divergent et incohérent.	Le laser produit un faisceau lumineux monochromatique et cohérent.
Leur réponse est rapide.	Leur réponse est plus rapide que la LED.

Tableau I-2. Tableau comparatif entre la LED et le laser.

I.3.1.2 Techniques de modulation

La modulation est une fonction nécessaire pour transmettre les informations dans les systèmes optiques. Pour la réaliser, deux méthodes sont utilisées : la modulation directe et la modulation externe.

a. La modulation directe

La technique de modulation directe est facile à appliquer et peu onéreuse, cependant elle comporte aussi plusieurs désavantages. Cette méthode est particulièrement inefficace au-delà de 2,5 Gb/s. Pour les débits élevés, le signal qui est directement modulé subit une détérioration. Effectivement, la modulation directe donne lieu à un signal comportant une modulation indésirable de fréquence, nommée chirp. La variation du courant provoque une modification de l'indice de réfraction dans le matériau semi-conducteur, ce qui entraîne une modulation de la fréquence de la lumière émise [11,12].

Le schéma de la modulation directe est illustré dans la figure (I-7). Le générateur produit une suite de données numériques (des séries de 1 et 0) à un taux bien défini, représentant l'information à transmettre. Le laser fonctionne grâce à un circuit de modulation de courant qui offre la possibilité de contrôler la puissance du laser. Le signal à transmettre est représenté par la lumière modulée [11,12].



Figure I-7. Principe de base d'une modulation directe [13].

b. Modulation externe

L'inverse de la modulation directe, la modulation externe se réalise en modulant le faisceau lumineux à la sortie du laser fonctionnant en courant continu, et non le courant d'alimentation du laser. De ce fait, le signal optique transmis est moins influencé par l'effet de chirp. Le diagramme de la modulation externe est illustré dans la figure (I-8) [11,12].

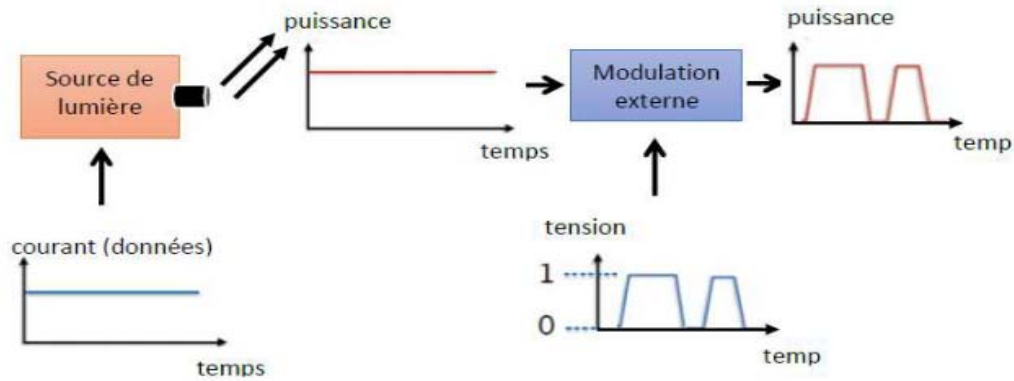


Figure I-8. Principe de base d'une modulation externe [13].

I.3.2 Canal FSO

La liaison considérée est une liaison FSO où le canal de propagation est l'atmosphère (Figure I.9). C'est un environnement extrêmement complexe et dynamique qui peut influencer les propriétés du faisceau laser émis. Les liaisons FSO sont donc affectées par des restrictions décourageantes imposées par le milieu de propagation atmosphérique, qui n'est pas un environnement optimal en raison de la fluctuation spatio-temporelle de ses propriétés physiques et de la variété de ses composants [11,12].

Ces restrictions provoquent une extinction du signal optique lors de sa diffusion, ce qui restreint sa portée. L'extinction atmosphérique est provoquée par plusieurs phénomènes sélectifs en termes de longueurs d'onde : l'absorption moléculaire, qui présente une forte dépendance spectrale, la diffusion moléculaire (diffusion Rayleigh), l'extinction (absorption et diffusion) par les particules en suspension (aérosols), les précipitations (pluie, neige, etc.) et la turbulence atmosphérique résultant des variations spatio-temporelles de l'indice de réfraction de l'air (scintillations, fluctuation spatiale du faisceau) [11,12].

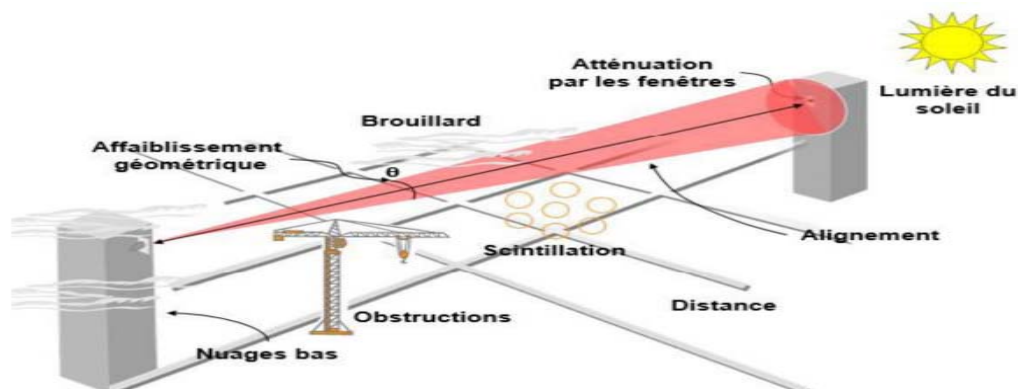


Figure I-9. Les phénomènes qui affectent le faisceau optique [12].

La performance et la constance d'une connexion optique FSO sont influencées par le système employé, ainsi que par les conditions météorologiques et les facteurs atmosphériques tels que les

précipitations, la neige, les scintillements et plus particulièrement le brouillard qui représente l'obstacle majeur lors de l'implémentation des réseaux optiques sans fil. La fiabilité et la disponibilité de la connexion seront fortement influencées par l'intensité et la durée de ces effets [11,12].

I.3.2.1 Atténuation par le brouillard

Parmi tous les facteurs, le brouillard représente l'élément d'atténuation le plus crucial, en particulier dans le domaine de l'infrarouge (zone d'absorption de la vapeur d'eau), étant donné que la dimension des particules du brouillard est comparable aux longueurs d'onde optiques exploitées dans les systèmes de transmission FSO [12,13].

L'utilisation de la visibilité est une façon pour calculer l'atténuation causée par le brouillard. Les modèles Kruse et Kim utilisent cette approche pour prédire cette atténuation [12,13]. L'atténuation spécifique pour les modèles de Kim et de Kruse est exprimée par l'équation (I-1) [12,14] :

$$\alpha_{brouillard} = \frac{3.912}{v} \left(\frac{\lambda}{550 \text{ nm}} \right)^{-q} \quad (\text{I-1})$$

Où, v représente la visibilité en km , λ est la longueur d'onde en nm et q est le paramètre lié à la distribution de la taille des gouttelettes. Les valeurs à utiliser dans l'équation (I-1) sont données dans le tableau (I-3) :

v (km)	q (Taille de particule en nm)
$v > 50$	1.6
$6 < v \leq 50$	1.3
$1 < v \leq 6$	$1.6 v + 0.34$
$0.5 < v \leq 1$	$v - 0.5$
$v \leq 0.5$	0

Tableau I-3. Valeurs du paramètre q selon la distribution des gouttelettes [12, 14].

La visibilité atmosphérique v (km), est définie comme étant la distance maximale à laquelle on peut reconnaître un objet noir par rapport au ciel. La visibilité est plus particulièrement définie à des fins météorologiques. Le tableau (I-4) récapitule les valeurs de l'atténuation par le brouillard en fonction de la visibilité via la formule de KRUSE :

v (km)	0.1	0.8	3	10	50
q (nm)	0.27	0.54	0.84	1.3	1.6
Atténuation (dB/km)	98.28	9.29	1.81	0.34	0.05

Tableau I-4. Atténuation en fonction de la visibilité via la formule de Kim et KRUSE [11,13].

I.3.2.2 Atténuation par pluie

La pluie résulte de la condensation de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Elle est constituée de gouttelettes d'eau dont la taille, la forme et la densité peuvent varier en fonction du temps et de la localisation géographique. La forme des gouttes est principalement déterminée par leur taille : elles sont généralement modélisées comme des sphères ou des sphéroïdes aplatis, avec un rayon pouvant atteindre 1 mm [12,14].

Les particules de brume sont très petites et restent plus longtemps dans l'atmosphère, mais les gouttes de pluie sont très grandes et ne restent plus longtemps dans l'atmosphère. Ceci est la première raison pour que l'atténuation par la pluie soit inférieure à la brume. Le coefficient de diffusion de pluie peut être calculé à l'aide de l'équation (I-2) [12,14] :

$$\beta_{pluiedif} = \tau a^2 N_a Q_{dif} \left(\frac{a}{\lambda} \right) \quad (I-2)$$

Où :

a : Le rayon des gouttes.

N_a : La distribution de gouttes de pluie.

Q_{dif} : L'efficacité de la diffusion.

λ : longueur d'onde.

La distribution des gouttes de pluie peut être calculée avec l'équation (I-3) :

$$N_a = \frac{R}{1.33 (\tau a^2) V_a} \quad (I-3)$$

Où :

R : le taux de précipitations.

V_a : la précipitation de la vitesse limite.

La vitesse de pluie est aussi donnée par :

$$V_a = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} \quad (I-4)$$

Où :

ρ : la densité de l'eau. $\rho = 1g/cm^3$

g : constante gravitationnelle= 9.8 cm/s²

η : la viscosité de l'air. $\eta = 1.8 \times 10^{-4} \text{ g/cm.S}$

L'atténuation de pluie peut être calculée en utilisant l'équation (I-5) :

$$\tau = e^{-\beta_{pluie} d f L} \quad (\text{I-5})$$

I.3.3 Récepteur

Le récepteur est une unité fonctionnelle essentielle dont le rôle principal est de capter et d'extraire l'information transmise par le champ optique incident. Il est responsable de la conversion du signal lumineux en un signal électrique [12].

Cette conversion doit être réalisée en minimisant au maximum toute forme de dégradation du signal. Ce rôle est assuré par un photodétecteur, qui agit à la fois comme compteur de photons et générateur de courant. Les principales caractéristiques recherchées pour un photodétecteur sont :

- une sensibilité adaptée à la longueur d'onde utilisée,
- une grande vitesse de réponse,
- un niveau de bruit aussi faible que possible.

La figure I-10 illustre le concept général du récepteur [12].

À l'image des modules d'émission, l'interface du module de réception prend en charge la conversion optoélectronique tout en limitant les pertes. Le signal optique reçu est ainsi transformé en signal électrique à l'aide d'un photodétecteur de type PIN (Positive-Intrinsic-Negative), largement utilisé dans les systèmes de communication optique pour ses bonnes performances [12].

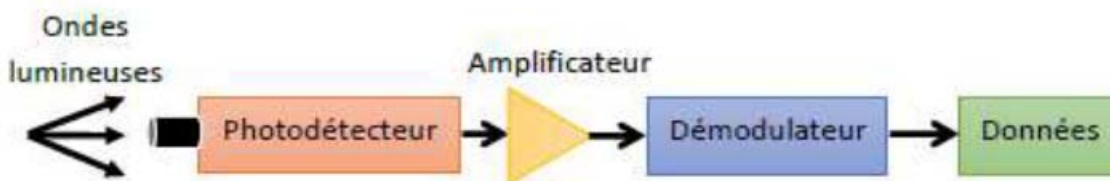


Figure I-10. Schéma bloc du récepteur FSO [12].

I.3.3.1 Les Photo détecteurs

Un photodétecteur est un semi-conducteur à jonction PN polarisé en mode inverse, capable de transformer un signal optique reçu (photon) en un signal électrique via l'effet photoélectrique [13].

Le signal produit par une photo détectrice est constamment proportionnel à la puissance optique instantanée reçue. Comme le signal optique tend à être faible après avoir traversé le canal de communication atmosphérique, il est impératif que la photo détectrice soit capable de répondre à des

normes de performance strictes. Cela inclut une sensibilité élevée dans son éventail de longueurs d'onde opérationnelles, un niveau sonore minimal et une bande passante appropriée pour supporter le taux de données souhaité [13].

On peut classer les photodiodes en deux types : celles sans amplification interne PN et PIN, et celles qui fonctionnent sur le principe de l'avalanche de gain interne (APD) [13].

a. Photodiodes PIN (Positive Intrinsic Negative Photodiodes)

Il s'agit aussi de dispositifs à semi-conducteurs qui contiennent une zone intrinsèque (légèrement dopée) située entre une région de type *P* et une région de type *N*. Quand il est inversé, ce composant génère un courant en proportion de la puissance optique incident [13].

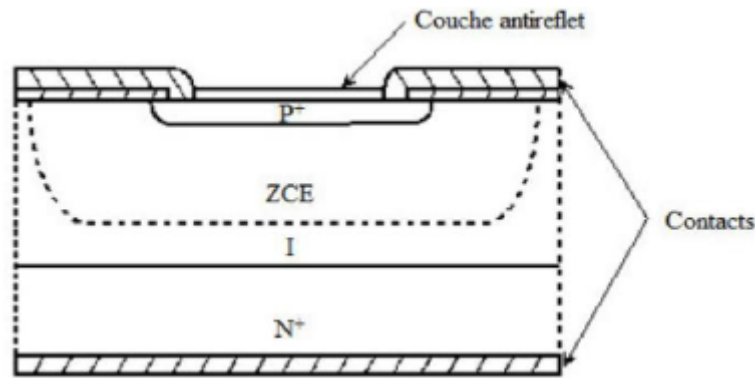


Figure I-11. Coupe transversale d'une diode PIN [13].

b. Photodiodes APD (Avalanche Photo Diode)

La photodiode à avalanche (APD) est un capteur optoélectronique avancé qui exploite le phénomène d'avalanche électronique pour amplifier le signal généré par l'absorption de photons. Contrairement aux photodiodes conventionnelles, les APD fonctionnent sous une tension inverse élevée, généralement de l'ordre de plusieurs centaines de volts. Cette haute tension permet d'accélérer les électrons générés par l'interaction photonique dans la zone de déplétion du semi-conducteur [13].

Lorsqu'un photon incident pénètre cette région, il excite un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, créant ainsi une paire électron-trou. Sous l'effet du champ électrique intense, ces porteurs de charge acquièrent une énergie cinétique suffisante pour provoquer, par ionisation par impact, l'émission d'électrons secondaires lors de collisions avec les atomes du matériau [13].

Ce processus en cascade, appelé effet d'avalanche, entraîne une amplification interne du signal électrique, rendant l'APD particulièrement adaptée aux applications nécessitant une détection de lumière extrêmement sensible. Toutefois, cette amplification s'accompagne d'un bruit d'avalanche intrinsèque, qui peut être atténué par le refroidissement du dispositif ou par l'utilisation de matériaux

semi-conducteurs spécifiques, tels que le silicium pour les longueurs d'onde visibles, et l'InGaAs pour l'infrarouge proche. Grâce à leur grande sensibilité et leur rapidité de réponse, les APD sont couramment utilisées dans les télécommunications optiques, les systèmes de vision nocturne, les capteurs LiDAR, ainsi que dans les domaines scientifiques et médicaux, où une détection précise de faibles niveaux de lumière est essentielle [13].

I.4 Radio sur optique en espace libre RoFSO

Radio sur optique en espace libre (RoFSO) est l'une des technologies émergentes où la sous-porteuse de radiofréquence (RF) est modulée sur un faisceau optique et transmise en espace libre. Cette technologie peut servir de plateforme pour faire converger la transmission par radiofréquence et la communication optique à travers l'espace libre. Cette technologie peut servir de plateforme pour faire converger la transmission par radiofréquence et la communication optique dans l'espace libre, comme le montre le schéma fonctionnel de la figure (I-12) [15].

La technologie RoFSO est une technologie de ligne de vue (LOS) qui utilise un laser ou une diode électroluminescente (DEL) comme source de lumière et une sous-porteuse radiofréquence modulée sur celle-ci [15]. L'équation fondamentale de la liaison pour la communication en LOS est exprimée par :

$$P_{Reicieved} = P_{Transmitted} \frac{d_R^2}{(d_T + \theta R)^2} 10^{-\alpha R/10} \quad (I-6)$$

Où :

d_R : Diamètre d'ouverture du récepteur,

d_t : diamètre d'ouverture de l'émetteur,

θ : Divergence du faisceau,

R : Portée de la liaison,

α : Atténuation.

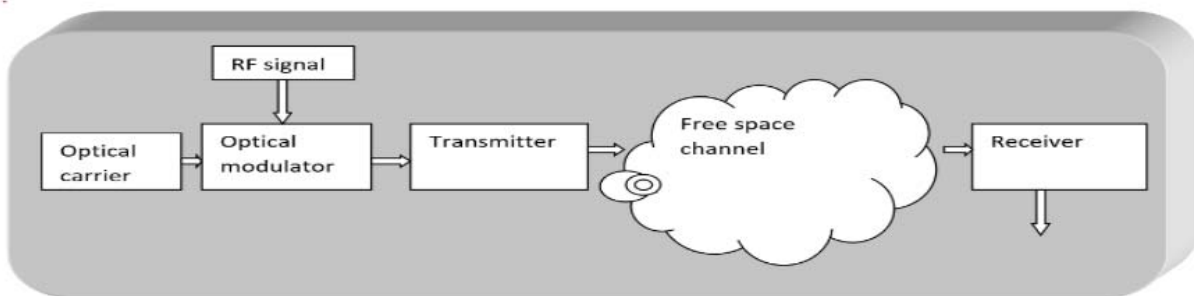


Figure I-12. Schéma fonctionnel de base de la transmission RoFSO [11].

I.5 Les avantages des systèmes RoFSO dans les réseaux 5G

Les liaisons RoFSO offrent une alternative performante aux infrastructures classiques grâce à leur large bande passante, répondant aux exigences des réseaux 5G en matière de haut débit et faible latence. Elles sont adaptées à des applications comme l'IoT, la télémédecine ou les véhicules autonomes, tout en restant compatibles avec des équipements simples et accessibles [11].

Les liaisons RoFSO offrent un déploiement rapide et économique grâce à l'absence de licence d'exploitation, réduisant les coûts administratifs. Elles représentent une alternative compétitive aux systèmes optiques traditionnels, sans nécessiter d'infrastructures lourdes comme la fibre optique [11].

Les liaisons RoFSO se distinguent par leur installation rapide et flexible, idéales pour les zones urbaines denses, reculées ou les besoins temporaires. Elles offrent une solution efficace et économique pour accompagner le déploiement des réseaux 5G [11].

I.6 Les applications des systèmes RoFSO

Les systèmes RoFSO permettent des communications haut débit rapides et sans support physique, particulièrement utiles pour les liaisons inter-satellites. Ils constituent une alternative fiable aux transmissions radio dans des domaines comme l'exploration spatiale, l'observation terrestre et les télécommunications [12].

Dans les zones urbaines et institutionnelles, les liaisons RoFSO permettent une connectivité haute débit sans travaux lourds, réduisant les coûts et l'impact environnemental par rapport aux réseaux câblés traditionnels [12].

Les systèmes RoFSO offrent une connectivité temporaire, rapide et fiable, particulièrement adaptée aux événements spéciaux, chantiers, sites industriels ou zones en attente de réseau permanent, grâce à leur déploiement flexible et sans infrastructure lourde [12].

Les liaisons RoFSO assurent une connectivité d'urgence en cas de panne ou catastrophe et sont particulièrement efficaces dans les zones à forte densité de trafic, comme les grandes villes, où elles améliorent la couverture et garantissent un débit élevé sans congestion [12].

Les systèmes RoFSO offrent une solution flexible et rapide pour diverses applications nécessitant une connectivité haut débit, telles que les communications spatiales, les réseaux urbains, les événements temporaires, les connexions d'urgence et la densification des infrastructures, tout en remplaçant efficacement les réseaux filaires [12].

I.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exploré les technologies clés qui façonnent l'évolution des communications sans fil dans l'ère de la 5G. Les technologies FSO et MMW se présentent comme des solutions complémentaires et performantes pour répondre aux exigences croissantes en matière de débit, de latence et de connectivité massive. En particulier, la technologie RoFSO, qui combine les avantages des communications optiques et radio, émerge comme une alternative prometteuse aux infrastructures classiques, grâce à sa bande passante élevée, sa rapidité de déploiement et sa flexibilité d'utilisation.

Nous avons également mis en lumière les principales exigences du standard 5G ainsi que les bénéfices potentiels des liaisons RoFSO dans ce cadre, notamment pour des applications critiques comme l'IoT, la mobilité intelligente et la télémédecine. Ces éléments ouvrent la voie à une intégration intelligente des systèmes RoFSO dans les futures architectures de réseaux 5G, tout en posant de nouveaux défis en matière de performance, de fiabilité et de sécurité qui feront l'objet des chapitres suivants.

Références bibliographiques du chapitre I

- [1] Lan, N. T. M. (2023). Evolution of Wireless Technology: From 1G to 5G. *Asian Journal of Applied Sciences and Technology*, 7(04), 68-73.
- [2] Sanyal, D. K., Kar, U. N., & Roy, M. (2020). Mobile communications and computing: A broad review with a focus on smart healthcare. *Smart Healthcare Analytics in IoT Enabled Environment*, 9-33.
- [3] Aouissi, F. (2022). Evaluation d'un système MIMO-NOMA de communication sans fil 5G. *Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma*.
- [4] Youcefi, A., & Mazouni, I. (2019). Les différentes formes d'ondes candidates dans les applications 5G. *Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma*.
- [5] Ngom, A. (2019). Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou "Small Cells" pour le standard 5G. *Doctoral dissertation, COMUE Université Côte d'Azur. Université Cheikh Anta Diop, Dakar*.
- [6] Ikni, S. (2019). Contribution à l'étude et au développement de techniques avancées de modulations multiporteuses pour les futurs systèmes de communication sans fil. *Thèse de doctorat. Université 8Mai 1945 – Guelma*.
- [7] Herbert, P. (2024). Enjeux et opportunités des réseaux 5G pour les entreprises industrielles. *Annales des Mines-Enjeux numériques*, 28(4), 15-21.
- [8] Salhane, I., & Rifi, M. (2021, March). La technologie 5G pour les objets connectés. In *Colloque sur les Objets et systèmes Connectés-COC'2021*.
- [9] Magne, F. (1998). Télécommunications haut débit en ondes millimétriques. *Ed. Techniques Ingénieur*.
- [10] Kyllonen, J. (2019). Design of frequency agile filter and mmWave antenna for 5G mobile devices. *Doctoral dissertation, Limoges*.
- [11] Mokhtar, D. (2021). Etude et évaluation des performances d'un système de communication SAC-OCDMA dans les liaisons FSO. *Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et Technologies*.
- [12] Noun, A. Atamenia, F. (2021). Etude et analyse des performances du système WDM/FSO. *Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma*.

- [13] Hamamdia, I. (2022). Etude des performances d'un système de communication optique hybride SDM/FSO utilisant la lumière laser à 2 μm . *Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma*.
- [14] Harichane, Y., & Benkraouda, I. (2019, July). Étude et évaluation des performances d'un système de communication sans fil optique en espace libre (FSO). *Mémoire de master, Chlef*.
- [15] Jearsiripongkul, T., et al. (2024). Hygrothermomechanical loading-induced vibration study of multilayer piezoelectric nanoplates with functionally graded porous cores resting on a variable viscoelastic substrate. *International Journal of Thermofluids*, 100715.

Chapitre II

Techniques de Multiplexage et de Sécurité pour les Systèmes Optiques DWDM-MIMO-FSO

II.1 Introduction

La technologie FSO permet des transmissions optiques à haut débit et économiques. Toutefois, elle reste limitée par les conditions météorologiques défavorables, telles que la pluie et le brouillard, qui provoquent une forte atténuation du signal et une augmentation du taux d'erreur binaire [1]. Pour améliorer la fiabilité de ces systèmes, des solutions telles que le MIMO (Multiple Input Multiple Output) et la multiplexions dense en longueur d'onde (DWDM) [2]. Par ailleurs, l'intégration de systèmes chaotiques offre une couche supplémentaire de sécurité physique au canal optique [3]. Ce chapitre présente les principales techniques de multiplexage, de diversité et de sécurisation utilisées dans les systèmes FSO avancés.

II.2 Technique DWDM pour augmenter la capacité des systèmes optique

Le DWDM est une technologie utilisée pour transmettre plusieurs signaux optiques sur une même fibre optique en utilisant différentes longueurs d'onde. Il permet donc d'augmenter considérablement la capacité de transmission des systèmes optiques [4].

II.2.1 Composants et architecture d'un réseau DWDM

L'illustration suivante Figure (II-1) dépeint l'architecture fondamentale et le mode de fonctionnement d'un réseau DWDM. Ce réseau comprend des points finaux, des nœuds de commutation et des connexions en fibre optique. Les nœuds d'extrémité comprennent des modulateurs-démodulateurs (ou modems) pour chaque voie, ainsi que des multiplexeurs et démultiplexeurs utilisés pour le regroupement et la dissociation des ondes lumineuses de différentes fréquences. Les modulateurs transforment les données, tandis que les démodulateurs transforment à nouveau les signaux optiques en données numériques [5,6].

Les nœuds de commutation comprennent des multiplexeurs et démultiplexeurs à insertion-extraction, des commutateurs de longueur d'onde ainsi que des convertisseurs de longueur d'onde. Les multiplexeurs sont utilisés pour combiner des signaux de différentes longueurs d'onde en vue de leur transmission, tandis que les démultiplexeurs ont pour fonction de les séparer. Le commutateur de longueur d'onde assure la connexion entre les voies d'entrée et les voies de sortie désirées. Les dispositifs de conversion de longueur d'onde ont pour objectif, au sein d'une même fibre optique, de transformer les longueurs d'onde surexploitées en longueurs d'onde accessibles afin d'optimiser l'utilisation des canaux [5].

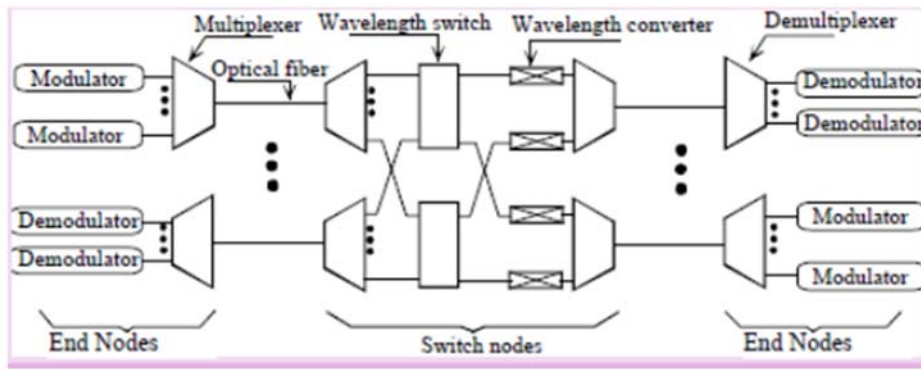


Figure II-1. Architecture d'un réseau WDM [6].

II.2.2 Principe et fonctionnement du DWDM

Le DWDM constitue une méthode avancée de multiplexage fondée sur la répartition en fréquence (FDM). Cette technologie s'appuie sur une propriété fondamentale de la lumière : la possibilité pour des longueurs d'onde distinctes de circuler simultanément dans un même canal optique sans interférer. À l'aide de lasers émettant à des longueurs d'onde bien définies, chaque signal lumineux peut correspondre à un canal de transmission indépendant. Ainsi, plusieurs canaux peuvent être combinés et transmis en parallèle sur une seule fibre optique, augmentant considérablement la capacité du système. Le DWDM exploite généralement la bande infrarouge du spectre électromagnétique, comprise entre 400 nm et 1 mm. Bien que les longueurs d'onde soient couramment utilisées pour désigner les canaux optiques, l'utilisation de la fréquence permet une identification plus fine des espacements entre canaux, ce qui est particulièrement avantageux dans les systèmes DWDM à espacement dense, comme le montre la Figure (II-2) [4,7].

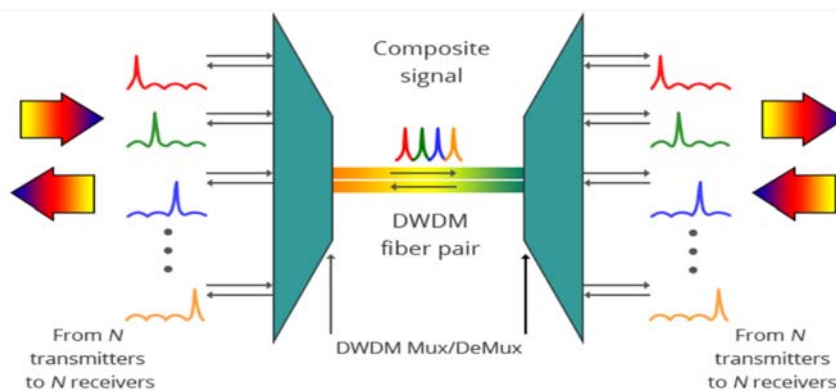


Figure II-2. Principe et fonctionnement du WDM [4].

II.2.3 Avantages de l'intégration DWDM-FSO

L'utilisation de la technologie WDM pour le FSO est inspirée par la demande de communication à large bande. Cette technique a apporté une révolution car la capacité de données du système est

améliorée en ajoutant simplement un plus grand nombre de canaux et en réduisant l'espacement des canaux sans avoir besoin de plus d'une liaison FSO. En réduisant l'espacement des canaux à un niveau approprié, les systèmes FSO basés sur DWDM sont également réalisables et font l'objet de divers travaux de recherche. Le FSO trouve des applications dans de vastes domaines tels que les réseaux de liaison pour les communications cellulaires, la reprise après sinistre, la connectivité LAN-LAN, la télévision à haute définition, l'extension du MAN, la transmission vidéo, l'industrie médicale et la surveillance. Toutefois, son utilisation est limitée en raison des graves problèmes liés à la vulnérabilité de la liaison aux conditions météorologiques et à l'évanouissement induit par les turbulences atmosphériques [8].

II.3 Système MIMO dans les liaisons FSO

La technologie MIMO est largement adoptée dans les systèmes de télécommunications modernes tels que le LTE, le WLAN et la 5G, en raison de sa capacité à améliorer le débit et la fiabilité de transmission. Dans les environnements restreints, l'intégration de petites antennes MIMO engendre cependant des interférences électromagnétiques, notamment par couplage mutuel dû aux radiations, aux courants et aux ondes de surface. Ces interférences peuvent détériorer le rapport signal-sur-bruit (SINR) et impacter négativement les performances du réseau. Transposée aux systèmes FSO, la configuration MIMO repose sur l'utilisation de M émetteurs lasers et N récepteurs optiques, permettant d'améliorer la robustesse du lien optique face aux turbulences atmosphériques, comme illustré par la Figure (II-3) [9].

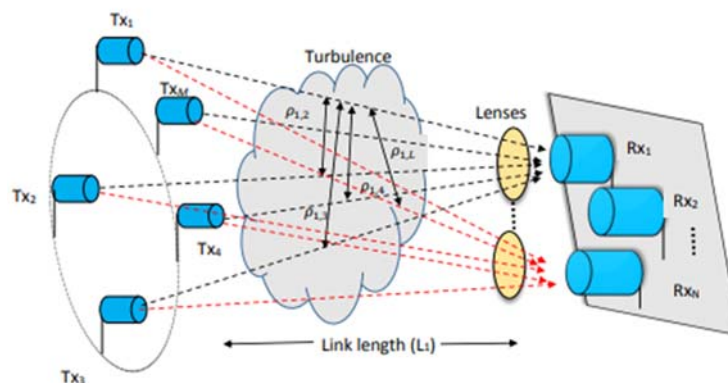


Figure II-3. Schéma d'un système MIMO-FSO [10].

La technologie MIMO est aujourd'hui l'une des plus utilisées dans les systèmes de communication sans fil, car elle permet d'augmenter considérablement le débit de transmission et la portée du lien, sans nécessiter d'augmentation de la bande passante ni de la puissance émise. En exploitant plusieurs antennes, MIMO transmet la puissance requise de manière efficace, générant ainsi

un gain d'antenne qui améliore l'efficacité spectrale. Cette approche renforce également la fiabilité de la liaison et réduit l'impact de l'atténuation du signal. Grâce à ces avantages, la technologie MIMO constitue un pilier fondamental des systèmes de communication sans fil de nouvelle génération. Le canal MIMO peut être représenté mathématiquement comme suit :

$$y = Hx + n \tag{II-1}$$

Où y et x représentent les vecteurs reçus et transmis, H et n désignent respectivement la matrice du canal et le vecteur de bruit. La matrice du canal H a une forme mathématique générale donnée par :

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & \dots & H_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M1} & \dots & H_{MN} \end{bmatrix} \tag{II-2}$$

Dans cette illustration, M désigne le nombre d'émetteurs et N représente le nombre de récepteurs dans un canal MIMO. On présume que les émetteurs et les récepteurs sont indépendants les uns des autres et qu'ils ne sont pas corrélés. Par ailleurs, on suppose que les entrées et les sorties du canal MIMO sont des valeurs réelles non négatives. De plus, plutôt que le bruit additif complexe gaussien de type blanc, on considère que c'est le bruit dépendant du signal qui est le facteur principal limitant les performances élevées du système décrit. Il est bien établi que l'utilisation d'un canal MIMO offre de meilleures performances comparées à un système de communication SISO, étant donné que la puissance transmise reste constante [11].

II.3.1 Principe de la technologie MIMO

La technologie MIMO repose sur l'idée d'envoyer des signaux via différentes antennes au sein d'un même canal. On simule cette réception sur une bande de n canaux distincts en utilisant divers traitements et un ensemble d'antennes (Figure II-4) [12].

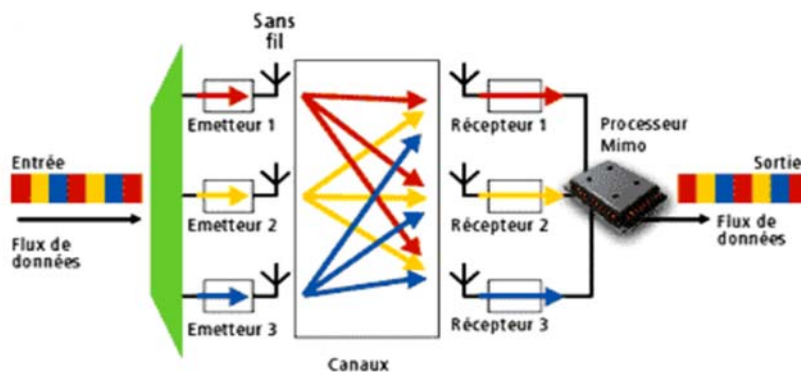


Figure II-4. Principe de la technologie MIMO [13].

Le flux est subdivisé en divers segments de fréquence identique qui sont transmis via 3 transmetteurs vers 3 destinataires. L'algorithme facilite par la suite l'identification des différents flux,

dans le but de les combiner en un seul. Cet algorithme exploite la réflexion des signaux sur les surfaces telles que les murs, le sol, etc. Bien que ces réflexions puissent être perçues comme défavorables, la technologie MIMO exploite ces divers canaux pour optimiser la vitesse de transmission des données. Il est possible d'identifier deux types de MIMO :

a. La diversité spatiale MIMO

On diffuse de manière simultanée un même message à travers plusieurs antennes lors de la transmission. Les signaux captés par chaque antenne de réception sont ensuite mis en phase et additionnés de manière. Cela contribue à améliorer le rapport S/B (par l'accroissement de la diversité) de la transmission. Pour que cette méthode soit performante, il est nécessaire que les sous-canaux MIMO soient indépendants les uns des autres [14].

b. Le multiplexage spatial MIMO

Chaque message est divisé en sous-messages, qui sont simultanément transmis par les différentes antennes d'émission. Les signaux reçus par les antennes de réception sont ensuite combinés afin de reconstituer le message initial dans son intégralité. Comme pour la diversité MIMO, il est essentiel de décorrélérer les sous-canaux de propagation pour garantir une transmission efficace. Le multiplexage MIMO offre la possibilité d'accroître les taux de transmission, grâce à l'avantage du multiplexage. On peut appliquer conjointement les méthodes de diversité et de multiplexage MIMO. Par exemple, pour un système MIMO 5×5 (comportant 5 antennes d'émission et 5 antennes de réception), il est possible de mettre en place un sous-système MIMO 2×3 pour le multiplexage et un autre sous-système MIMO 3×3 pour la diversité MIMO [12].

II.4 Sécurité des communications optique par chaos

Dans cette partie nous allons détailler les algorithmes cryptographiques et les principes de conception basés sur le chaos.

II.4.1 Objectif de crypto-system

La sécurité de l'information repose sur plusieurs principes fondamentaux visant à garantir la confidentialité, l'intégrité et l'authenticité des données. La confidentialité est assurée par le chiffrement, empêchant l'accès aux données par des personnes non autorisées. L'intégrité vise à s'assurer que les informations n'ont pas été altérées de manière non autorisée, ce qui est souvent réalisé à l'aide de codes d'intégrité ou d'empreintes numériques (hash). L'authentification permet de vérifier l'identité des parties impliquées dans une communication, généralement via des certificats numériques ou des mécanismes de cryptographie asymétrique. La non-répudiation, quant à elle, empêche une entité de

nier une action ou un message qu'elle a émis, grâce à l'utilisation de signatures numériques. L'autorisation d'accès garantit que seules les personnes ayant les droits appropriés peuvent accéder à certaines ressources sensibles. Enfin, la protection des communications contre les interceptions ou attaques comme les attaques de type man-in-the-middle est essentielle pour maintenir la fiabilité des échanges [3].

II.4.2 Principe du chaos optique dans la communication optique

La Figure (II-5) illustre le schéma principal de la communication sécurisée par le chaos. L'idée est d'utiliser des signaux chaotiques pour dissimuler une information et de la transmettre au destinataire via un canal public. L'information chiffrée est obtenue au niveau du récepteur.

La clé qui a servi à chiffrer l'information chez l'émetteur est employée pour la déchiffrer lors de la réception, les conditions initiales assurent une synchronisation entre les deux générateurs. En cryptographie analogique, le principe de chiffrement repose sur la création d'une porteuse chaotique dont l'étendue spectrale englobe entièrement celle de l'information analogique. Dans le domaine du numérique, la largeur de bande du chaos est associée au taux de transfert binaire, dont le spectre doit également être capable d'être masqué par la porteuse chaotique. Du point de vue de la qualité de la connexion chiffrée, un transfert analogique mettra l'accent sur le rapport signal/bruit du décodage par synchronisation entre le chaos. Pour une transmission numérique, cela fait référence à la synchronisation effectuée et l'élimination de la porteuse chaotique réalisée par le récepteur. Afin d'obtenir une représentation précise de la qualité du décodage d'une information numérique, nous établirons un diagramme de l'œil [15].

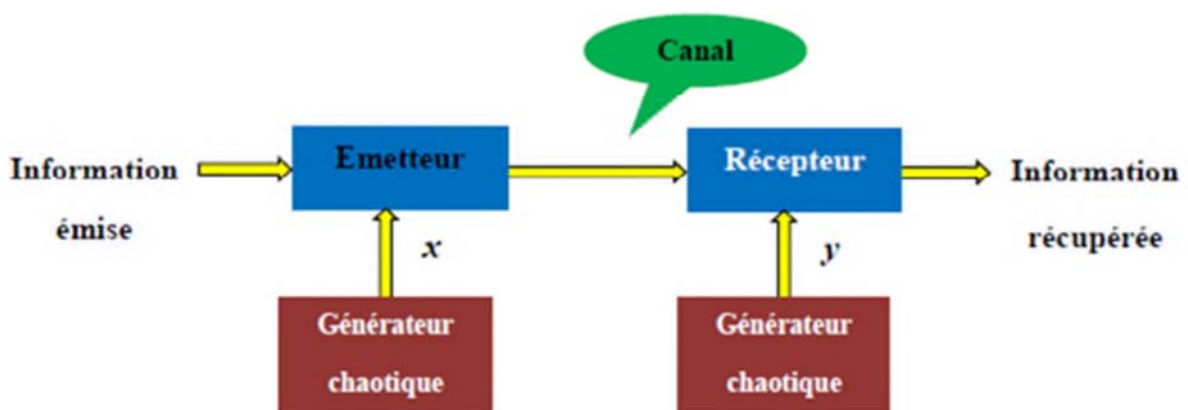


Figure II-5. Principe d'une communication sécurisée par chaos [15].

II.4.3 Synchronisation chaotique

La synchronisation constitue un mécanisme de contrôle permettant de réguler un comportement chaotique. Elle se manifeste lorsque deux systèmes dynamiques évoluent de manière à suivre mutuellement leur trajectoire, malgré leur nature instable.

Le phénomène de synchronisation chaotique désigne une situation où deux (ou plusieurs) systèmes chaotiques, qui évoluent individuellement de manière apparemment aléatoire et imprévisible, parviennent à adopter un comportement similaire. Cette synchronisation survient même si les systèmes présentent initialement des conditions différentes. Ce phénomène est largement étudié dans le domaine de la dynamique des systèmes non linéaires et suscite un intérêt croissant dans des domaines tels que la physique, l'ingénierie et les télécommunications [16].

L'idée d'exploiter la synchronisation du chaos pour établir des systèmes de communication sécurisés remonte au début des années 1990. Dans ce type de protocole, l'information est intégrée dans un signal porteur chaotique à l'émetteur, puis transmise au récepteur. Celui-ci, en se synchronisant avec l'émetteur, reproduit localement un signal chaotique identique. Ce signal est ensuite utilisé pour extraire l'information chiffrée, ce qui revient à appliquer un processus de filtrage non linéaire [17].

II.4.4 Types de synchronisation chaotique

La synchronisation entre systèmes chaotiques peut prendre plusieurs formes selon le degré d'accord entre leurs dynamiques. La synchronisation par projection se produit lorsque deux systèmes chaotiques sont projetés dans un espace commun, entraînant une dynamique synchronisée dans cet espace partagé. En synchronisation parfaite, les deux systèmes évoluent de manière identique dans l'espace des phases, suivant des trajectoires indiscernables, ce qui traduit une correspondance totale de leurs comportements. À l'inverse, dans une synchronisation partielle, bien qu'une certaine cohérence soit maintenue entre les dynamiques des systèmes, leurs trajectoires peuvent diverger sur certains aspects, traduisant une correspondance incomplète [18].

II.4.5 Techniques de cryptage optique

Les méthodes de cryptage chaotique tirent parti du comportement imprévisible et de la sensibilité extrême aux conditions initiales des systèmes dynamiques non linéaires afin d'assurer une transmission sécurisée des données. Elles reposent sur la génération d'un signal chaotique, utilisé pour masquer le message à transmettre. Ce dernier, une fois chiffré, est envoyé au récepteur, qui le déchiffre à l'aide d'un mécanisme de synchronisation avec le système émetteur. Les principales techniques de cryptage chaotique incluent notamment :

a. Cryptage par addition

Le chiffrement par addition, également appelé masquage chaotique, représente l'une des méthodes les plus simples et fondamentales de transmission sécurisée de l'information. Comme illustré dans la Figure (II-6), le principe repose sur la superposition du signal d'information $m(t)$, qu'il soit binaire ou analogique, à un signal porteur chaotique $x(t)$ généré par l'émetteur. Le signal chiffré $y(t)$, résultant de cette addition, est ensuite transmis à travers le canal de communication vers le récepteur qui se synchronise de la même manière qu'avec le dispositif principal. On obtient le signal d'information reconstruit $\hat{m}(t)$ en soustrayant le signal chiffré transmis $y(t)$ du signal porteur estimé $\hat{x}(t)$ [19,20,21].

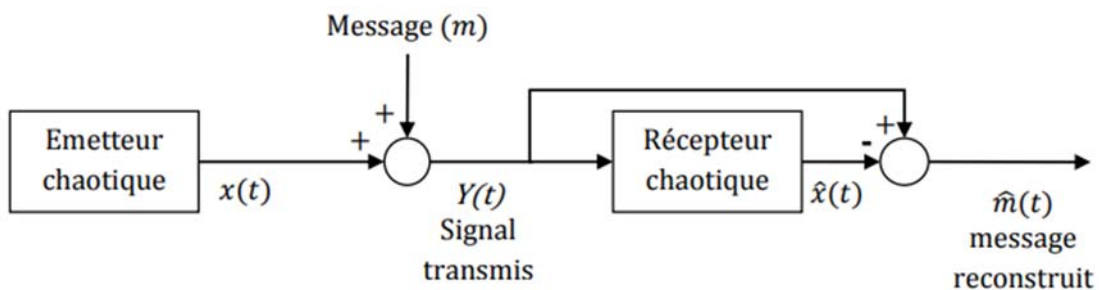


Figure II-6. Principe du chiffrement chaotique par addition [15,19,20].

Cette technique se distingue par sa simplicité de mise en œuvre et sa capacité à coder aussi bien des signaux continus que discrets. Cette méthode est particulièrement efficace en l'absence de bruit dans le canal. De plus, la force du signal d'information doit être inférieure à celle du signal porteur en l'absence de bruit de canal, afin de ne pas interférer avec le processus de synchronisation au niveau du récepteur et aussi pour assurer la confidentialité de la transmission. Cependant, si on utilise un canal de transmission bruyant et que l'émetteur chaotique a des incertitudes paramétriques, les performances du système peuvent se dégrader sérieusement et il est même possible qu'on perde la synchronisation entre les systèmes émetteur et récepteur (maître et esclave) [15,19,20].

b. Cryptage par commutation

Cette méthode nécessite que le message soit sous forme binaire. La Figure (II-7) représente le schéma de principe de cette méthode.

Le dispositif chaotique est composé de deux oscillateurs produisant deux signaux chaotiques, notés $x_1(t)$ et $x_2(t)$. Le signal binaire $m(t)$ sert à basculer entre $x_1(t)$, qui représente le bit 1, et $x_2(t)$, qui représente le bit 0. Le signal qui en découle $x(t)$ est acheminé au récepteur via le canal de transmission. Le système récepteur est également composé de deux systèmes subalternes. Le premier

système esclave se synchronise uniquement avec le signal chaotique $x_1(t)$ (le premier oscillateur), de sorte que la détection du bit 1 s'effectue par convergence de l'erreur de synchronisation vers zéro. Ainsi, le signal d'information peut être finalement extrait à l'issue de l'opération de détection [15,19,20].

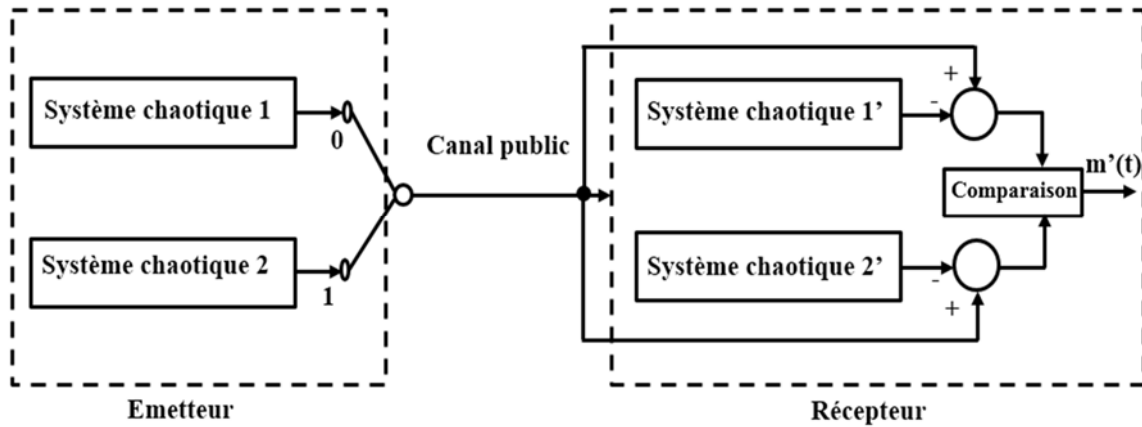


Figure II-7. Principe du chiffrement chaotique par commutation [15,19,20].

La technique de commutation chaotique offre une plus grande résistance au bruit de canal comparativement à la méthode de masquage chaotique. Toutefois, les systèmes de codage qui reposent sur cette méthode ont une vitesse de transmission notablement réduite du fait qu'à chaque modification de bit, il faut prendre en compte le temps de convergence requis pour établir la synchronisation. Cette méthode se distingue également par une sécurité réduite, car à chaque modification du niveau binaire, on peut apercevoir la variation du signal codé, surtout quand les deux oscillateurs utilisés au niveau de l'émetteur ont deux attracteurs très dissemblables [15,19,20].

c. Cryptage par modulation

Cette méthode utilise le signal d'information, souvent de nature binaire, pour moduler l'un des paramètres du système chaotique émetteur. L'illustration correspondante est montrée à la Figure (II.8). Le dispositif récepteur s'aligne de façon adaptative avec l'émetteur chaotique, permettant ainsi la récupération du signal d'information via une règle d'adaptation. On peut considérer cette méthode comme un problème d'évaluation des états du système et des paramètres non identifiés. Le système récepteur est conçu en utilisant un estimateur d'états (observateur) pour le système émetteur [15,19,20].

Dans le contexte du système émetteur, la variation d'un (ou plusieurs) paramètre(s) entraîne un changement constant de l'attracteur sur la trajectoire. De ce fait, le signal émis devient plus complexe qu'un signal chaotique « normal ». Toutefois, la manière d'incorporer le message et donc le rôle de moduler les paramètres ne doivent pas éliminer l'aspect chaotique du signal transmis au destinataire. Cette méthode de chiffrement est vulnérable à quelques types d'attaques [15,19,20].

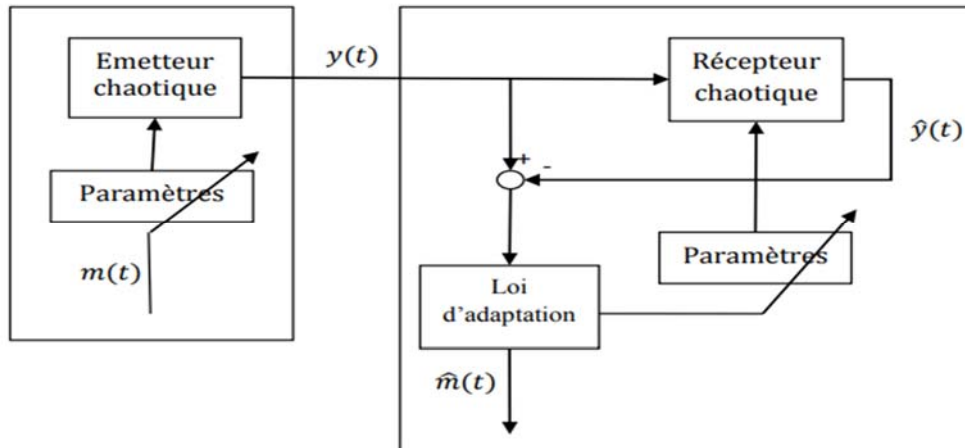


Figure II-8. Principe du chiffrement chaotique par modulation [15,19,20].

d. Cryptage par inclusion

Cette méthode de chiffrement implique l'injection du signal d'information dans la dynamique de l'émetteur chaotique. Le diagramme illustrant cette méthode est visible à la Figure (II-9). L'objectif du récepteur est de se synchroniser avec l'émetteur et d'obtenir le signal d'information. L'observateur de réception (esclave) peut être élaboré comme un récepteur d'entrées non connues [15,20].

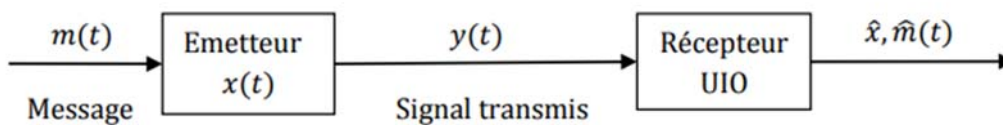


Figure II-9. Principe du chiffrement chaotique par inclusion [15,20].

Cette méthode est applicable pour encoder et transmettre des messages binaires ou analogiques. Toutefois, l'amplitude du signal porteur doit surpasser celle du message afin de ne pas perturber le comportement chaotique du système d'émission, tout en assurant également la synchronisation au niveau du récepteur. Cette méthode offre un haut niveau de sécurité par rapport aux méthodes antérieures, étant donné que le signal d'information est dissimulé dans la dynamique du système émetteur. De plus, le signal chaotique accessible via le canal public ne transporte pas l'information de manière directe, contrairement à ce qu'il en est avec la technique de masquage chaotique [15,20].

II.4.6 Les avantages de la sécurité optique basée sur le chaos

Les systèmes de communication optique basés sur le chaos offrent un niveau de sécurité particulièrement élevé, tout en assurant une rapidité remarquable dans le chiffrement des flux, ainsi qu'une grande flexibilité et modularité. Leur conception repose sur des calculs à précision limitée, ce qui facilite leur mise en œuvre. De plus, ils présentent une excellente résistance aux interférences

électromagnétiques, garantissant une fiabilité optimale dans la collecte et la transmission des données, même dans des environnements contraignants [21,22]. Grâce à la gestion en temps réel des informations et à l'augmentation du volume de données transmises via le multiplexage en longueurs d'onde, ces systèmes sont particulièrement adaptés aux applications à haut débit. Un atout majeur réside dans l'utilisation du chaos comme clé de chiffrement, dont les caractéristiques peuvent être finement ajustées à l'aide du diagramme de bifurcation, permettant ainsi des vitesses de transmission compatibles avec les réseaux à fibre optique. En outre, cette méthode est universelle, car elle peut être appliquée aussi bien à des signaux analogiques que numériques, renforçant ainsi sa polyvalence [23].

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les systèmes DWDM et MIMO, deux technologies clés permettant d'augmenter la capacité, la fiabilité et les performances des communications optiques. Nous avons également exploré différentes techniques de cryptage chaotique, qui visent à sécuriser efficacement les transmissions en tirant parti des propriétés complexes des systèmes chaotiques. Ces approches offrent une sécurité renforcée tout en restant compatibles avec les systèmes optiques à haut débit. Ce chapitre établit ainsi les bases nécessaires à la conception d'un système de communication sécurisé basé sur le chaos, lequel sera développé dans le chapitre suivant à travers une conception et une simulation détaillée.

Références bibliographiques du chapitre II

- [1] Noun, A. Atamenia, F (2021). Étude et analyse des performances du système WDM/FSO. *Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 – Guelma*.
- [2] Elsayed, E. E., et al. (2024). Coding techniques for diversity enhancement of dense wavelength division multiplexing MIMO-FSO fault protection protocols systems over atmospheric turbulence channels. *IET Optoelectronics*, 18(1–2), 11–31.
- [3] Chouaib, B. (2014). Étude d'un système chaotique pour la sécurisation des communications optiques. *Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen*.
- [4] Antil, R., Pinki, S. B., & Beniwal, S. (2012). An overview of DWDM technology & network. *International Journal of Science, Technology and Research*, 1(11), 43–46.
- [5] Lydia, B. (2018). Simulation d'une liaison optique et étude de l'évolution des réseaux de transport d'OTA. *Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri – Tizi-ouzou*.
- [6] Kamila, Z., & Fatma, O. (2017). Réseau de transport optique DWDM. *Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri – Tizi-ouzou*.
- [7] Benarbia, K. (2017). Étude des performances d'un système de communication optique dans l'espace libre (FSO) en utilisant la technologie DWDM. *Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen*.
- [8] Badar, N., & Jha, R. K. (2017). Performance comparison of various modulation schemes over free space optical (FSO) link employing Gamma–Gamma fading model. *Optical and Quantum Electronics*, 49(1), 1–10.
- [9] Chen, X., Zhang, S., & Li, Q. (2018). A review of mutual coupling in MIMO systems. *IEEE Access*, 6, 24706–24719.
- [10] Priyadarshani, R., Bhatnagar, M. R., Bohata, J., Zvanovec, S., & Ghassemlooy, Z. (2020). Experimental and analytical investigations of an optically pre-amplified FSO-MIMO system with repetition coding over non-identically distributed correlated channels. *IEEE Access*, 8, 12188–12203.
- [11] El-Mashade, M. B., Aly, M. H., & Toeima, A. H. (2015). Performance evaluation of FSO system with MIMO technique in different operating environments. *Physical Science International Journal*, 7(1), 33–48.
- [12] Sibille, A., Oestges, C., & Zanella, A. (2010). MIMO: From theory to implementation. *Academic Press*.
- [13] Bendimerad, F., et al. MIMO et accès multiples avancés pour réseaux sans fil. *Projet National de Recherche (2011-2013), Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, CERIST*.

- [14] Ouachani, I. (2005). Performance analysis of communication systems wireless operator micro and macro diversity. *Doctoral dissertation, University of Paris XI.*
- [15] Megherbi, O. (2013). Étude et réalisation d'un système sécurisé à base de systèmes chaotiques. *Thèse de magister, Université Mouloud Mammeri – Tizi-ouzou.*
- [16] Tidjani Menacer. (2014). Synchronisation des systèmes dynamiques chaotiques à dérivées fractionnaires. *Thèse de doctorat, Université de Constantine.*
- [17] Ashwin, P. (2003). Synchronization from chaos. *Nature*, 422(6927), 384–385.
- [18] Menacer, T., & Hamri, N. (2014). Synchronisation des systèmes dynamiques chaotiques à dérivées fractionnaires. *Mémoire de magistère en mathématiques, Université Mentouri Constantine.*
- [19] Bendaoud, M., (2019). Étude et conception d'un système chaotique basé sur l'oscillateur Colpitts pour les communications sécurisées. *Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen.*
- [20] Adil, B. (2018). Sécurisation de l'information via un canal optique. *Thèse de doctorat en électronique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel.*
- [21] Korba, K. A. (2022). La sécurité des réseaux de capteurs sans fil multimédia par des systèmes chaotiques. *Thèse de doctorat, Université 08 Mai 1945, Guelma.*
- [22] Radouani, R. (2006). Dérive dans les modulateurs électro-optiques Mach-Zehnder : Analyse physique et résolution. *Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine – Metz & Supélec.*
- [23] Naima, H. S., & Adda, A. P. (2011). Sécurité analogique de l'information : sécurité du futur. *Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.*

Chapitre III

Simulation et Analyse des Résultats

III.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, nous explorerons une approche de simulation dédiée à l'analyse des systèmes de communication RoFSO sécurisés par le chaos, combinés avec les technologies MIMO et DWDM, dans le cadre des réseaux 5G. Nous évaluerons les performances du système proposé à travers des indicateurs tels que le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur de qualité (Q), en utilisant le logiciel OptiSystem. L'étude portera sur l'impact de différents paramètres, tels que l'atténuation et la distance de transmission, sur la qualité de la communication. Dans un premier temps, nous introduirons le logiciel OptiSystem ainsi que les critères d'évaluation choisis pour cette analyse. Ensuite, nous détaillerons les résultats obtenus à travers cette simulation, afin de mettre en lumière les performances du système dans divers scénarios.

III.2 Introduction au logiciel OptiSystem

OptiSystem est un logiciel avancé conçu pour la modélisation, la simulation et l'optimisation des systèmes de communication optique. Il offre un environnement convivial et puissant, permettant d'analyser les performances des réseaux optiques et des liaisons par fibre optique. Destiné aux ingénieurs, chercheurs et étudiants en télécommunications optiques, il propose une large bibliothèque de composants optiques prédéfinis, tout en permettant l'intégration d'éléments personnalisés pour une flexibilité maximale dans la conception. Grâce à ses fonctionnalités robustes, OptiSystem permet de simuler divers paramètres de transmission tels que l'atténuation, la dispersion ou le bruit, et d'évaluer les performances du système en termes de qualité de signal, débit de données et tolérance aux perturbations. L'application fonctionne sous Windows et se présente sous forme d'une interface principale divisée en plusieurs sections (voir figure III-1) [1].

- **Bibliothèque** : il s'agit d'une base de données contenant une collection diversifiée de composants existants.
- **Éditeur de layout** : pour modifier et paramétrer la disposition actuelle.

Au cours de la conception, on peut aisément déplacer un élément de la bibliothèque vers la mise en page.

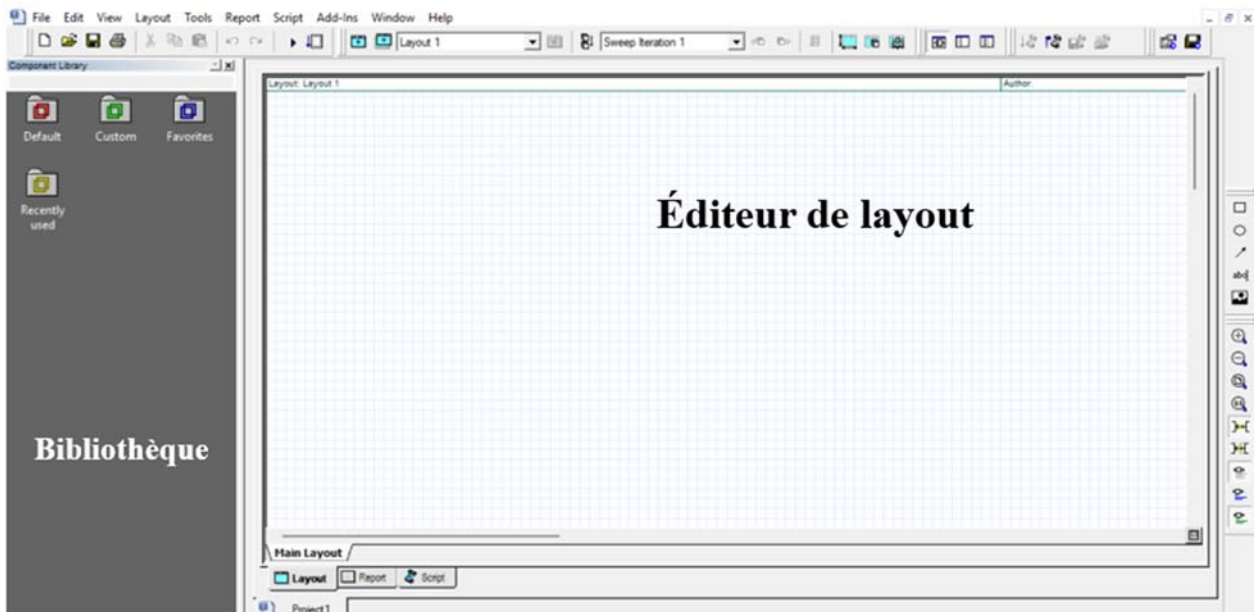


Figure III-1. Interface graphique d'OptiSystem.

III.2.1 Applications du logiciel OptiSystem

Parmi les diverses applications d'OptiSystem, les plus couramment utilisées sont les suivantes [2] :

- La conception de systèmes de communication optique, du composant à l'échelle de la couche physique ;
- L'évaluation du taux d'erreur binaire (TEB ou BER) et l'analyse du bilan de liaison ;
- La conception de réseaux TDM/WDM ainsi que de réseaux optiques passifs (PON) ;
- L'analyse de l'espace disponible pour les systèmes optiques (OSA) ;
- La conception de l'émetteur de canal et des amplificateurs ;

Voici quelques-uns des avantages offerts par le logiciel OptiSystem :

- **Modélisation réaliste** : Il permet de concevoir des modèles précis et réalistes de systèmes de communication optique.
- **Large bibliothèque de composants** : Il propose une vaste sélection de composants optiques prédéfinis.
- **Flexibilité** : Il permet l'ajout de composants personnalisés selon les besoins spécifiques du projet.
- **Environnement de simulation performant** : Il offre un environnement avancé pour simuler et analyser les performances des systèmes.
- **Réduction des coûts** : Il permet de diminuer les coûts liés aux essais matériels tout en accélérant la conception et l'optimisation des systèmes.

III.3 Critères d'évaluation des performances

III.3.1 Facteur de qualité (Q)

Le signal présenté à l'entrée d'un analyseur de diagramme de l'œil est composé d'une contribution du signal « utile » ainsi que d'une interférence de bruit émanant de tous les composants de la liaison. Dans le modèle de l'œil qui illustre le signal mesuré, les niveaux moyens μ_1 et μ_0 correspondent au signal utile. Les écarts de puissance optique par rapport à ces niveaux moyens sont illustrés par le bruit, mesuré en fusionnant les écarts-types σ_1 et σ_0 [3]. Le facteur Q est ainsi déterminé sur la base de l'observation du diagramme de l'œil selon l'équation (III-1) :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{III-1})$$

III.3.2 Taux d'erreur binaire (BER)

Le BER, ou « Taux d'erreur binaire », est un indicateur sans unité permettant d'apprécier l'efficacité d'une communication numérique. Le BER fait référence à la différence entre le nombre d'erreurs et la quantité de bits transmis pendant le processus de calcul [4].

Il est aisé de juger la performance d'une transmission numérique en mettant en parallèle les séquences de symboles émis et reçus, et en dénombrant les erreurs (nombre d'occasions où un « 0 » est perçu comme un « 1 » transmis ou l'inverse) [4].

$$BER = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (\text{III-2})$$

III.4 Système de communication MIMO-RoFSO basé sur le DWDM

III.4.1 Génération de signal optique chaotique

Ces signaux, appartenant à deux catégories de chaos pulsé et de chaos non pulsé, sont générés pour renforcer la sécurité du transfert d'informations. Des valeurs plus élevées de l'exposant de Lyapunov, qui signalent un degré plus élevé de chaos et d'instabilité et génèrent une onde plus complexe et chaotique, privilégient le chaos pulsé comme choix préféré.

Il est envisageable de générer un chaos pulsé avec des caractéristiques supérieures à celles des lasers à anneau dopés par l'erbium, tels qu'une large bande passante, une dispersion accrue et une non-linéarité. L'objectif du chaos optique pulsé par la modulation directe d'un laser semi-conducteur est qu'il suit les équations de taux du laser qui simulent l'interaction entre la densité des porteurs, la densité des photons et la modulation de phase.

La dynamique de modulation du laser est modélisée par des équations de taux couplées qui décrivent la relation entre la densité de porteurs $N(t)$, la densité de photons $S(t)$ et la phase optique $\phi(t)$ [5].

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{q \cdot V} - \frac{N(t)}{\tau_n} - v_g \cdot \sigma_g \cdot (N(t) - N_t) \cdot \frac{1}{(1 + \varepsilon \cdot S(t))} \cdot S(t) \quad (\text{III-3})$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \Gamma \cdot v_g \cdot \sigma_g \cdot (N(t) - N_t) \cdot \frac{1}{(1 + \varepsilon \cdot S(t))} \cdot S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + \frac{\Gamma \cdot \beta \cdot N(t)}{\tau_n} \quad (\text{III-4})$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \left[\Gamma \cdot v_g \cdot \sigma_g \cdot (N(t) - N_t) \cdot \frac{1}{\tau_p} \right] \quad (\text{III-5})$$

Le courant interne $I(t)$ est donné par :

$$I(t) = I_{DC} + I_{in}(t) \times I_{pk} \quad (\text{III-6})$$

Où :

$I_{in}(t)$: Le courant du signal d'entrée.

I_{DC} : Courant de polarisation.

I_{pk} : Le paramètre Modulation courant de crête.

Les principaux paramètres physiques clés du laser à semi-conducteurs chaos sont détaillés dans le tableau (III-1).

Paramètre Physique	Valeur
Volume de la couche active (V)	$1.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3$
Vitesse de groupe (v_g)	$8.5 \times 10^9 \text{ cm/s}$
Facteur de confinement modal (Γ)	0.4
Temps de vie des électrons (τ_n)	10^{-9} s
Temps de vie des photons (τ_p)	$3 \times 10^{-12} \text{ s}$
Facteur d'émission spontanée (β)	3×10^{-5}
Facteur de compression du gain (ε)	$5 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$
Facteur d'élargissement de la raie (α)	5
Coefficient de couche active	$1.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3$

Tableau III-1. Paramètres physiques clés du laser à semi-conducteurs Chaos.

III.4.2 Conception d'un système MIMO-RoFSO sécurisé par chaos optique basé sur DWDM

L'objectif de cette section est d'analyser l'intégration du chaos optique afin de sécuriser les systèmes MIMO-RoFSO basés sur la technologie DWDM, dans le cadre des applications 5G. L'architecture proposée (voir figure III-2) débute par la génération d'un signal numérique à l'aide d'un générateur de séquence binaire pseudo-aléatoire (PRBS), produisant une suite de bits du type 010 ; représentant les données à transmettre à un débit de 10 Gbit/s. Ce signal est ensuite converti en signal électrique à l'aide d'un générateur d'impulsions NRZ (Non-Return-to-Zero), assurant un niveau constant par bit : haut pour 1, bas pour 0. Ce signal électrique est utilisé pour moduler une porteuse MMW-RF à 60 GHz via un modulateur d'amplitude électrique (AM). En parallèle, un laser à onde continue (CW laser) émet une lumière infrarouge à 1550 nm, avec une puissance de 10 dBm, servant de porteuse optique. Ce faisceau est modulé en intensité à l'aide d'un modulateur de Mach-Zehnder (MZ modulator), piloté par le signal MMW-RF modulé, permettant d'inscrire les données numériques sur le signal optique. Ce faisceau est modulé en intensité à l'aide d'un modulateur de Mach-Zehnder (MZ modulator), piloté par le signal MMW-RF modulé, permettant d'inscrire les données numériques sur le signal optique.

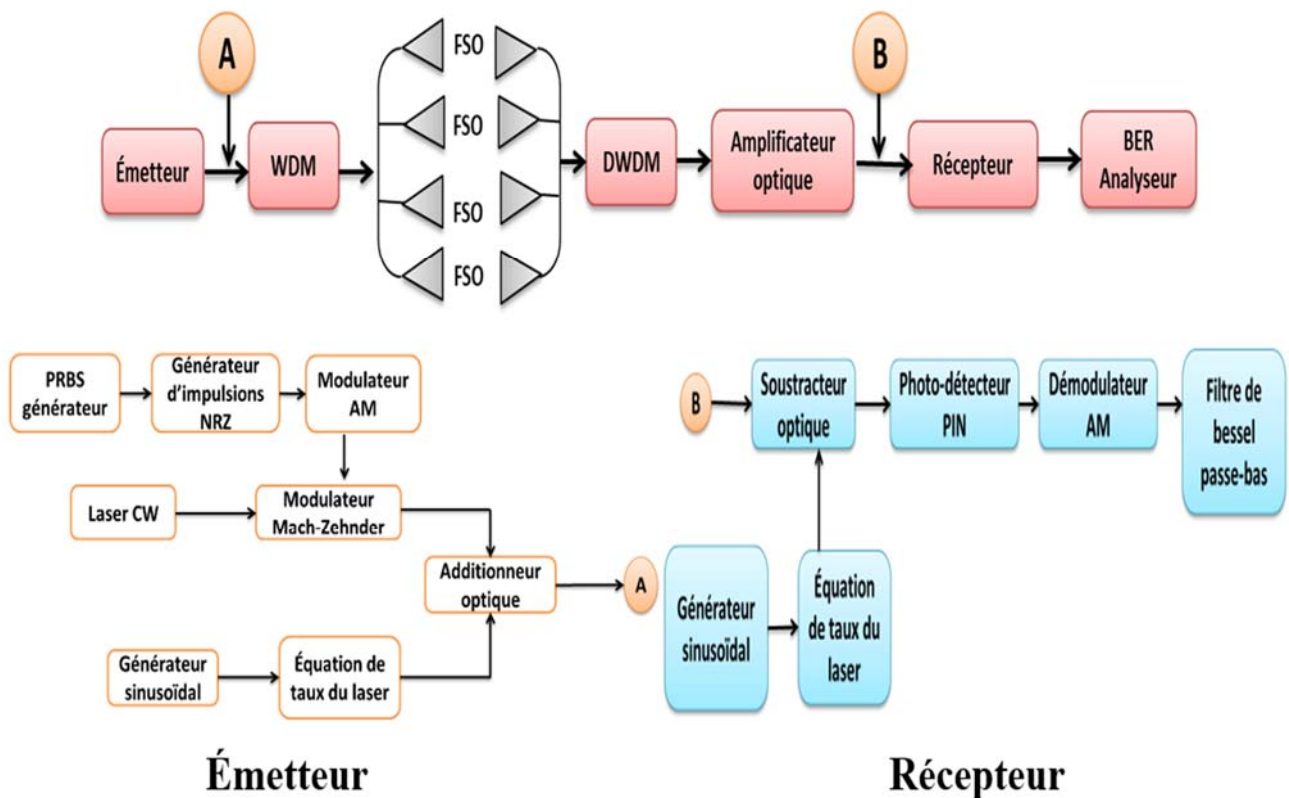


Figure III-2. Architecture d'un système MIMO-RoFSO sécurisé par chaos optique basé sur DWDM.

Un signal optique chaotique est généré en modulant directement une onde sinusoïdale de 32GHz dans le laser. Ce signal chaotique est ensuite combiné avec le signal optique modulé à l'aide d'un additionneur optique (OA), afin de sécuriser la transmission. Pour augmenter le débit, quatre signaux

sont transmis sur quatre longueurs d'onde différentes. Un multiplexeur WDM 4×1 est utilisé pour combiner ces quatre canaux avant leur transmission sur une liaison MIMO-FSO.

Au niveau du récepteur, les canaux sont d'abord séparés à l'aide d'un démultiplexeur WDM 1×4 (DEMUX). Pour chaque canal, le signal chaotique est ensuite supprimé à l'aide d'un soustracteur optique (OS), permettant d'extraire le signal utile. Chaque canal est ensuite traité par un circuit de détection optique, composé notamment d'une photodiode PIN, chargée de convertir le signal optique en signal électrique. Un démodulateur AM permet ensuite de récupérer le signal en bande de base à partir du signal MMW-RF modulé. Ce dernier subit un traitement supplémentaire via un filtre passe-bas de Bessel (LPF), dont le rôle est d'éliminer les composantes fréquentielles indésirables et le bruit haute fréquence introduits lors de la modulation, de la transmission et de la détection. Enfin, la performance du système est évaluée par un analyseur de BER. Les principaux paramètres de conception sont détaillés dans le tableau (III-1) [6,7,8].

La figure (III-3) présente deux analyses du spectre RF de signaux transmis. La figure (III-3(a)) illustre le spectre du signal original, avant toute modulation ou conversion de fréquence. On y observe une série de pics régulièrement espacés, dont l'espacement et l'amplitude relative donnent des informations sur les caractéristiques du signal, notamment sa fréquence fondamentale et ses harmoniques. L'amplitude de ces pics diminue progressivement à mesure que la fréquence augmente. La figure (III-3(b)) montre le spectre du signal après sa conversion en ondes millimétriques, centré autour de 60 GHz. On y retrouve un motif similaire à celui du signal original, mais décalé en fréquence, ce qui indique que le signal a été modulé ou transposé vers une fréquence porteuse. On remarque également que l'amplitude des pics est modifiée par le processus de modulation ou de conversion.

La figure (III-3) illustre l'effet d'une conversion de fréquence d'un signal en bande de base vers une fréquence porteuse en ondes millimétriques. Le signal conserve sa structure spectrale de base (pics espacés régulièrement), mais est décalé en fréquence et son amplitude est modifiée.

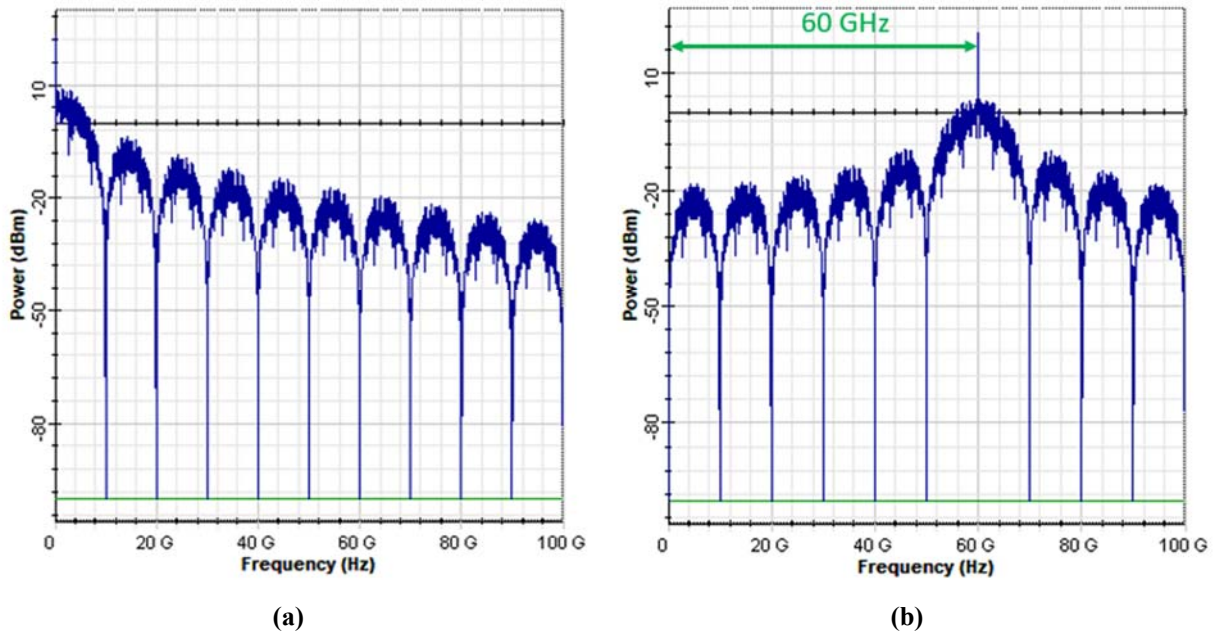


Figure III-3. Analyseur de spectre RF des signaux transmis : **(a)** signal en bande de base et **(b)** signal en ondes millimétriques.

La figure (III-4) illustre l'évolution temporelle d'un signal dans un système de communication sécurisé basé sur la modulation chaotique, en détaillant les principales étapes du processus de transmission. Dans la figure (III-4(a)), on observe le signal de message d'entrée, un flux binaire présentant des niveaux logiques nets, typiques d'une transmission numérique classique. Ce signal, encore non sécurisé, est vulnérable à toute tentative d'interception. La figure (III-4(b)) montre ensuite le signal chaotique généré par un générateur de chaos optique. Ce signal, caractérisé par un comportement aléatoire et complexe, sert à masquer le message original. Ses propriétés dynamiques et non linéaires rendent sa reproduction impossible sans une connaissance exacte des paramètres du générateur. Enfin, la figure (III-4(c)) présente le signal sécurisé transmis, résultant de la combinaison du message initial avec le signal chaotique. Ce signal transformé adopte une forme désordonnée, rendant son contenu indéchiffrable pour un observateur non autorisé. Seul un récepteur synchronisé avec le même générateur chaotique peut reconstruire le message d'origine. Ainsi, cette figure met en évidence l'efficacité de la modulation chaotique pour assurer la confidentialité des transmissions optiques en dissimulant le signal utile dans une onde complexe et imprévisible.

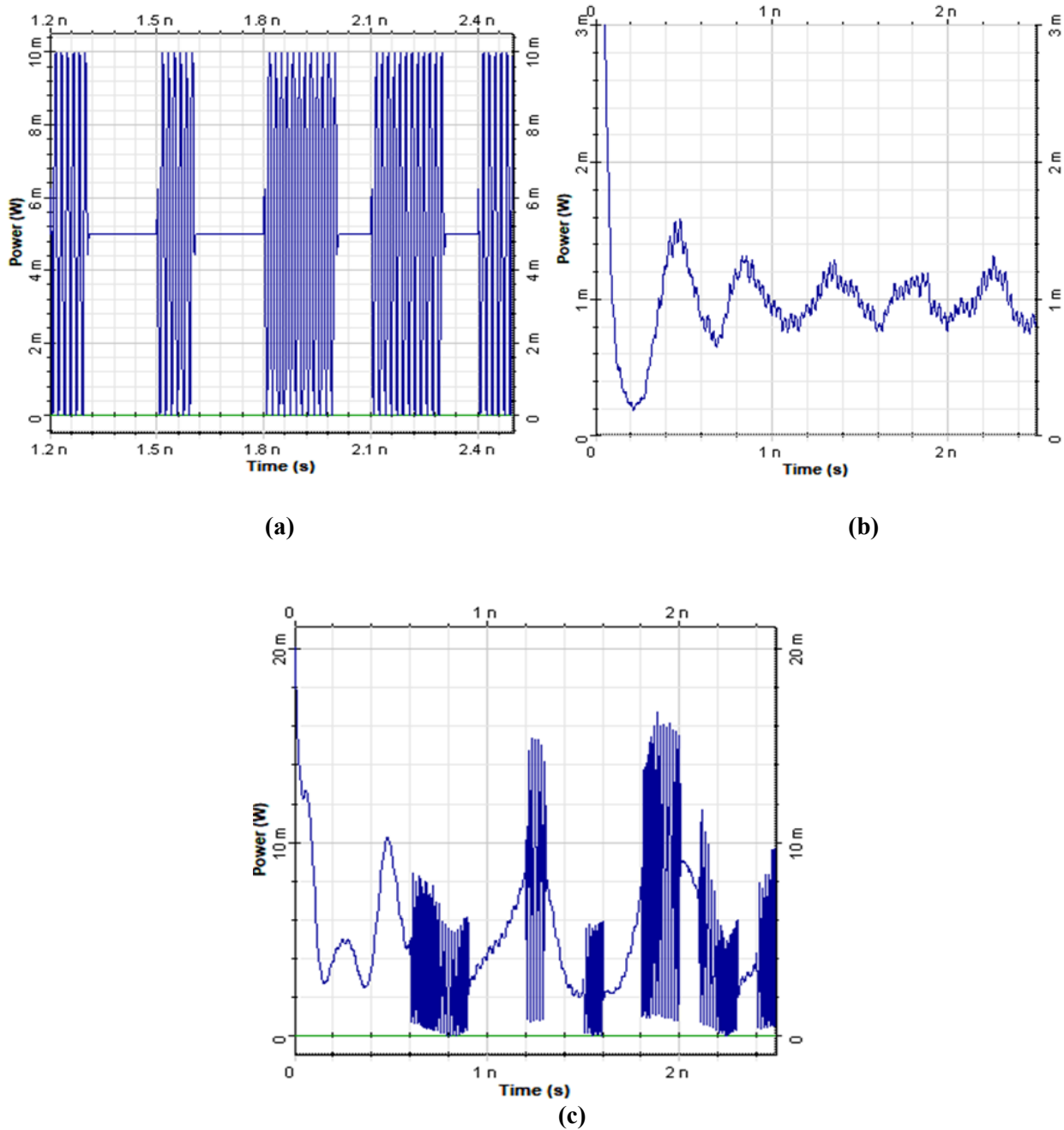


Figure III-4. Forme d'onde du signal dans le domaine temporel avant et après la transmission basée sur le chaos : (a) le signal de message d'origine ; (b) le signal chaotique produit par le sous-système de chaos optique ; (c) le signal transmis de manière sécurisée.

III.5 Résultats de simulation

Les figures (III-5), (III-6) et (III-7) présentent une analyse comparative des performances de différents canaux FSO dans des configurations 4×4 MIMO, 2×2 MIMO et SISO, en fonction de la distance et sous diverses conditions environnementales. Les figures (III-5(a)), (III-6(a)) et (III-7(a)) illustrent l'évolution du taux d'erreur binaire (BER) en fonction de la distance, avec trois courbes

représentant les canaux FSO en configuration 4×4 (en vert), 2×2 (en noir) et SISO (en bleu). Une ligne pointillée rouge indique le seuil de BER acceptable, fixé à 10^{-9} .

De même, les figures (III-5(b)), (III-6(b)) et (III-7(b)) montrent la variation du facteur de qualité (Q) en fonction de la distance pour ces mêmes configurations. Une ligne pointillée rouge marque le seuil minimal acceptable de Q, fixé à 6.

Ces figures permettent d'observer l'impact de l'ordre de MIMO sur les performances du système RoFSO dans différentes conditions environnementales, telles que la pluie légère, la pluie modérée et la brume légère. En règle générale, il est constaté qu'une augmentation de la distance entraîne une dégradation des performances, se traduisant par une élévation du BER et une réduction du facteur Q, quel que soit le type de configuration utilisé.

III.5.1 L'impact des conditions météorologiques sur le système MIMO-RoFSO

Cette section analyse l'impact des conditions météorologiques sur les performances d'un système MIMO-RoFSO, en particulier dans les configurations SISO, 2×2 MIMO et 4×4 MIMO. L'objectif est d'évaluer la robustesse du système face aux principaux phénomènes atmosphériques atténuateurs, à savoir la pluie légère, la pluie modérée et la brume légère.

a. Pluie légère

La figure (III-5), correspondant à une atténuation due à une pluie légère (2,97 dB/km), met en évidence les performances des trois configurations de canaux FSO analysées. Le canal 4×4 MIMO-FSO se distingue par un BER minimal sur l'ensemble des distances évaluées, avec une portée maximale atteignant 3.3 km, où le facteur Q atteint également son niveau le plus élevé. La configuration 2×2 MIMO-FSO présente des performances intermédiaires, avec un BER modéré et un facteur Q satisfaisant jusqu'à une distance maximale de 3 km. En revanche, la configuration SISO-FSO affiche les performances les plus limitées, avec un BER atteignant le seuil critique de 10^{-9} et un facteur Q de 6 à une distance maximale de 2.7 km, ce qui indique une dégradation significative de la qualité du signal.

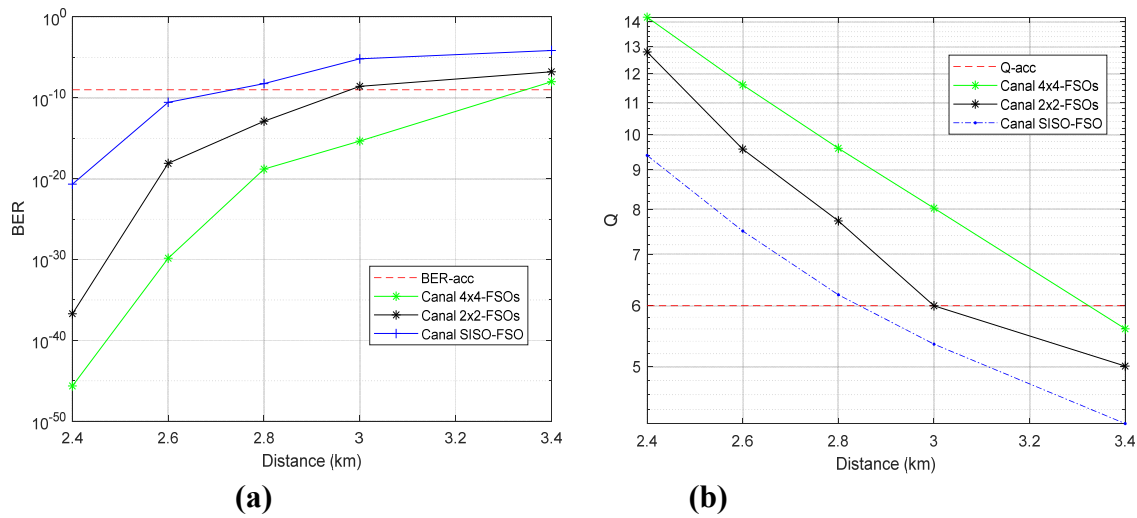


Figure III-5. (a) BER et (b) facteur Q en fonction de la distance dans des conditions de pluie légère pour trois scénarios : SISO-FSO, 2x2-FSO et 4x4-FSO

Ces résultats démontrent clairement que l’augmentation du nombre d’émetteurs et de récepteurs dans une architecture MIMO améliore notablement la robustesse du système, en réduisant les erreurs de transmission et en optimisant la qualité du signal ($Q_{4 \times 4 \text{ MIMO}} > Q_{2 \times 2 \text{ MIMO}} > Q_{\text{SISO}}$).

b. Pluie modérée

La figure (III-6) illustre les performances des trois configurations de canaux FSO (SISO, 2x2 MIMO et 4x4 MIMO) sous une atténuation sévère de pluie modérée (6,55 dB/km), représentative de conditions atmosphériques fortement dégradées (comme un brouillard dense ou une pluie intense). La figure (III-6(a)) montre l’évolution du BER en fonction de la distance, tandis que la figure (III-6(b)) présente la variation du facteur Q.

Le canal 4x4 MIMO-FSO conserve les meilleures performances parmi les trois configurations, maintenant un BER très faible jusqu’à une distance de 2,2 km, où il reste proche du seuil acceptable de 10^{-9} . Son facteur Q reste également supérieur à celui des autres configurations jusqu’à cette même distance, bien qu’il chute légèrement en dessous du seuil acceptable ($Q = 6$) à 2,2 km, marquant la limite de ses performances optimales dans ces conditions. La configuration 2x2 MIMO-FSO présente des résultats intermédiaires, avec un BER et un facteur Q acceptables jusqu’à environ 2,1 km, où le facteur Q tombe à la limite acceptable, signalant une baisse notable de la qualité de transmission à partir de cette distance. Le canal SISO-FSO affiche les performances les plus faibles : le BER dépasse le seuil critique de 10^{-9} bien avant 2 km, et le facteur Q passe sous la valeur minimale acceptable ($Q = 6$) dès environ 1,9 km, mettant en évidence sa forte sensibilité à l’atténuation élevée.

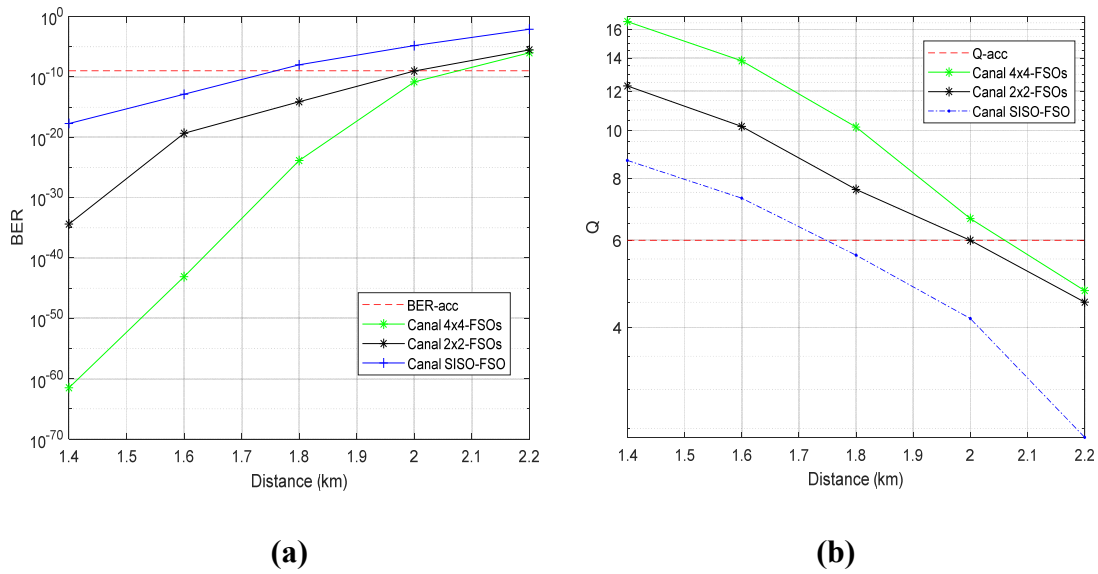


Figure III-6. (a) BER et (b) facteur Q en fonction de la distance dans des conditions de pluie modérée pour trois scénarios : SISO-FSO, 2x2-FSO et 4x4-FSO.

c. Brume légère

La figure (III-7) illustre les performances des trois configurations de canaux FSO (SISO, 2x2 MIMO et 4x4 MIMO) dans un scénario d'atténuation très élevée, correspondant à une brume légère (12,47 dB/km). Dans ce contexte sévèrement dégradé, le canal 4x4 MIMO demeure la configuration la plus performante, affichant un BER très faible jusqu'à une distance de 1,4 km, tout en maintenant un facteur Q au-dessus de la valeur critique ($Q > 6$) sur la majorité des distances représentées. Cela démontre sa capacité à préserver une bonne qualité de transmission malgré l'atténuation importante.

Le canal 2x2 MIMO présente des performances intermédiaires. Il atteint la limite du BER acceptable (10^{-9}) et du facteur Q acceptable ($Q = 6$) vers une distance de 1,35 km, ce qui indique qu'il reste fonctionnel sur une distance légèrement inférieure à celle du 4x4 MIMO, bien qu'il subisse une dégradation progressive du signal.

Quant au canal SISO-FSO, il révèle rapidement ses limites dans de telles conditions. Son BER dépasse le seuil critique avant 1,25 km, et son facteur Q passe en dessous de la limite acceptable bien avant cette distance, indiquant une dégradation significative et précoce de la qualité du canal.

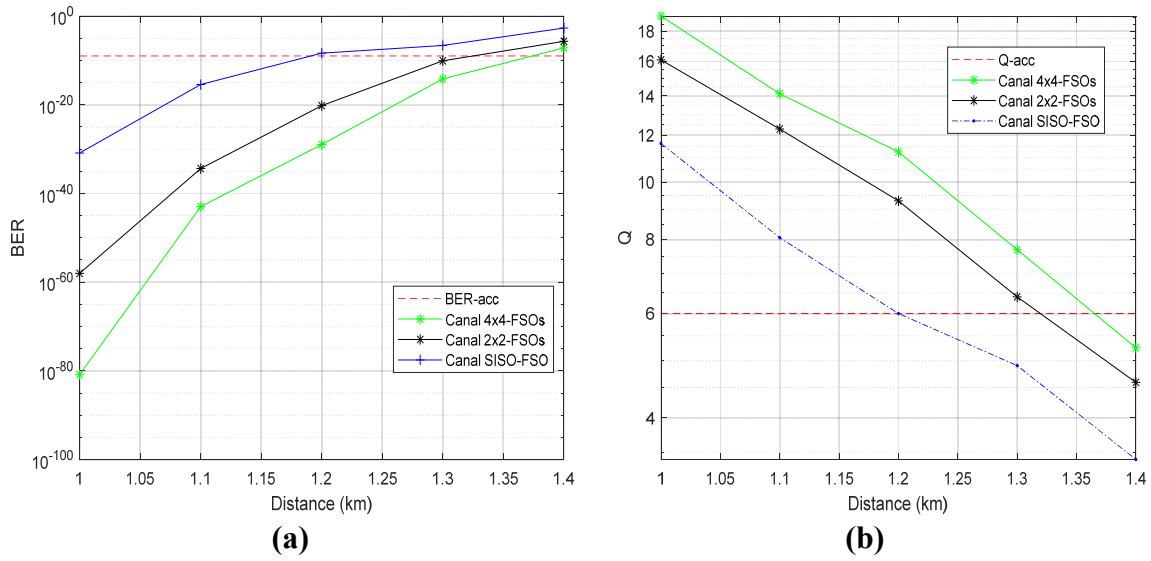


Figure III-7. (a) BER et (b) facteur Q en fonction de la distance dans des conditions de brume légère pour trois scénarios : SISO-FSO, 2×2-FSO et 4×4-FSO.

III.5.2 Effet des conditions atmosphériques sur le système sécurisé 4×4 MIMO-RoFSO basé sur DWDM

Dans cette section, nous examinons l’impact des conditions atmosphériques sur les performances d’un système sécurisé RoFSO en configuration 4×4-MIMO intégrant la technologie DWDM. Ce système combine la robustesse de la transmission multi-antennes avec la capacité accrue du multiplexage en longueur d’onde, tout en intégrant une couche de sécurisation physique via le chaos optique.

a. Pluie légère

La figure (III-8) illustre les performances d’un système 4×4 MIMO-RoFSO basé sur DWDM, utilisant quatre canaux répartis entre 193.1 THz et 193.4 THz avec un espacement de 100 GHz. Les résultats sont obtenus sous une atténuation atmosphérique modérée due à une pluie légère (2.97 dB/km), et sont exprimés en fonction de la distance de transmission, à travers les métriques du BER (Figure III-8(a)) et du facteur de qualité Q (Figure III-8(b)).

L’analyse montre que, pour tous les canaux, le BER augmente de manière exponentielle avec la distance, tandis que le facteur Q diminue. Le canal 1 (193,1 THz) offre les meilleures performances, avec les valeurs de BER les plus faibles et les valeurs de Q les plus élevées sur l’ensemble des distances testées. À 1.4 km, 1.8 km et 2.2 km, les BER sont respectivement de 9×10^{-18} , 6×10^{-15} et 9×10^{-12} , avec des facteurs Q de 6.5, 6.2 et 5.8.

En revanche, le canal 4 (193.4 THz) montre les performances les plus faibles. Pour les mêmes distances (1.4 km, 1.8 km, 2.2 km), les valeurs de BER atteignent respectivement 9×10^{-14} , 10^{-11} et 5×10^{-8} , tandis que les facteurs Q associés sont de 8.4, 7.4 et 6.6.

Les canaux 2 (193.2 THz) et 3 (193.3 THz) présentent des performances intermédiaires. Pour des distances de 1.2 km, 1.4 km et 2.2 km, le canal 2 enregistre des BER de 6×10^{-17} , 6×10^{-14} et 10^{-10} , avec des facteurs Q de 7.9, 6.9 et 6.4. Quant au canal 3, les BER sont de 3×10^{-16} , 6×10^{-14} et 5×10^{-8} , avec des facteurs Q de 7.5, 6.5 et 6.1.

Ces résultats confirment que la fréquence joue un rôle important dans les performances du système DWDM-FSO, même sous des conditions atmosphériques modérément dégradées.

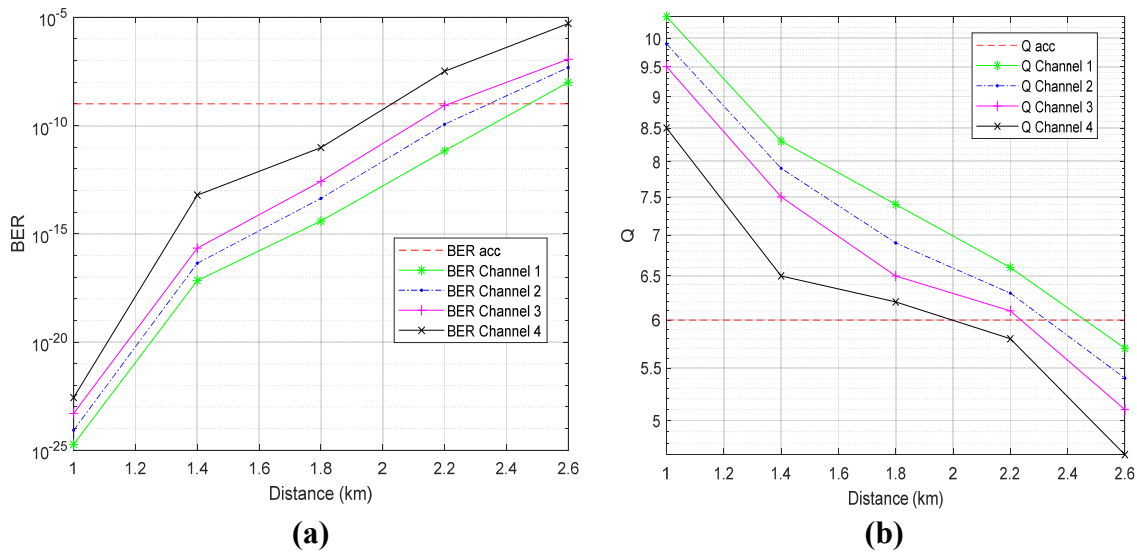


Figure III-8. (a) BER et (b) facteur Q en fonction de la distance pour la légère pluie.

b. Pluie modérée

Figure (III-9) montre les performances d'un système 4x4 MIMO-RoFSO basé sur DWDM sous une atténuation plus importante correspondant à une pluie modérée (6.55 dB/km) en termes de BER (Figure III-9 (a)) et de Q facteur (Figure III-9 (b)) en fonction de la distance de transmission.

Pour tous les canaux, le BER se dégrade beaucoup plus rapidement avec la distance comparée au cas d'atténuation de 2.97 dB/km et le facteur Q diminue beaucoup plus rapidement avec la distance que dans le cas précédent.

Le canal 1 (193.1 THz) affiche les meilleures performances, avec le BER le plus faible et le facteur Q le plus élevé. Pour les distances de 1.4 km, 1.8 km et 2.2 km, les valeurs de BER sont respectivement de 10^{-8} , 8×10^{-6} et 6×10^{-5} , avec des facteurs Q correspondants de 5.7, 4.3 et 3.95.

À l'inverse, le canal 4 (193.4 THz) présente les performances les plus faibles. Pour les mêmes distances, les BER sont respectivement de 7×10^{-6} , 3×10^{-4} et 6×10^{-3} , et les facteurs Q sont de 4.4, 3.35 et 3.1.

Les canaux 2 (193.2 THz) et 3 (193.3 THz) offrent des performances intermédiaires. Pour les distances de 1.2 km, 1.4 km et 2.2 km, le canal 2 présente des BER de 7×10^{-8} , 4×10^{-5} et 10^{-4} , avec des facteurs Q de 5.4, 3.95 et 3.8. Quant au canal 3, les BER sont de 10^{-7} , 8×10^{-5} et 9×10^{-4} , et les facteurs Q de 5.1, 3.7 et 3.4.

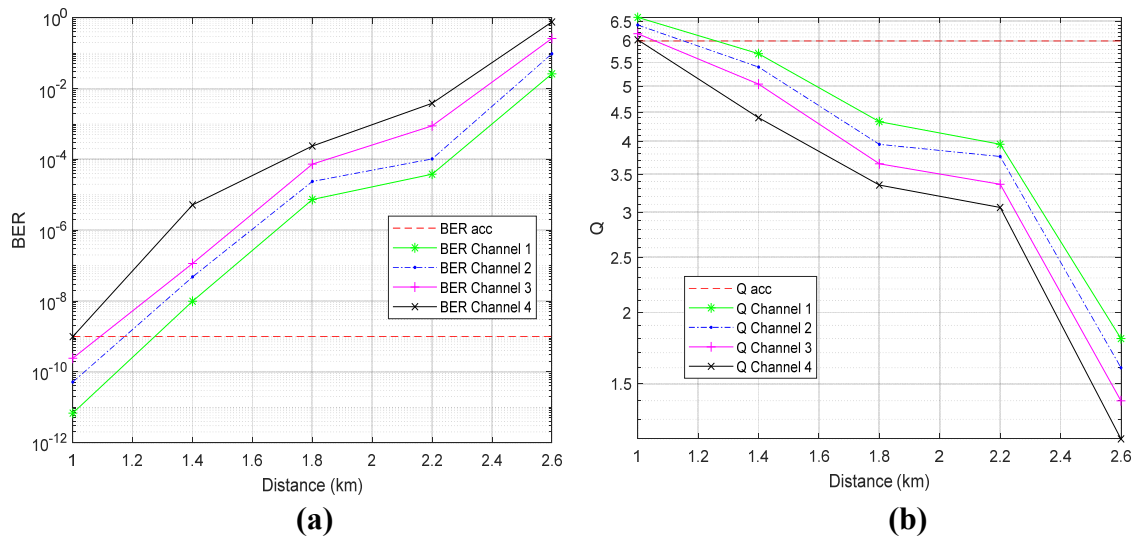


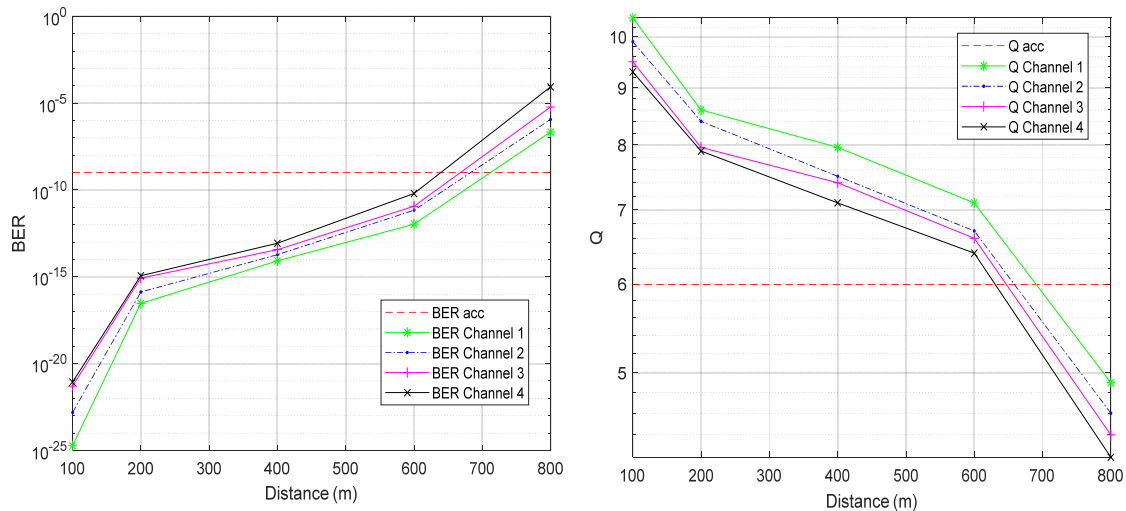
Figure III-9. (a) BER et (b) facteur Q en fonction de la distance pour la pluie modérée.

c. Brume légère

La figure (III-10) présente les performances d'un système 4x4 MIMO-RoFSO basé sur DWDM soumis à une atténuation significative due à une brume légère, estimée à 12.47 dB/km. Les résultats sont exprimés en termes de BER (Figure III-10 (a)) et de facteur Q (Figure III-10 (b)), en fonction de la distance de transmission.

Dans tous les cas, on observe une dégradation rapide du BER avec l'augmentation de la distance, accompagnée d'une diminution prononcée du facteur Q .

Pour les quatre canaux, la distance maximale correspondant à un BER de 10^{-9} et à un facteur de qualité Q égal à 6 diminue progressivement. Elle atteint respectivement 0,69 km pour le canal 1 (193,1 THz), 0,66 km pour le canal 2 (193,2 THz), 0,63 km pour le canal 3 (193,3 THz) et 0,62 km pour le canal 4 (193,4 THz). Ces résultats mettent en évidence l'impact significatif de la brume sur la dégradation des performances du système DWDM-RoFSO, tout en confirmant la supériorité du canal 1 dans des conditions atmosphériques sévères.



(a) (b)
Figure III-10. (a) BER et (b) facteur Q en fonction de la distance pour la brume légère.

III.6 Conclusion

Ce chapitre a permis d’analyser les performances du système RoFSO en adoptant trois configurations de canaux FSO : SISO, 2×2 MIMO et 4×4 MIMO, dans diverses conditions atmosphériques, notamment en présence de pluie légère, de pluie modérée et de brume légère. Dans un second temps, l’étude s’est concentrée sur l’évaluation du système RoFSO en configuration 4×4 MIMO, intégrant la technologie DWDM avec quatre canaux optiques, toujours soumise à différentes conditions d’atténuation.

Les résultats obtenus, en termes de taux d’erreur binaire (BER) et de facteur Q, ont clairement démontré que l’augmentation de l’atténuation atmosphérique entraîne une dégradation significative des performances du système, se traduisant par une réduction de la distance de transmission maximale et une élévation du BER. Parmi les longueurs d’onde analysées, le canal 1 (193.1 THz) s’est systématiquement distingué par les meilleures performances, affichant les valeurs de BER les plus faibles et les facteurs Q les plus élevés, quelles que soient les conditions climatiques. À l’inverse, le canal 4 (193.4 THz) a constamment présenté les performances les plus faibles, en particulier sous des niveaux d’atténuation élevés.

Références bibliographiques du chapitre III

- [1] Bedoui, M. A., & Omar, H. (2019). Régénération tout-optique par similarité du signal OTDM à très haut débit. *Mémoire master, Université 8Mai 1945 – Guelma*.
- [2] Bouzid, C., & Nouari, A. Étude de l'influence de l'atténuation et la dispersion sur la transmission à fibres optiques. *Mémoire master, Université KASDI Merbah – Ouargla*.
- [3] Hayashi, S., & Kawase, K. (2010). Terahertz-wave parametric sources. In *Recent Optical and Photonic Technologies*. <https://doi.org/10.5772/8348>.
- [4] Nabli, W. N. E., & Hallaci. A. (2024). Étude et évaluation des performances d'un système de communication par lumière visible dans les applications indoor. *Mémoire master, Université 8Mai 1945 – Guelma*.
- [5] Al-Khaffaf, D. A. J. (2023). Integrated photonic secured reliable DWDM for 5G Xhaul at Ka band frequency. *Results in Optics, 13*, 100558.
- [6] Derouiche, S., Kameche, S. & Adardour, H.E. Design and simulation of a secure MIMO-RoFSO communication system at 60 GHz relying on a chaotic optical signal. *J Opt (2025)*. <https://doi.org/10.1007/s12596-025-02707-6>
- [7] Fadil, E. A., Abass, A. K., & Tahhan, S. R. (2023). Design and simulation of optical chaotic-based secure hybrid optical communication system. *Journal of Optics, 52(4)*, 1887-1896.
- [8] Cartledge, J. C., & Burley, G. S. (1989). The effect of laser chirping on lightwave system performance. *Journal of lightwave technology, 7(3)*, 568-573.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Ce travail a porté sur la conception et la simulation d'un système de communication optique sans fil de type RoFSO (Radio over Free Space Optics), basé sur les ondes millimétriques (MMW), dans le contexte des réseaux 5G. L'objectif principal était d'évaluer la faisabilité, les performances et les limites de cette technologie en y intégrant des techniques avancées telles que le MIMO, le multiplexage en longueur d'onde (DWDM) et la sécurisation par chaos optique.

Les résultats obtenus ont confirmé que la solution RoFSO constitue une alternative performante et prometteuse à la fibre optique, notamment dans les environnements urbains denses ou les zones où le déploiement de l'infrastructure filaire est difficile ou onéreux. Grâce à sa large bande passante, sa faible latence et sa rapidité de déploiement, le système proposé répond efficacement aux exigences des applications critiques telles que l'Internet des objets (IoT), la télémédecine ou encore les villes intelligentes.

Toutefois, la sensibilité du canal FSO aux conditions atmosphériques (pluie, brouillard, turbulence) demeure un défi majeur. L'intégration de technologies comme le MIMO a permis de renforcer la robustesse et la portée du lien, tandis que le DWDM a accru la capacité du système en permettant la transmission simultanée de plusieurs canaux optiques. Par ailleurs, l'application du chaos optique a introduit une couche de sécurité physique supplémentaire, essentielle dans le cadre des communications de nouvelle génération.

Les simulations réalisées avec le logiciel OptiSystem ont permis de quantifier l'impact de divers paramètres (portée, atténuation, configurations MIMO) sur la qualité du lien, notamment en termes de taux d'erreur binaire (BER) et de facteur Q. Ces simulations ont démontré que, lorsqu'il est correctement configuré et protégé, le système RoFSO-MMW peut maintenir des performances élevées même dans des conditions environnementales défavorables.

En conclusion, ce travail met en évidence que le système RoFSO, renforcé par les technologies MIMO et DWDM, et sécurisé par le chaos optique, constitue une solution viable, efficace et sécurisée pour les réseaux 5G, répondant pleinement aux exigences actuelles en matière de connectivité, de performance et de sécurité.

Perspectives

Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour approfondir ce travail :

- **Amélioration de la résilience atmosphérique** : Étudier l'utilisation de techniques d'adaptation dynamique (modulation adaptative, beam steering, redondance spatiale) pour compenser les effets des turbulences et conditions météorologiques extrêmes.
- **Intégration avec l'intelligence artificielle** : Employer des algorithmes d'IA ou de machine learning pour l'optimisation automatique des paramètres du lien (puissance, alignement, longueur d'onde) en fonction des conditions en temps réel.
- **Expérimentation en conditions réelles** : Réaliser des tests expérimentaux en extérieur afin de valider les résultats de simulation et d'évaluer le comportement du système dans des environnements variés.
- **Interopérabilité avec les technologies 6G** : Étendre les recherches pour anticiper l'intégration de RoFSO dans les futurs réseaux 6G, avec des débits encore plus élevés, des architectures distribuées et une ultra-fiabilité.

Ces perspectives ouvrent la voie à une amélioration continue du système RoFSO, en phase avec l'évolution rapide des besoins en communication sans fil à haut débit, sécurisée et à faible latence.