

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Télécommunications

Spécialité : Signaux et Systèmes de Télécommunications

Par :

DEROUICHE Samra

Sujet

Étude et conception d'un système hybride pour les réseaux 5G

Soutenue publiquement, le **13 / 07 /2025**, devant le jury composé de :

Mohammed FEHAM	Professeur émérite	Univ. Tlemcen	Président
Samir KAMECHE	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
Haroun Errachid ADARDOUR	Maître de Conférences A	Univ. Chlef	Co-directeur de thèse
Abdelhafid BOUACHA	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
Samir GHOUALI	Maître de Conférences A	Univ. Mascara	Examineur

Année universitaire : 2024/2025

Dédicace

Je dédie cette thèse à ceux qui ont été les piliers de mon parcours :

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs sacrifices qui ont rendu ce parcours possible.

À mes frères, mes sœurs et l'ensemble de ma famille.

À mes professeurs, mentors et collègues, pour leur inspiration, leurs conseils avisés et leur confiance en mes compétences.

DEROUICHE Samra

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse Monsieur Samir KAMECHE, Professeur à l'Université de Tlemcen et Monsieur Haroun Errachid ADARDOUR, Maître de conférences classe A à l'Université de Chlef, pour leur précieux encadrement, leurs conseils avisés et leur soutien continu. Accompagnement tout au long de cette recherche. Leur expertise et leur disponibilité ont été essentielles à la réussite de ces travaux.

Je voudrais également remercier l'Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen et le Laboratoire des Systèmes et Technologies de l'Information et de la Communication et son directeur, le Professeur LEHSAINI Mohamed, pour les ressources et l'environnement de recherche qui m'ont été mis à disposition.

Je voudrais adresser mes sincères remerciements à Monsieur Mohammed FEHAM, Professeur émérite à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Je voudrais également adresser mes profonds remerciements à Monsieur Abdelhafid BOUACHA, Professeur à l'Université de Tlemcen, et à Monsieur Samir GHOUALI, Maître de conférences classe A à l'Université de Mascara, pour leur engagement en tant qu'examineurs et leurs précieuses évaluations.

Je voudrais enfin adresser mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la conception et de l'optimisation de systèmes de communication hybrides intégrant les technologies FSO (Free Space Optical) et MMW (Millimeter Waves), en réponse aux exigences croissantes des réseaux sans fil de nouvelle génération. Ces systèmes visent à concilier des débits de transmission élevés avec une résilience accrue face aux perturbations atmosphériques, tout en offrant un niveau de sécurité renforcé pour prévenir les risques liés à l'interception ou aux cyberattaques. Dans la première partie de la thèse, nous nous concentrons sur la conception et l'optimisation d'une configuration en série des systèmes FSO/MMW (ou des systèmes mixtes), en tenant compte des conditions environnementales et des exigences de performance. L'intégration de ces technologies avec MIMO et la modulation 64-PPM/BPSK-OFDM (64-Pulse Position Modulation/Binary phase-shift keying-Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) permet de surmonter les limites des systèmes traditionnels et d'améliorer leurs performances globales. La deuxième partie présente l'utilisation de DNN (Deep Neural Network) pour la sélection adaptative de modulation, permettant d'optimiser les performances en temps réel du système mixte FSO/MIMO-MMW, en termes de BER (Bit Error Rate) et de capacité. Enfin, la troisième partie de ce travail intègre des techniques avancées dans la conception des systèmes RoFSO (Radio over free space optics), tirant parti des MMW 60 GHz et de la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Ces innovations ont été mises en œuvre dans le but d'améliorer la fiabilité et la performance des opérations de transmission dans des environnements complexes. Une approche de sécurisation par chaos optique est adoptée pour protéger les données sensibles, bien qu'elle cause une légère dégradation de la qualité de transmission. Pour surmonter cette limitation, des amplificateurs optiques adaptés aux conditions atmosphériques difficiles sont intégrés, améliorant ainsi la robustesse du système. Les résultats obtenus démontrent que la combinaison des technologies MMW et FSO, associée à des techniques avancées telles que MIMO, l'optimisation par DNN pour la sélection adaptative de modulation et le chaos optique, constitue une solution robuste et performante pour les réseaux sans fil de demain.

Mots clés : FSO, MMW, systèmes mixtes FSO/MMW, modulation adaptative, DNN, RoFSO, chaos optique.

Abstract

This thesis focuses on the design and optimization of hybrid communication systems that integrate Free Space Optical (FSO) and Millimeter Wave (MMW) technologies, in response to the growing demands of next-generation wireless networks. These systems aim to achieve high data transmission rates while enhancing resilience to atmospheric disturbances and providing strengthened security to mitigate risks related to interception and cyberattacks. In the first part of this thesis, we focus on the design and optimization of a series of FSO/MMW systems (or mixed systems) that consider the performance needs and the environment. When these technologies are combined with MIMO and 64-PPM/BPSK-OFDM modulation, they get around the problems with old systems and make them work better overall. The second part discusses the use of DNNs for adaptive modulation selection. This approach allows for improved real-time performance of the mixed FSO/MIMO-MMW system regarding BER and capacity. The third part of this work incorporates advanced techniques into the design of RoFSO systems, taking advantage of 60 GHz MMW waves and MIMO technology. These innovations have been implemented to improve the reliability and performance of transmission operations in complex environments. An optical chaos security approach is adopted to protect sensitive data, although this causes a slight degradation in transmission quality. To overcome this limitation, optical amplifiers adapted to harsh atmospheric conditions are integrated, reinforcing the system's robustness. The results show that a strong, high-performance solution for tomorrow's wireless networks can be made by combining MMW and FSO technologies with advanced methods like MIMO, DNN optimization for adaptive modulation selection, and optical chaos.

Keywords: FSO communication, MMW, mixed FSO/MMW systems, adaptive modulation, DNN, RoFSO, optical chaos.

ملخص

تركز هذه الأطروحة على تصميم وتحسين أنظمة الاتصالات الهجينة التي تدمج بين تقنيتي الاتصالات البصرية في الفضاء الحر (FSO) والموجات المليمترية (MMW)، وذلك استجابةً للمتطلبات المتزايدة لشبكات الاتصالات اللاسلكية من الجيل الجديد. وتهدف هذه الأنظمة إلى تحقيق معدلات نقل بيانات عالية، مع تعزيز القدرة على مقاومة الاضطرابات الجوية، وتوفير مستوى أعلى من الأمان للحد من مخاطر التنصت أو الهجمات السيبرانية. في الجزء الأول من هذا العمل، نركز على تصميم وتحسين التكوين المتسلسل لأنظمة FSO/MMW (أو الأنظمة المختلطة)، مع مراعاة الظروف البيئية ومتطلبات الأداء. يتغلب تكامل هذه التقنيات مع تقنية MIMO والتشكيل PPM/BPSK-OFDM-64 على قيود الأنظمة التقليدية ويحسن من أدائها العام. يركز الجزء الثاني من الأطروحة على استخدام شبكات DNNs لاختيار التشكيل التكميلي، مما يتيح تحسين الأداء في الوقت الحقيقي لنظام FSO/MIMO-MMW المختلط، من حيث BER والسعة. أما في الجزء الثالث من هذا العمل، فنقوم بدمج تقنيات متقدمة في تصميم أنظمة RoFSO، مستفيدين من موجات MMW بتردد 60 جيجاهرتز وتقنية MIMO. تم تنفيذ هذه الابتكارات بهدف تحسين موثوقية وأداء عمليات الإرسال في بيئات معقدة. تم اعتماد نهج الأمان باستخدام الفوضى البصرية لحماية البيانات الحساسة، رغم أنها تتسبب في تدهور طفيف في جودة الإرسال. للتغلب على هذه المحدودية، تم دمج مكبرات ضوئية تتناسب مع الظروف الجوية القاسية، مما يعزز قوة النظام. تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الجمع بين تقنيات FSO و MMW، بالتزامن مع تقنيات متقدمة مثل MIMO والتحسين عبر DNN لاختيار التعديل التكميلي والفوضى البصرية، يشكل حلاً قوياً وأداءً ممتازاً لشبكات الاتصال اللاسلكية في المستقبل.

الكلمات الرئيسية: الاتصالات FSO، MMW، الأنظمة المختلطة FSO/MMW، التعديل التكميلي، DNN، RoFSO، الفوضى البصرية.

Productions scientifiques

Articles de journaux

1. Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. 5G network performance using novel MIMO mixed FSO/MMW communication systems under pointing errors effect: test analysis using image transmission. *Journal of Optics* (2024). <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ad835f>
2. Derouiche, S., Kameche, S. & Adardour, H.E. Adaptive modulation selection based on deep neural networks for optimizing mixed FSO/MIMO-MMW systems in 5G and 6G networks. *Telecommunication Systems* 88, 86 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11235-025-01316-9>
3. 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>

Articles de conférences internationales

1. Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. FSO and MmWave technologies for 5G mobile networks: A survey. In *2023 International Conference on Advances in Electronics, Control and Communication Systems (ICAEECCS)* (pp. 1-6). IEEE. DOI : [10.1109/ICAEECCS56710.2023.10105065](https://doi.org/10.1109/ICAEECCS56710.2023.10105065)
2. Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. Millimeter-wave transmission at 90 GHz in a hybrid fiber/FSO communication system using MIMO-FSO channel performance. In *2023 International Conference on Advances in Electronics, Control and Computer Technologies (ICAECCT, Mascara, Algérie)*.
3. Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. (2024, May). Investigation and design of a MIMO ROFSO system using WDM for the purpose of 5G applications. In *2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC)* (pp. 1-4). IEEE. DOI : [10.1109/ICEEAC61226.2024.10576366](https://doi.org/10.1109/ICEEAC61226.2024.10576366)
4. Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. (2024, October). Evaluating the influence of diverse rain attenuation levels on 60GHz MMW transmission in free space optical communication systems. In *2024 International Conference on Advances in Electrical and Communication Technologies (ICAECOT)* (pp. 1-5). IEEE. DOI : [10.1109/ICAECOT62402.2024.10827851](https://doi.org/10.1109/ICAECOT62402.2024.10827851)

Articles de conférences nationales

1. Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. (2022, Octobre). Étude et conception d'un système hybride pour les réseaux 5G. *JDTECH'2022, (Tlemcen, Algérie)*.
2. Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. (2023, Novembre). Étude et conception d'un système hybride pour les réseaux 5G. *JDTECH'2023, (Tlemcen, Algérie)*.
3. Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. (2024, Novembre). Étude et conception d'un système hybride pour les réseaux 5G. *JDTECH'2024, (Tlemcen, Algérie)*.

Sommaire

Dédicace.....	i
Remerciements	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
ملخص.....	v
Productions scientifiques.....	vi
Sommaire.....	viii
Listes des figures.....	xii
Liste des tableaux	xvi
Liste des abréviations	xvii
Introduction générale.....	2

Chapitre I : Introduction à la 5G et aux communications en ondes millimétriques

I.1 Introduction.....	6
I.2 Développement des communications mobiles.....	6
I.3 Nouvelle technologie d'accès radio.....	7
I.4 Exigences de performance de la 5G.....	8
I.5 Fonctionnalités clés pour le déploiement du réseau 5G.....	10
I.5.1 Massive MIMO	10
I.5.2 Petites stations cellulaires de 5G.....	11
I.5.3 Fréquences des MMWs pour l'eMBB	11
I.6 Caractéristiques et propagations des MMWs.....	12
I.6.1 Perte d'espace libre	12
I.6.2 Pertes gazeuses atmosphériques.....	13
I.6.3 Atténuation due à la pluie.....	14
I.6.4 Mécanismes de propagation	15
I.6.4.1 Réflexion.....	16
I.6.4.2 Diffraction.....	16
I.6.4.3 Diffusion.....	16
I.7 Modulation OFDM	16
I.7.1 Transmission OFDM.....	16
I.7.2 Modulation et démodulation OFDM.....	17
I.7.3 Préfixe cyclique et intervalle de garde	19
I.8 Technique MIMO	20
I.8.1 Diversité spatiale	21
I.8.2 Multiplexage spatial	21
I.8.3 MIMO avec formation de faisceaux (Beamforming).....	22
I.9 Applications de la technologie 5G en MMW	22
I.9.1 Réseaux mobiles.....	23
I.9.2 Réalité virtuelle (VR).....	23

I.9.3	Réseaux de communication des véhicules	23
I.9.4	Communications par satellite	23
I.9.5	Applications radar	23
I.9.6	Applications médicales	24
I.10	Conclusion	24
	Références bibliographiques du chapitre I	25

Chapitre II: Communication optique en espace libre

II.1	Introduction	29
II.2	Principe de fonctionnement des systèmes FSO	29
II.2.1	Émetteur	30
II.2.2	Canal optique.....	30
II.2.2.1	Perte de canal atmosphérique.....	31
a.	Atténuation causée par le brouillard.....	32
b.	Atténuation causée par la pluie	33
c.	Atténuation causée par la neige.....	33
II.2.2.2	Turbulences atmosphériques (AT).....	34
II.2.2.3	Variation de l'indice de réfraction	34
II.2.2.4	Scintillations.....	35
II.2.2.5	Erreur de pointage (PE).....	35
II.2.2.6	Modèles de turbulence atmosphérique.....	36
a.	Log-normal.....	36
b.	Gamma-Gamma	37
c.	Exponentielle négative	40
II.2.3	Récepteur.....	40
II.2.3.1	Photodétecteurs	41
a.	Photodétecteurs PIN.....	41
b.	Photodétecteurs APD	41
II.3	Avantages et limitations	41
II.3.1	Avantages	41
II.3.2	Défis et limitations	42
II.4	Comparaison entre les liaisons FSO, RF et fibres optiques	42
II.5	Techniques de modulation employées dans les systèmes FSO.....	43
II.6	FSO et préoccupations relatives à la sécurité humaine	44
II.7	Applications des systèmes FSO	44
II.8	Conclusion.....	45
	Références bibliographiques du chapitre II.....	47

Chapitre III: Étude et conception d'un système hybride FSO/MMW

III.1	Introduction	50
III.2	Les systèmes de communication hybrides FSO/MMW.....	50

III.3	Applications des systèmes hybrides FSO/MMW	51
III.3.1	Réseaux de raccordement pour les générations futures	51
III.3.2	Communication par satellite.....	51
III.3.3	Interconnexion des réseaux et connectivité des campus	52
III.3.4	Autres applications	52
III.4	Catégories des systèmes hybrides FSO/MMW	52
III.4.1	Systèmes hybrides en parallèle	52
III.4.2	Systèmes hybrides en série (ou systèmes mixtes).....	53
III.5	Étude et amélioration d'un système de communication hybride FSO/MMW sous PE pour le réseau 5G.....	53
III.5.1	Système MIMO-FSO/MIMO-MMW proposé.....	55
III.5.1.1	Sous-système FSO.....	56
III.5.1.2	Sous-système MMW	58
III.5.2	Analyse du BER en présence de PE.....	59
III.5.2.1	Analyse du BER d'un système hybride FSO/MMW en configurations SISO et MIMO	59
III.5.2.2	Analyse et comparaison du BER de système hybride avec différentes techniques de modulation pour MIMO-FSO	60
III.5.3	Résultats et discussions	60
III.5.4	Étude comparative avec travaux antérieurs.....	67
III.6	Transmission d'images via un système hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW.....	68
III.7	Conclusion.....	72
	Références bibliographiques du chapitre III.....	73

Chapitre IV: Optimisation des systèmes hybrides FSO/MIMO-MMW à l'aide de la sélection adaptative de modulation par DNN

IV.1	Introduction.....	76
IV.2	Système hybride FSO/MIMO-MMW basé sur l'apprentissage automatique.....	76
IV.3	Système hybride FSO/MIMO-MMW proposé	77
IV.3.1	Evaluation du BER.....	79
IV.3.2	Evaluation de la capacité du canal	79
IV.4	Modélisation du paramètre C_n^2 avec algorithmes de régression ML.....	80
IV.5	Calcul du BER et de la capacité de FSO en utilisant la classification DNN pour la modulation adaptative.....	85
IV.5.1	Classification DNN	85
IV.5.2	Analyse des performances du système FSO avec et sans modulation adaptative.....	88
IV.6	Analyse du BER et de la capacité d'un système hybride FSO/MIMO-MMW avec et sans modulation adaptative	91
IV.7	Étude comparative avec les travaux antérieurs	94
IV.8	Conclusion.....	96
	Références bibliographiques du chapitre IV.....	97

Chapitre V: Système RoFSO en MMW sécurisé par Chaos

V.1 Introduction	99
V.2 RoFSO basé sur MMW	99
V.2.1 Génération optique de signaux MMW	100
V.2.1.1 Modulation d'intensité directe	100
V.2.1.2 Modulation externe	101
V.2.1.3 Hétérodyne optique	102
V.3 Système de transmission RoFSO de 60 GHz avec la technologie MIMO	102
V.3.1 Technologie MIMO dans les communications FSO	103
V.3.2 Évaluation des performances	104
V.3.3 Résultats et discussions	105
V.4 Amélioration de la sécurité dans les systèmes RoFSO à l'aide du chaos optique	107
V.4.1 Chaos optique pulsé et non pulsé	107
V.4.2 Synchronisation chaotique	108
V.4.3 Techniques de cryptage par chaos	109
V.4.3.1 Masquage chaotique	109
V.4.3.2 Cryptage par commutation	110
V.4.3.3 Modulation chaotique	110
V.5 Sécurisation du système MIMO-RoFSO à 60 GHz par chaos optique	110
V.5.1 Conception et simulation du système MIMO-RoFSO sécurisé à 60 GHz	111
V.5.2 Résultats et discussions	112
V.5.3 Évaluation des performances et comparaison avec les études récentes	117
V.6 Conclusion	118
Références bibliographiques du chapitre V	119
Conclusion générale et perspectives	122

Listes des figures

Chapitre I

Figure I-1. Années des générations de réseaux sans fil.	7
Figure I-2. Caractéristiques principales des réseaux 5G.....	8
Figure I-3. Exigences essentielles de performance pour la 5G.....	9
Figure I-4. La cellule massive MIMO	10
Figure I-5. Petites cellules dans le réseau 5G	11
Figure I-6. Spectre de fréquences d'ondes millimétriques.....	12
Figure I-7. Atténuation spécifique due à l'absorption atmosphérique aux fréquences millimétriques.....	13
Figure I-8. Atténuation due à la pluie à 28 GHz et 60 GHz.....	15
Figure I-9. Mécanismes de propagation des MMWs	15
Figure I-10. Schéma de transmission OFDM	17
Figure I-11. Modulation/démodulation OFDM	19
Figure I-12. Illustration de l'intervalle de garde.....	19
Figure I-13. Insertion de préfixe cyclique.....	19
Figure I-14. Principe du canal MIMO.....	20
Figure I-15. Technique de diversité spatiale.....	21
Figure I-16. Technique de multiplexage spatial.....	22

Chapitre II

Figure II-1. Schéma de principe du système FSO.	29
Figure II-2. PDF log-normale avec $E[I] = 1$ pour une plage de variance de l'irradiance logarithmique σ_I^2	37
Figure II-3. PDF Gamma-gamma pour trois régimes de turbulence différents, à savoir faible, modéré et fort.	38
Figure II-4. Valeurs de α et β pour différents régimes de turbulence : faible, modéré à fort et saturation.....	39
Figure II-5. PDF exponentielle négative pour différentes valeurs de I_0	40

Chapitre III

Figure III-1. Architecture des systèmes hybrides en parallèle.	53
Figure III-2. Architecture des systèmes hybrides en série.....	53
Figure III-3. Algorithme de simulation et d'évaluation des performances du système proposé..	55
Figure III-4. Illustration schématique du modèle proposé.....	56
Figure III-5. Performances en BER du système hybride proposé MIMO-FSO/SISO-MMW en fonction du SNR_{FSO} moyen : (a) Modérée et (b) Forte.	62
Figure III-6. Performances en BER du système hybride proposé MIMO-FSO/MISO-MMW en fonction du SNR_{FSO} moyen : (a) Modérée et (b) Forte.....	63
Figure III-7. Performances en BER du système hybride proposé MIMO-FSO/MIMO-MMW en fonction du SNR_{FSO} moyen : (a) Modérée et (b) Forte.	64
Figure III-8. Performance du BER du système MIMO-FSO/MIMO-MMW proposé en fonction du SNR_{FSO} moyen pour différents σ_s	65
Figure III-9. Performance du BER du système MIMO-FSO/MIMO-MMW proposé en fonction du SNR_{FSO} moyen pour diverses techniques de modulations : (a) Modérée avec $\sigma_s = 0.1$, (b) Modérée avec $\sigma_s = 0.23$, (c) Forte avec $\sigma_s = 0.1$, et (d) Forte avec $\sigma_s = 0.23$	66
Figure III-10. Algorithme de transmission d'images.	68

Chapitre IV

Figure IV-1. Organigramme de la méthodologie basée sur le ML pour la modélisation du C_n^2 ..	81
Figure IV-2. Catégorisation des algorithmes de ML	82
Figure IV-3. Diagrammes de dispersion des quatre algorithmes de ML pour l'ensemble de données à travers toutes les saisons.....	85
Figure IV-4. Méthode DNN pour l'identification du type de modulation d'une liaison FSO.	86
Figure IV-5. Performance du classificateur DNN en hiver en termes de précision et de perte. ..	87
Figure IV-6. Matrice de confusion du classificateur DNN en hiver.	88
Figure IV-7. BER et capacité du canal en fonction de σ_R^2 d'un système FSO avec et sans modulation adaptative : (a) SNR = 10 dB et (b) SNR = 20 dB.	89
Figure IV-8. BER et capacité du canal en fonction du SNR du système FSO avec modulation adaptative : (a) BER et (b) capacité du canal.	90
Figure IV-9. Variation quotidienne du BER et de la capacité du canal pour un système hybride FSO/MIMO-MMW au cours de chaque saison avec une distance de séparation R-D de 50 m. .	93

Figure IV-10. Variation quotidienne du BER et de la capacité du canal pour un système hybride FSO/MIMO-MMW au cours de chaque saison avec une distance de séparation R-D de 200 m. 94

Chapitre V

Figure V-1. Schéma-bloc généralisé d'un système de communication RoFSO.	100
Figure V-2. Techniques de génération d'ondes MMW.	100
Figure V-3. Méthode de modulation directe (LD : Diode laser, MMW : Onde millimétrique). 101	
Figure V-4. Schéma fonctionnel de la modulation externe.	101
Figure V-5. Technique d'hétérodyne optique (LD 1 : Diode laser 1, LD 2 : Diode laser 2, PD : Photodétecteur).....	102
Figure V-6. Représentation schématique du système MIMO-RoFSO proposé.	103
Figure V-7. Schéma-bloc d'un système MIMO-FSO.	103
Figure V-8. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la longueur du lien FSO sous des conditions de brume pour trois scénarios : SISO-FSO, 2×2-FSOs et 4×4-FSOs.....	106
Figure V-9. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la longueur du lien FSO sous des conditions de fortes pluies pour trois scénarios : SISO-FSO, 2×2-FSOs et 4×4-FSOs.	106
Figure V-10. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la longueur du lien FSO sous des conditions de brouillard dense pour trois scénarios : SISO-FSO, 2×2-FSOs et 4×4-FSOs.	107
Figure V-11. Deux oscillateurs couplés unidirectionnellement.	109
Figure V-12. Résumé des principales contributions clés de l'étude.	111
Figure V-13. Représentation schématique du système MIMO-RoFSO proposé.	112
Figure V-14. Forme d'onde du signal dans le domaine temporel avant et après la transmission basée sur le chaos : (a) Signal original du message d'entrée ; (b) Signal chaotique généré ; (c) Signal transmis de manière sécurisée ; (d) Signal reçu de manière sécurisée.	113
Figure V-15. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la longueur du lien FSO sous des conditions de brume pour trois scénarios : sans chaos, avec chaos et avec chaos + amplificateur optique.....	114
Figure V-16. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la liaison FSO sous des conditions de fortes pluies pour trois scénarios : sans chaos, avec chaos et avec chaos + amplificateur optique.	114
Figure V-17. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la longueur du lien FSO sous des conditions de brouillard dense pour trois scénarios : sans chaos, avec chaos et avec chaos avec amplificateur optique.....	115

Figure V-18. Diagramme de l'œil pour le système proposé à 1,4 km sous des conditions de brume : (a) Sans amplificateur optique, (b) Avec amplificateur optique.....	116
Figure V-19. Diagramme de l'œil pour le système proposé à 0,59 km sous des conditions de fortes pluies : (a) Sans amplificateur optique, (b) Avec amplificateur optique.	116
Figure V-20. Diagramme de l'œil pour le système proposé à 0,18 km sous des conditions de brouillard dense : (a) Sans amplificateur optique, (b) Avec amplificateur optique.....	117

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II-1. Taille et type de mécanisme de diffusion des différentes molécules d'air présentes dans le milieu de transmission	32
--	----

Chapitre III

Tableau III-1. Paramètres du système.	61
Tableau III-2. Comparaison de divers modèles de systèmes mixtes.....	67
Tableau III-3. Analyse comparative de la qualité d'image dans les systèmes mixtes SISO-FSO/SISO-MMW et MIMO-FSO/SISO-MMW utilisant la modulation NRZ-OOK/BPSK-OFDM.	70
Tableau III-4. Impact de l'écart-type du déplacement de pointage (σ_s) sur la qualité de l'image dans un système mixte MIMO-FSO/MIMO-MMW utilisant NRZ-OOK/BPSK-OFDM.	71
Tableau III-5. Analyse comparative de la qualité d'image dans un système mixte MIMO-FSO/MIMO-MMW utilisant différents types de modulation pour $\sigma_s = 0,23$	71

Chapitre IV

Tableau IV-1. Statistiques récapitulatives de C_n^2	77
Tableau IV-2. Paramètres du système.	91
Tableau IV-3. Analyse comparative des études connexes.....	95

Chapitre V

Tableau V-1. Paramètres de la liaison FSO.	104
Tableau V-2. Paramètres physiques clés du laser à semi-conducteurs.	112
Tableau V-3. Analyse des résultats en comparaison avec les travaux publiés.	117

Liste des abréviations

1G: 1st Generation

2G: 2nd Generation

3G: 3rd Generation

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

4G: 4th Generation

5G: 5th Generation

A

AT: Atmospheric Turbulence

APD: Avalanche Photodiode

AM: Amplitude Modulation

AWGN: Additive White Gaussian Noise

ANN: Artificial Neural Network

B

BER: Bit Error Rate

BS: Base Station

BPSK: Binary Phase-Shift Keying

C

CDF: Cumulative Distribution Function

CP: Cyclic Prefix

CNR: Carrier-to-Noise Ratio

CW: Continuous Wave Laser

D

D2D: Device-to-Device

DNN: Deep Neural Network

E

eMBB: Enhanced Mobile Broadband

EAM: Electro-Absorptive Modulator

EPM: External Phase Modulator

F

FSL: Free-Space Loss

FSO: Free Space Optics

G

GI: Guard Interval

H

HteNet: Heterogeneous Network

HAPs: High Altitude Platform

I

IDFT: Inverse Discrete Fourier Transform

ICI: Inter-Channel Interference

IFFT: Inverse Fast Fourier Transform

ISI: Inter-Symbol Interference

IoT: Internet of Things

K

KNN: K-Nearest Neighbors

L

LAN: Local Area Network

LED: Light Emitting Diodes

LD: Laser Diodes

LOS: Line of Sight

LO: Local Oscillator

M

MMS: Multimedia Message Service

MMW: millimeter Wave

MIMO: Multiple Input and Multiple Output

mMIMO: massive Multiple Input and Multiple Output

mMTC: massive Machine Type Communications

MZM: Mach-Zehnder Modulator

M-PPM: M-ary Pulse Position Modulation

M-PAM: M-ary Pulse Amplitude Modulation

M-QAM: M-ary Quadrature Amplitude Modulation

ML: Machine Learning

N

NR: New Radio

NRZ-OOK: Non-Return-to-Zero On-Off Keying

O

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

O/E: Optical to Electrical

P

PD: Photodetector

PRBS: Pseudo-Random Binary Sequence

PSK: Phase Shift Keying

PIN: P-Type Intrinsic N-Type Photodiode

PDF: Probability Density Function

PE: Pointing error

Q

Q-Factor: Quality Factor

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadrature Phase-Shift Keying

R

RF: Radio Frequency

RoFSO: Radio over Free Space Optics

RMSE: Root Mean Square Error

R^2 : R-squared

S

SMS: Short Message Service

SISO: Single Input Single Output

SINR: Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

T

TFD: Time-Frequency Domain

U

UTR: International Telecommunication Union

URLLC: Ultra-Reliable Low Latency Communications

V

VR: Virtual Reality

V2V: Vehicle-to-Vehicle

V2I: Vehicle-to-Infrastructure

V2P: Vehicle-to-Pedestrian

V2N: Vehicle-to-Network

W

WAN: Wide Area Network

X

XGBoost: Extreme Gradient Boosting

Introduction générale

La croissance rapide des applications sans fil à haut débit, en particulier dans les réseaux de liaison terrestre, a entraîné une demande croissante de spectre RF dans la bande des micro-ondes. Cependant, les limitations du spectre nécessitent l'exploration des technologies des communications alternatives. La communication FSO est apparue comme une solution prometteuse en raison de sa large bande passante dans le spectre sans licence, permettant une connectivité haut débit transparente. Les systèmes FSO offrent plusieurs avantages, notamment un déploiement économique, une sécurité renforcée, une immunité aux interférences RF et une faible consommation d'énergie par bit. Cependant, leurs performances sont considérablement affectées par les turbulences atmosphériques, les erreurs de pointage et l'atténuation due au brouillard, qui limitent leur fiabilité et leur portée.

La technologie MMW a également attiré l'attention en tant qu'option viable pour la transmission des données à haut débit. Similaire à la FSO, la MMW utilise une transmission à faisceau étroit, garantissant une évolutivité élevée avec une interférence croisée minimale. La bande MMW prend en charge des débits de données élevés, mais elle est sensible à l'absorption d'oxygène et à l'atténuation induite par la pluie. Malgré ces défis, les technologies FSO et MMW présentent des caractéristiques complémentaires, ce qui fait de leur intégration une approche convaincante pour assurer une communication sans fil robuste et de grande capacité.

Pour surmonter les limitations de portée des liaisons FSO et MMW individuelles, des systèmes hybrides combinant les deux technologies ont été largement étudiés. Cependant, des défis majeurs restent à relever, notamment :

- Le débit de données global est limité par la liaison MMW ;
- Dégradation des performances en termes de BER en raison de l'instabilité des liaisons FSO dans des conditions atmosphériques défavorables.

Dans ce contexte, pour relever ce défi, cette thèse propose un nouveau système hybride FSO/MMW qui intègre le MIMO pour les deux liaisons et la modulation OFDM pour la liaison MMW. L'objectif principal est d'améliorer la fiabilité du système, d'augmenter les débits de données et d'atténuer les effets de la turbulence atmosphérique et de la dégradation du signal.

De plus, les transmissions FSO et MMW étant par nature limitées à de courtes distances, un système basé sur une configuration en série (ou un système mixte) est mis en œuvre pour étendre la portée de transmission et garantir une connectivité transparente dans les réseaux cellulaires de nouvelle génération. Cette configuration permet un relais de données efficace tout en optimisant les performances de liaison dans des conditions de canal variables.

Notre travail sera structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre présente les principes fondamentaux de la 5G et des communications MMW, en comparant les générations de réseaux sans fil et en analysant les exigences, cas d'usage et technologies clés comme MIMO et OFDM, tout en abordant les impacts environnementaux et les applications des MMW.

Le deuxième chapitre explore les systèmes FSO, décrivant leurs composants, les modèles atmosphériques affectant leurs performances ainsi que leurs avantages, limitations et applications potentielles dans les communications avancées.

Dans le troisième chapitre, nous nous concentrons sur les systèmes hybrides FSO/MMW, qui intègrent les avantages des deux technologies pour offrir des solutions de communication robustes. Différentes configurations sont présentées, avec un focus particulier sur la configuration en série.

Le quatrième chapitre présente une approche novatrice pour l'optimisation des systèmes hybrides FSO/MIMO-MMW. Afin de faire face aux perturbations atmosphériques, nous proposons l'adoption d'une modulation adaptative reposant sur le DNN. Cette technique vise à améliorer la performance et la fiabilité des systèmes en réduisant le BER et en augmentant la capacité de transmission dans des environnements complexes.

Le cinquième chapitre aborde la conception des systèmes RoFSO basés sur les MMW. En analysant les méthodes de génération optique de signaux MMW et les performances du système RoFSO dans différentes conditions météorologiques, ce chapitre propose également des solutions pour améliorer la fiabilité des communications grâce à des techniques MIMO, des amplificateurs optiques et de sécurisation par le chaos optique.

Les principales contributions de cette thèse s'articulent autour de trois axes principaux. Premièrement, la conception des systèmes hybrides FSO/MMW est optimisée grâce à une analyse approfondie de leur architecture, prenant en compte les contraintes environnementales et les exigences de performance afin de surmonter les limitations des systèmes de communication traditionnels. Ainsi, améliorer les performances du système en utilisant des DNNs pour une modulation adaptative dans les systèmes hybrides FSO/MIMO-MMW, augmentant ainsi leur fiabilité et leur capacité à résister aux turbulences atmosphériques. Enfin, sécuriser les communications dans les systèmes RoFSO en intégrant le chaos optique avec la technologie MIMO et les amplificateurs optiques, garantissant ainsi une meilleure confidentialité des données et une protection avancée contre les attaques externes.

Ces contributions visent à renforcer les capacités des systèmes de communication modernes, en garantissant à la fois une performance optimale dans des conditions difficiles et une sécurité renforcée face aux menaces actuelles. Les solutions proposées dans cette thèse permettront de poser les bases pour la conception de réseaux de communication plus robustes et sécurisés, qui répondront aux exigences des réseaux sans fil de demain.

**Chapitre I: Introduction à la 5G et aux
communications en ondes millimétriques**

I.1 Introduction

Ce chapitre décrit de façon générale les principes de la cinquième génération (5G) et des communications en ondes millimétriques (MMW), tout en présentant une analyse comparative des générations de réseaux sans fil, de la première génération (1G) à la 5G. Il offre une synthèse des cas d'usage et des exigences de performance de la 5G, et examine les éléments clés nécessaires pour activer les communications MMW, notamment les caractéristiques du canal, l'atténuation due à la propagation en espace libre, aux gaz atmosphériques et à la pluie, ainsi que les principes de technique MIMO (Multiple Input Multiple Output) et la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Il donne également des exemples d'applications des MMWs dans les réseaux 5G.

I.2 Développement des communications mobiles

L'industrie des communications mobiles a connu une croissance considérable au cours des trois dernières décennies. Tout a commencé avec la 1G, qui a rendu possibles les appels vocaux sur les téléphones mobiles, mais qui se limitait principalement aux appels dont la qualité vocale était médiocre et la sécurité insuffisante [1]. La deuxième génération (2G) a constitué un grand pas en avant avec le passage aux communications numériques, car elle a fourni des services de messages courts (SMS) et des services multimédias (MMS). Bien que limitée en termes de transfert de données telles que les courriers électroniques ou les fichiers, la 2G a jeté les bases de la sécurité numérique et d'une utilisation plus efficace des ressources du spectre [2].

Avec l'introduction de la troisième génération (3G) au début des années 2000, les vitesses de données se sont considérablement améliorées, permettant d'accéder à internet et d'utiliser des applications multimédias sur des appareils mobiles. La norme 3G a amélioré l'utilisation du spectre, introduit une architecture réseau plus flexible et intégré des mesures de sécurité avancées. L'architecture flexible du réseau 3G lui a permis d'évoluer sans nécessiter de refonte complète, facilitant ainsi l'intégration des développements futurs [2].

En 2009, l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) a défini des lignes directrices pour la quatrième génération (4G), dans le but de fournir un accès haut débit avec une faible latence. La 4G prend en charge des vitesses allant jusqu'à 100 Mbps pour une mobilité élevée et jusqu'à 1 Gbps pour une faible mobilité. Cela a ouvert la voie au streaming haute définition et à une meilleure connectivité mondiale, ce qui a permis d'améliorer considérablement l'expérience utilisateur [3].

Les progrès des réseaux 3G et 4G ont permis la miniaturisation des composants électroniques et ont conduit à la création des architectures de transmission et de réception avancées capables de gérer de larges gammes de fréquences et plusieurs chaînes de radiofréquences. L'introduction de la technologie MIMO a constitué un tournant majeur, permettant l'utilisation de plusieurs antennes dans l'émetteur et le récepteur pour améliorer le débit, la fiabilité du signal et la couverture. Bien que considérée comme adaptée aux réseaux 3G, la technologie MIMO a été largement déployée dans les réseaux 4G, améliorant considérablement les performances du réseau [3].

Bien que la technologie MIMO soit intégrée aux réseaux 3G et 4G, la demande continue de vitesses plus élevées a incité les opérateurs à rechercher des solutions plus avancées [4]. Les réseaux 5G sont apparus comme la réponse à cette demande, en introduisant des nouvelles technologies telles que les communications par MMW. La 5G utilise des technologies avancées pour remédier à la pénurie de spectre et répondre aux demandes de connectivité des utilisateurs, tout en offrant la capacité de s'adapter à un monde de plus en plus connecté numériquement [5,6]. La figure (I-1) présente une comparaison visuelle des différentes générations de réseaux sans fil.

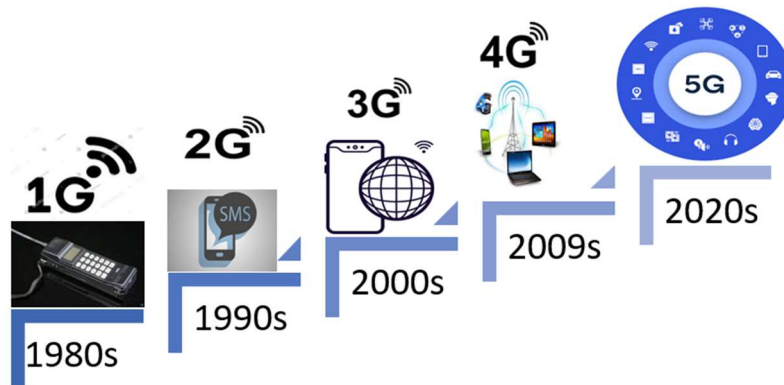


Figure I-1. Années des générations de réseaux sans fil.

I.3 Nouvelle technologie d'accès radio

Le réseau d'accès sans fil 5G, appelé New Radio (NR), représente une avancée majeure dans les communications sans fil. Le secteur des radiocommunications de l'UIT a identifié trois principaux cas d'utilisation pour la 5G : l'accès mobile amélioré à large bande (eMBB), les communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC) et les communications massives de machine à machine (mMTC) [7,8]. Les principales caractéristiques de ces trois cas d'utilisation sont illustrées dans la figure (I-2).

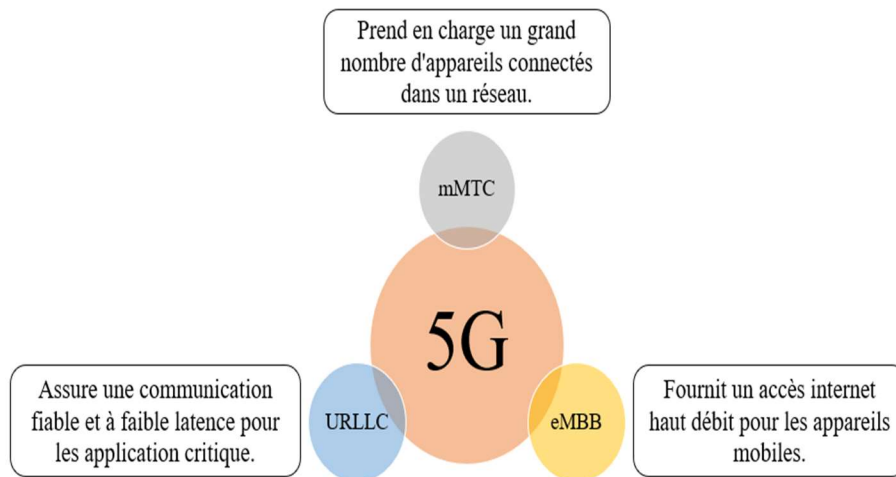


Figure I-2. Caractéristiques principales des réseaux 5G.

- L'eMBB désigne les communications mobiles à haut débit conçues pour répondre à la croissance exponentielle de l'utilisation des données mobiles. L'objectif principal est de répondre à la demande sans cesse croissante de quantité de données et de vitesse de transmission. Il comprend des applications telles que le streaming vidéo haute définition, la réalité augmentée et virtuelle, ainsi que des services en nuage très performants.
- mMTC se concentre sur les communications d'objet à objet (IoT). Cette catégorie permet de gérer un très grand nombre de connexions simultanées (jusqu'à un million par km²). Bien que chaque communication transmette généralement une quantité limitée de données, la capacité à connecter un grand nombre d'appareils est essentielle. Les applications typiques comprennent les capteurs environnementaux, les dispositifs portables et les systèmes de surveillance à grande échelle.
- URLLC concerne les communications vitales pour lesquelles une faible latence et une grande fiabilité sont essentielles. Des applications telles que les voitures sans conducteur, la chirurgie à distance et les processus industriels automatisés dépendent de ces communications. Pour les opérations où le moindre retard peut avoir des répercussions désastreuses, l'URLLC garantit une fiabilité des communications proche de 100 % et un temps de latence incroyablement faible. Cela permet d'obtenir des performances constantes et fiables [8,9].

I.4 Exigences de performance de la 5G

Étant donné la vaste gamme d'applications multimédias et de cas d'utilisation, chacun avec des contraintes diverses, des réseaux 5G efficaces et flexibles doivent être déployés pour répondre à ces exigences [10]. Ces exigences incluent, comme le montre la figure (I-3):

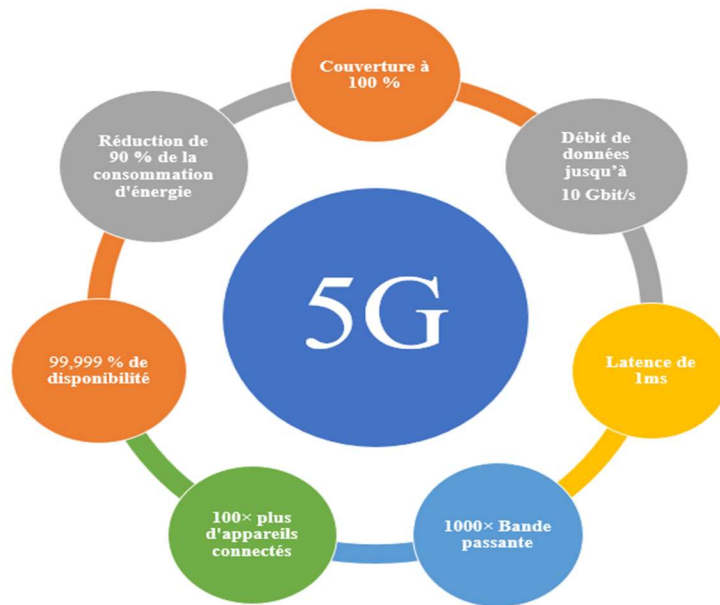


Figure I-3. Exigences essentielles de performance pour la 5G.

- Couverture à 100 % : garantir une connectivité omniprésente pour offrir un service fluide aux personnes partout, quel que soit leur emplacement. La 5G nécessite une couverture complète pour être perçue. Les technologies IoTs, D2D (Device-to-Device) et V2V (Vehicle-to-Vehicle) peuvent se connecter au réseau depuis n'importe quel emplacement en offrant une couverture suffisante.
- Débit de données jusqu'à 10 Gbit/s : fournir des vitesses de données allant jusqu'à 10 Gbit/s, ce qui représente une augmentation de vitesse de 10 à 100 fois par rapport aux réseaux 4G et 4.5G. Cela facilite le transfert rapide de données et le streaming vidéo de très haute qualité, entre autres applications à haut débit.
- Latence d'une milliseconde : il s'agit du temps de réaction entre l'émission d'une commande et son exécution à l'écran. La latence sera réduite d'un facteur 10, de 10 ms à 1 ms, ce qui permettra le développement de nouvelles applications telles que les véhicules autonomes et la télémédecine.
- 1000 fois la bande passante par unité de surface : dans les endroits densément peuplés, cette technique permet une plus grande capacité de données et davantage de connexions simultanées en multipliant la bande passante disponible par unité de surface par 1000.
- Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface : par rapport à la 4G LTE, cette technologie prend en charge jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface, ce qui aidera l'IoT à se développer et permettra à plusieurs appareils de communiquer à la fois.

- Disponibilité : 99,999 % garantissent une disponibilité du réseau presque sans faille et fiabilité, ce qui est essentiel pour les applications critiques qui nécessitent un accès constant et ininterrompu.
- Réduction de 90 % de la consommation d'énergie du réseau : en autorisant un volume élevé de trafic de données, 90 % d'énergie en moins est utilisée sur le réseau, ce qui encourage la durabilité et les économies de coûts.
- Durée de vie prolongée de la batterie des appareils IoT à faible consommation jusqu'à 10 ans : cela permet le déploiement d'une variété de capteurs et d'appareils alimentés par batterie sans nécessiter de maintenance régulière ou de changement de batterie [11].

I.5 Fonctionnalités clés pour le déploiement du réseau 5G

Pour répondre aux différentes exigences de performances, il est nécessaire de concevoir et d'intégrer de nombreuses technologies révolutionnaires dans les systèmes 5G. Dans cette section, nous examinerons les principales technologies qui permettent au réseau d'accès radio de répondre aux attentes de la 5G, en mettant particulièrement l'accent sur les applications eMBB, qui exigent une large bande passante et une connectivité fiable pour un usage mobile avancé [10].

I.5.1 Massive MIMO

mMIMO (massive MIMO) est une technologie 5G clé qui utilise un grand nombre d'antennes à la station de base (BS), permettant de concentrer la puissance sur des zones spécifiques de l'espace, comme le montre la figure (I-4). Contrairement à la 4G, qui est limitée à huit antennes, le mMIMO peut combiner des dizaines, voire des centaines d'antennes, améliorant ainsi l'efficacité spectrale, le débit utilisateur et réduisant les interférences [12,13].

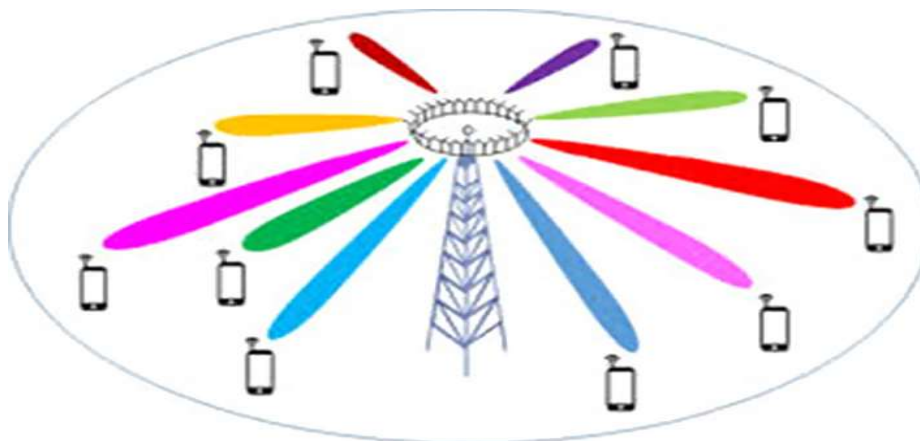


Figure I-4. La cellule massive MIMO [14].

Cependant, cette technologie est confrontée à des défis, notamment des défauts matériels dus à l'intégration de composants moins coûteux sur des puces de silicium. Ces limitations conduisent à une augmentation du bruit, à une amplification du bruit de phase avec le nombre d'antennes et à une diminution des performances en raison des composants RF à faible coût, comme le soulignent plusieurs études [15,16].

I.5.2 Petites stations cellulaires de 5G

La densification du réseau consiste à augmenter le nombre de sites cellulaires, notamment dans les zones à fort trafic, en déployant des petites cellules au sein des macro-cellules existantes, formant ainsi un réseau multicouche appelé réseau hétérogène (HetNet), comme le montre la figure (I-5). Cette approche réduit la distance entre utilisateurs et BS, diminuant les pertes de propagation, augmentant l'efficacité énergétique, les débits de transmission et le taux de réutilisation du spectre [12,10].

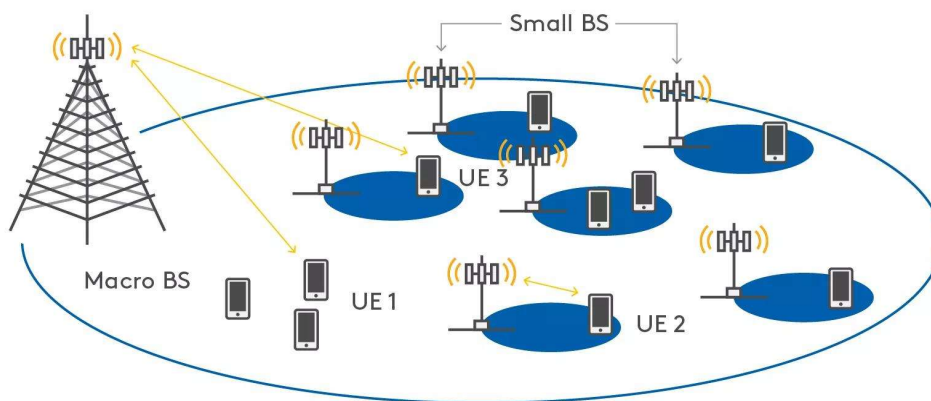


Figure I-5. Petites cellules dans le réseau 5G [17].

Les HetNets sont essentiels pour répondre à la demande croissante en données, mais leur déploiement présente des défis. Les interférences, notamment entre BS de petites cellules et équipements utilisateurs, ainsi qu'entre petites cellules voisines, constituent un obstacle majeur. Par ailleurs, la densification entraîne une augmentation significative de la consommation énergétique, bien que cela soit compensé par les gains en capacité et en couverture [18].

I.5.3 Fréquences des MMWs pour l'eMBB

Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, les communications sans fil ont connu des avancées technologiques importantes ces dernières années, mais le spectre alloué aux réseaux cellulaires n'a pas suivi le rythme. La plupart des réseaux mobiles fonctionnent à des fréquences

inférieures à 6 GHz, où la saturation causée par la croissance massive du trafic mobile est préoccupante. Pour surmonter ce problème, l'utilisation des bandes de fréquences à MMW devient nécessaire, car il existe une large bande de fréquences qui est encore sous-utilisée [19].

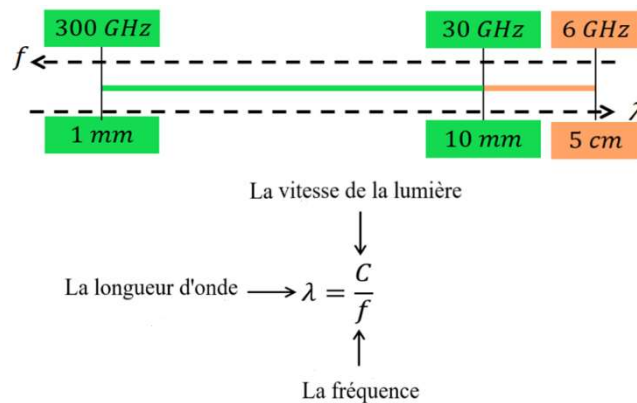


Figure I-6. Spectre de fréquences d'ondes millimétriques [19].

La technologie MMW, définie pour des fréquences comprises entre 30 et 300 GHz (longueurs d'onde de 1 à 10 mm), comme illustré dans la figure (I-6). Elle offre des opportunités clés pour la technologie 5G, notamment dans les bandes 28-30 GHz, 38-40 GHz et la bande libre de 57-71 GHz. Ces fréquences permettent des débits allant jusqu'à plusieurs gigabits grâce à leur large disponibilité spectrale. Cependant, leur utilisation pose des défis techniques qui nécessitent des solutions appropriées pour un fonctionnement efficace [20].

I.6 Caractéristiques et propagations des MMWs

Par rapport aux bandes de fréquence inférieures, les communications MMW présentent des problèmes en plus de leur énorme potentiel. Les propriétés de propagation et les limitations des canaux associées à des bandes de fréquence plus élevées doivent être prises en compte lors de l'utilisation de MMW. Différents facteurs affectant la propagation des MMWs sont [21] :

- Perte d'espace libre ;
- Les pertes gazeuses atmosphériques sont principalement dues à l'oxygène et à la vapeur d'eau ;
- Atténuation due à la pluie.

I.6.1 Perte d'espace libre

La perte d'espace libre (FSL) représente la diminution de la puissance du signal propagé dans un environnement dégagé. Dans les MMWs, cette perte est plus élevée et augmente avec la

fréquence, limitant la portée de communication. Dans les réseaux 5G, il est nécessaire d'utiliser des faisceaux concentrés ou des distances réduites pour maintenir la qualité du signal [22].

Lorsque deux antennes isotropes fonctionnent à une fréquence f en GHz et sont séparées par une distance de d en km, le FSL entre elle est indiquée comme :

$$FSL_{(dB)} = 92.4 + 20\log(f) + 20\log(d) \quad (I-1)$$

I.6.2 Pertes gazeuses atmosphériques

La propagation des MMWs est également limitée par l'atténuation atmosphérique, ou atténuation gazeuse, causée par les molécules de gaz présentes dans l'atmosphère terrestre [21]. La transmission d'un signal radio en MMW est particulièrement affectée par l'oxygène et la vapeur d'eau dans les basses couches de l'atmosphère. Cette atténuation est d'une telle importance qu'elle ne peut être ignorée. La figure (I-7) illustre l'atténuation causée expérimentalement par l'absorption de vapeur d'eau et d'oxygène dans les canaux MMW.

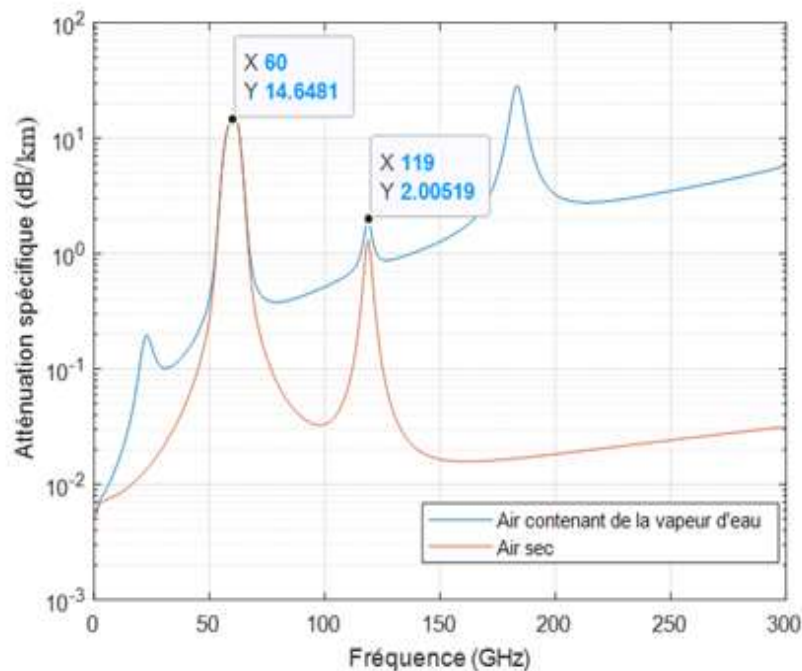


Figure I-7. Atténuation spécifique due à l'absorption atmosphérique aux fréquences millimétriques.

Nous avons calculé l'atténuation gazeuse spécifique dans la bande des micro-ondes, en nous concentrant sur les fréquences 5G. La figure (I-7) présente l'atténuation spécifique en fonction de la fréquence, pour une pression de 101.300 kPa et une température de 15°C, en considérant deux cas : avec et sans vapeur d'eau. Les résultats montrent des pics d'absorption autour de 60 et 120 GHz, où l'atténuation est maximale, limitant la couverture en visibilité directe (LOS). Cependant,

dans les petites cellules de 200 m, cette atténuation et celle due aux pluies n'entraînent pas de pertes significatives à 60 GHz. De plus, l'atténuation spécifique réduite dans ces cellules favorise une meilleure efficacité spectrale grâce à la réutilisation de la fréquence [21].

I.6.3 Atténuation due à la pluie

La propagation des MMWs est influencée par les précipitations, notamment par la pluie, ainsi que par d'autres facteurs de perte. La taille des gouttes de pluie est similaire aux longueurs d'onde des ondes radio, ce qui provoque la diffusion du signal [23]. L'atténuation due aux précipitations dépend à la fois du taux de pluie et de la taille des gouttes. Le taux de pluie, mesuré en millimètres par heure, représente la quantité de pluie accumulée en un certain temps. La distribution des tailles de gouttes est cruciale pour analyser l'atténuation électromagnétique et la dépolarisation. À une portée de 200 m, les bandes de 28 et 38 GHz subissent peu d'atténuation liée à la pluie et une absorption d'oxygène modérée, tandis que les bandes de 60 et 73 GHz sont davantage affectées par l'atténuation due à la pluie et par l'absorption d'oxygène [23].

L'équation (I-2) présente l'association entre une atténuation spécifique et le taux de précipitations [24].

$$\gamma_{pluie} = kR^\alpha \quad (I-2)$$

Le modèle de Crane spécifie les valeurs des constantes k et α pour différentes fréquences. Le modèle terrestre de l'UIT-R et le modèle de grue sont deux méthodes importantes pour estimer l'atténuation due à la pluie. Les constantes k et α dépendent de la fréquence et de la microstructure de la pluie et peuvent être définies mathématiquement comme suit [24] :

$$k = \frac{[k_H + k_V (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \]}{2} \quad (I-3)$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H + k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2 \]}{2k} \quad (I-4)$$

Les valeurs des constantes k_H , k_V , α_H et α_V sont données dans les références [25] et [26]. La figure (I-8) montre l'atténuation par kilomètre en fonction du taux de pluie pour les fréquences 5G.

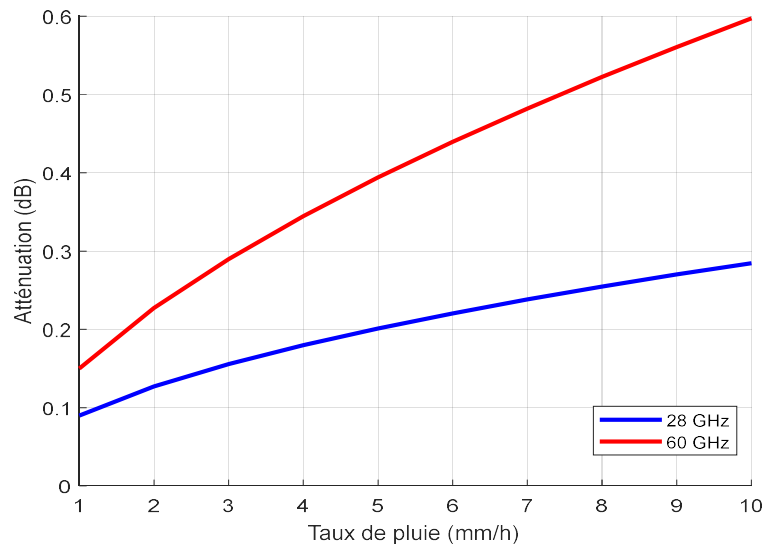


Figure I-8. Atténuation due à la pluie à 28 GHz et 60 GHz.

Nous avons calculé l'atténuation due à la pluie sur une distance de 200 m, avec des taux de pluie variant de 1 à 10 mm/h. Il en ressort que l'atténuation augmente avec la fréquence et le taux de pluie, la perte étant beaucoup plus marquée à 60 GHz qu'à 28 GHz.

I.6.4 Mécanismes de propagation

Les mécanismes de propagation, représentés à la figure (I-9), incluent la réflexion, la diffusion et la diffraction, chacun jouant un rôle important dans la propagation des MMWs [23,27]. Les courtes longueurs d'onde des signaux millimétriques, comprises entre 1 mm et 10 mm, amplifient l'influence de ces phénomènes.

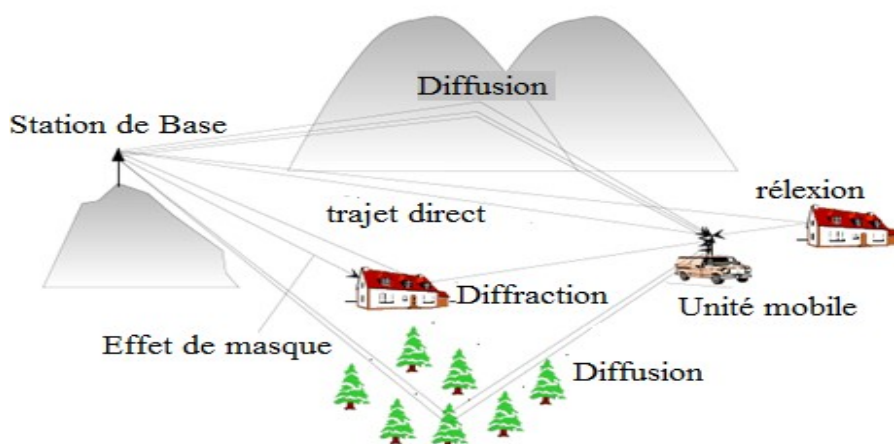


Figure I-9. Mécanismes de propagation des MMWs [23].

I.6.4.1 Réflexion

La réflexion se produit lorsque le MMW rencontre une grande surface, comme un bâtiment ou un mur, qui est beaucoup plus grande que la longueur d'onde du signal. L'onde rebondit sur la surface et continue de se propager dans une autre direction. Ce mécanisme est important dans les environnements urbains, où les bâtiments et autres structures peuvent provoquer de multiples réflexions, conduisant à des phénomènes tels que la propagation multi-trajets [23].

I.6.4.2 Diffraction

Lorsque les micro-ondes entrent en contact avec le même obstacle, comme le bord d'un bâtiment ou une montagne, elles sont naturellement attirées vers son sommet. Cela permet à l'onde de se propager même lorsque la ligne de visée est bloquée. La diffraction joue un rôle crucial dans les scénarios avec de multiples obstacles, car elle permet de recevoir des signaux dans des zones obstruées [23,27].

I.6.4.3 Diffusion

Les petites particules telles que les feuilles, les gouttes de pluie ou les particules de poussière, dont la taille est similaire à celle des particules millimétriques, ont tendance à réfléchir les rayons micrométriques dans plusieurs directions lorsqu'elles entrent en contact avec de très petites surfaces ou objets [27,28].

I.7 Modulation OFDM

L'OFDM, adopté par le projet 3GPP pour la liaison descendante 5G, est une technologie de modulation multi-porteuse qui utilise des sous-porteuses orthogonales pour transmettre des données. Il divise le flux de données en sous-flux parallèles, chacun modulé par une sous-bande étroite. Cette approche réduit l'effet de l'évanouissement rapide, car chaque sous-porteuse subit un évanouissement stable ou « plat ». L'OFDM est donc particulièrement efficace pour lutter contre les effets de l'évanouissement des canaux [29,10].

I.7.1 Transmission OFDM

La transmission OFDM est un système multi-canal où les symboles $\{X_k\}_{k=0}^{N-1}$ modulent N sous-porteuses aux fréquences f_k pour $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ (voir Figure (I-10)). Le spectre du symbole OFDM est constitué de N fonctions sinus cardinal centrées aux fréquences f_k , ce qui permet d'augmenter l'efficacité spectrale.

Les sous-porteuses sont représentées par des signaux complexes $s_k = \{e^{j2\pi f_k t}\}_{k=0}^{N-1}$ pour $0 < t < T_{sym}$, où $T_{sym} = NT_s$, et ces signaux sont dits orthogonaux si les fréquences porteuses f_k sont de la forme $f_k = k/T_{sym}$, où T_{sym} est la période d'échantillonnage. Cette condition d'orthogonalité assure que l'intégrale du produit de deux fonctions différentes soit nulle, c'est-à-dire :

$$\int_0^{T_{sym}} s_k(t) \cdot s_l^*(t) dt = \delta(k - l) \text{ Pour } k, l = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (\text{I-5})$$

Cette condition permet de garantir l'orthogonalité entre les différentes sous-porteuses, minimisant ainsi l'interférence entre elles [30].

Dans le domaine discret, en prenant des échantillons à l'instant $t = nT_s$ où $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, l'orthogonalité des signaux devient :

$$\sum_{n=0}^{N-1} s_k(n) \cdot s_l^*(n) dt = \delta(k - l) \quad (\text{I-6})$$

Cela signifie que la somme des produits des échantillons correspondants des sous-porteuses est égale à 1 si $k = l$, et égale à 0 sinon. Cette condition d'orthogonalité est cruciale pour éviter l'interférence entre canaux (ICI), même si les spectres des signaux se chevauchent [31].

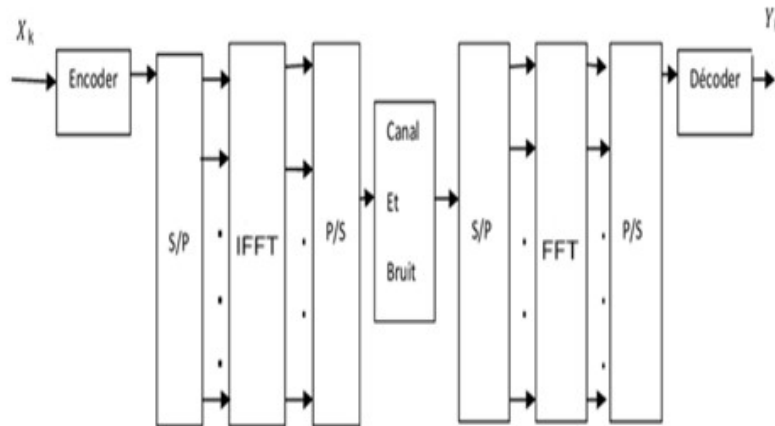


Figure I-10. Schéma de transmission OFDM [10].

I.7.2 Modulation et démodulation OFDM

L'émetteur OFDM module les éléments binaires du message à transmettre en symboles, tels que PSK ou QAM. Ces symboles sont ensuite répartis en N flux parallèles, où chaque flux module une sous-porteuse différente [30].

Soit $\{X_k\}$ pour $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, les symboles transmis sur les différentes sous-porteuses. En raison de la répartition série/parallèle des symboles, la transmission de N symboles (PSK ou QAM) prend une durée T_s , ce qui forme un seul symbole OFDM avec une durée $T_{sym} = N T_s$ où T_s est la période des symboles PSK ou QAM.

Si $\Psi_k(t)$ est le signal OFDM sur la k^{eme} sous-porteuse, il peut être exprimé sous la forme :

$$\Psi_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k(t-T_{sym})} & ; \quad 0 < t < T_{sym} \\ 0 & \quad \text{sinon} \end{cases} \quad (I-7)$$

L'expression continue en bande de base des signaux OFDM est donnée par :

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot \Psi_k(t) \quad (I-8)$$

Où X_k représente les symboles modifiés (PSK ou QAM) et $\Psi_k(t)$ représente les signaux de sous-porteuses modélisés.

Si on échantillonne ce signal à l'instant $t = T_{sym} + nT_s$, avec $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, le symbole OFDM en temps discret est :

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j2\pi kn/N} \quad (I-9)$$

Cela correspond à la transformée de Fourier discrète inverse (IDFT) des symboles $\{X_k\}$, et peut être efficacement calculé par l'algorithme IFFT (Inverse Fast Fourier Transform).

La figure (I-11) illustre les principes de modulation et de démodulation du signal OFDM. Dans le domaine fréquentiel, les symboles $\{X_k\}$ modulés sont affectés aux sous-porteuses de fréquences définies par $f_k = \frac{k}{T_{sym}}$ où $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ représente les indices des sous-porteuses.

Au niveau du récepteur, la transformée de Fourier discrète (TFD) des symboles reçus $\{y_k\}$ pour $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ est calculée suite à une conversion série-parallèle du flux entrant. Ce processus produit une séquence de symboles $\{Y_k\}$ pour $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, qui correspond à la séquence d'origine $\{X_k\}$ au niveau de l'émetteur. Ce processus minimise les interférences entre les canaux et reconstruit avec précision les données transmises, ce qui rend l'OFDM très efficace dans la gestion des trajets multiples et maximise l'efficacité spectrale [32].

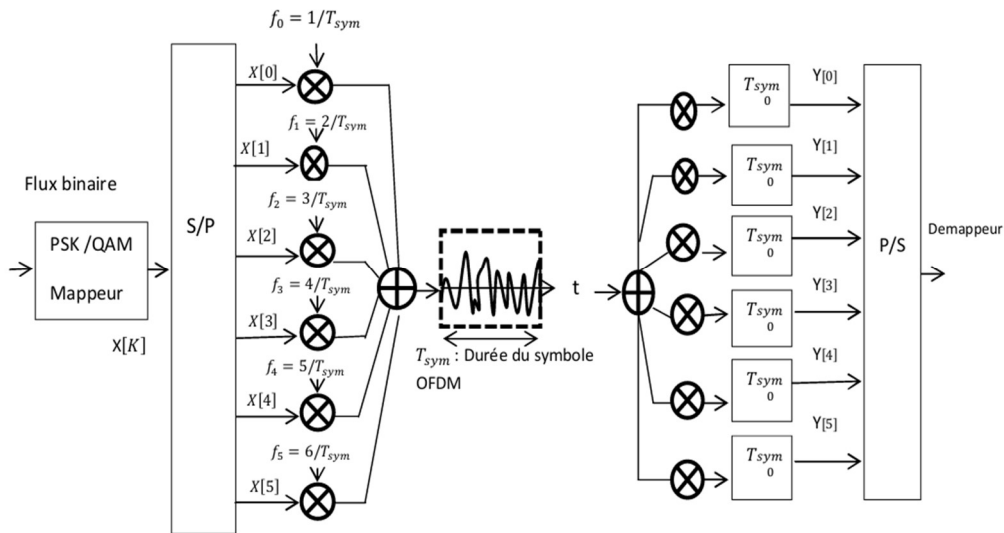


Figure I-11. Modulation/démodulation OFDM [10].

I.7.3 Préfixe cyclique et intervalle de garde

Pour protéger la qualité de transmission des interférences entre symboles (ISI), un intervalle de garde (GI) est introduit entre les symboles OFDM consécutifs, comme illustré dans la figure (I-12). La durée de l'intervalle de garde doit être égale ou supérieure à l'étalement du délai du canal de propagation pour éviter les ISIs.



Figure I-12. Illustration de l'intervalle de garde.

Le préfixe cyclique (CP) résout ce problème en copiant la fin du symbole OFDM et en la plaçant au début, comme illustré dans la figure (I-13). Dans cette approche, l'intervalle de garde est remplacé par la partie de queue du symbole OFDM lui-même.

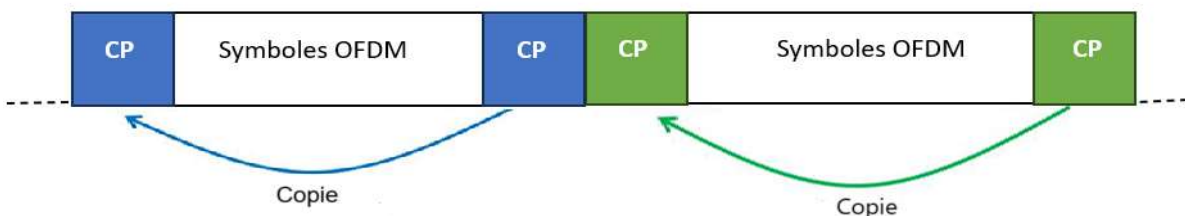


Figure I-13. Insertion de préfixe cyclique.

Le CP empêche non seulement les ISIs, mais permet également la convolution circulaire au sein du système OFDM. Cette propriété permet de transformer la convolution circulaire dans le

domaine temporel en une simple multiplication dans le domaine fréquentiel. Par conséquent, l'estimation et l'égalisation du canal deviennent des opérations simples et linéaires [10].

I.8 Technique MIMO

Une technique de communication sans fil appelée MIMO implique l'utilisation de plusieurs antennes de transmission et de réception afin d'améliorer les performances de communication, et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO (Single-Input Single-Output), ni la puissance du signal à l'émission, comme le montre la figure (I-14).

$H = H_{i,j}$ avec $1 \leq i \leq N_T$ et $1 \leq j \leq N_R$ représente la matrice du canal MIMO. $H_{i,j}$ est le coefficient d'évanouissement du canal entre la $i^{\text{ème}}$ antenne du récepteur (R_X) et la $j^{\text{ème}}$ antenne de l'émetteur (T_X). N_T et N_R désignent respectivement le nombre d'antennes de l'émetteur et du récepteur.

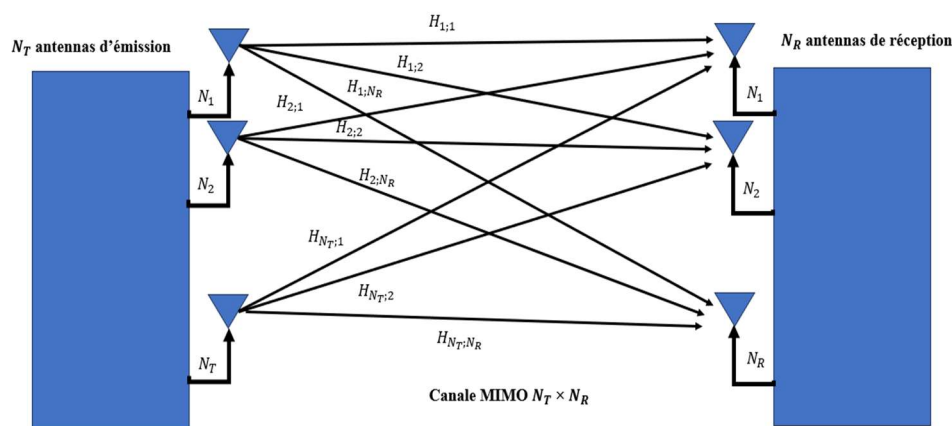


Figure I-14. Principe du canal MIMO.

Un canal MIMO peut être considéré comme un ensemble de sous-canaux entre l'émetteur et le récepteur, où le sous-canal avec le coefficient d'évanouissement $h_{i,j}$ représente la liaison entre l'antenne $T_X i$ et l'antenne $R_X j$.

Dans un système MIMO $N_T \times N_R$, le nombre de sous-canaux m est déterminé par le minimum de N_T et N_R , c'est-à-dire $m = \min(N_T, N_R)$. En effet, le rang de la matrice du canal MIMO H , qui régit le nombre de voies de transmission parallèles et indépendantes, est limité par le plus petit des nombres d'antennes à l'émetteur ou au récepteur [33].

Selon l'application et les objectifs du système, on peut classer les systèmes de transmission MIMO en deux catégories principales : ceux qui optimisent le débit de transmission (gain de

multiplexage) et ceux qui optimisent la fiabilité de transmission en réduisant la probabilité d'erreur (gain en diversité) [34].

I.8.1 Diversité spatiale

Cette technique s'appuie sur des méthodes de diversité qui consistent à envoyer plusieurs copies d'une même information, chacune soumise à un évanouissement de canal différent. Le récepteur analyse ces copies, en espérant qu'au moins une copie est reçue correctement ou que l'un des canaux a un rapport signal/bruit suffisant. Il existe plusieurs types de diversité : temporelle (se déplaçant à des moments différents), fréquentielle (utilisant différentes plages de fréquences) et spatiale. La diversité spatiale utilise des antennes de transmission pour envoyer différentes versions codées du même signal, sans augmenter le débit. Cela permet au récepteur de détecter le signal avec une probabilité élevée, à condition que les sous-canaux MIMO soient indépendants (non corrélés) [10,35].

La figure (I-15) illustre un exemple de la technique de diversité spatiale où la même information est transmise à travers différents canaux spatiaux indépendants en utilisant trois antennes d'émission distinctes. Dans cet exemple, le gain de diversité est de 3, tandis que le gain de multiplexage est nul.

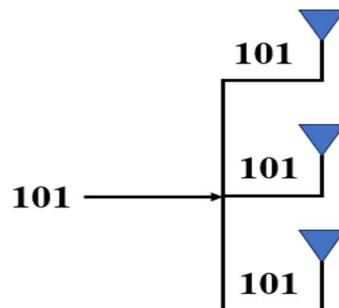


Figure I-15. Technique de diversité spatiale.

I.8.2 Multiplexage spatial

Cette méthode permet d'accroître la capacité moyenne du lien sans fil. Tous les messages sont subdivisés en sous-messages, qui sont envoyés en même temps via diverses antennes. Ensuite, on regroupe les signaux reçus sur les antennes de réception afin de reconstruire le message initial. Comme pour la diversité MIMO, il est essentiel de décorrélérer les sous-canaux de propagation afin de garantir une performance optimale [10].

La figure (I-16) présente un exemple de la technique de multiplexage spatial, où le gain de diversité est de 0 et le gain de multiplexage est de 3, ce qui correspond à une configuration MIMO avec plusieurs antennes. Dans ce cas, la technique de multiplexage spatial permet la transmission simultanée de trois flux de données distincts via des sous-canaux indépendants, exploitant ainsi le gain de multiplexage offert par le système.

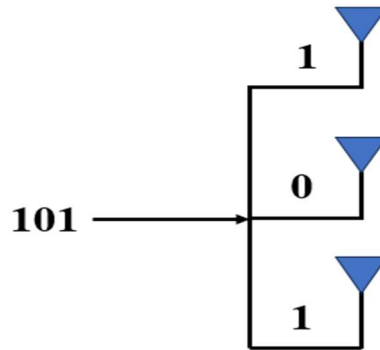


Figure I-16. Technique de multiplexage spatial.

I.8.3 MIMO avec formation de faisceaux (Beamforming)

La technologie de formation de faisceau MIMO est une méthode de communication qui exploite les avantages de la formation de faisceau MIMO pour améliorer la portée, la capacité et la qualité des transmissions sans fil.

Afin d'augmenter le gain de l'antenne de la station de base et de concentrer l'énergie des antennes dans une direction précise, on utilise la méthode de formation de faisceaux. De plus, les faisceaux étroits et les transmissions directionnelles pour une application cellulaire sont utiles pour réduire les interférences introduites par la réutilisation spatiale qui conduit à augmenter le rapport signal/interférence (SINR) [13,33].

I.9 Applications de la technologie 5G en MMW

Les MMWs ont une large gamme d'applications en raison de leur large bande passante et de leur faisceau étroit. La technologie MMW offre une bande passante élevée, il est évident qu'elle est utilisée dans des secteurs tels que les réseaux portables, la réalité virtuelle, les réseaux de véhicules, la communication par satellite et la 5G. De plus, leurs petites longueurs d'onde et leurs faisceaux étroits permettent d'être utilisées dans des systèmes d'imagerie, de suivi et de détection [12,19].

I.9.1 Réseaux mobiles

Les progrès de la miniaturisation électronique et des communications sans fil ont conduit à l'émergence de gadgets tels que les montres intelligentes, les trackers de mouvement et les lunettes intelligentes. Les réseaux MMW offrent une connectivité rapide avec une faible latence, ce qui les rend plus faciles à utiliser. Cependant, dans les environnements densément peuplés, il est nécessaire de gérer les interférences et d'optimiser la consommation d'énergie.

I.9.2 Réalité virtuelle (VR)

Les casques VR, souvent limités par leur connexion filaire, voient leurs capacités décuplées grâce aux connexions MMW. Elle permet un transfert de données sans fil à des vitesses allant jusqu'à plusieurs gigabits par seconde, enrichissant l'expérience utilisateur. Pour répondre aux contraintes spécifiques de la VR, des algorithmes personnalisés sont déployés pour optimiser l'allocation d'énergie et la gestion des ressources.

I.9.3 Réseaux de communication des véhicules

Les systèmes de transport intelligents utilisent des MMWs pour communiquer entre les véhicules (V2V), les infrastructures (V2I), les piétons (V2P) et les réseaux (V2N). Ces réseaux, essentiels à la conduite autonome, nécessitent des solutions adaptées à la forte mobilité, comme le routage dynamique et la formation de faisceaux adaptative.

I.9.4 Communications par satellite

Les bandes W [75-110 GHz] assurent des transmissions rapides et de haute qualité, supérieures aux bandes saturées Ku et Ka. Il permet une collecte rapide de données dans des zones reculées, même si les composants matériels sont limités par le bruit et la distorsion.

I.9.5 Applications radar

Compacts et précis grâce à leur largeur de faisceau, les radars MMW sont utilisés dans les capteurs de mouvement, les systèmes anticollisions, la détection de la vitesse des véhicules et les alarmes anti-intrusion.

I.9.6 Applications médicales

Les MMWs [40-70 GHz] sont utilisées dans les traitements médicaux pour soulager les douleurs aiguës et traiter divers troubles, démontrant ainsi leur potentiel dans le domaine de la santé [19,36].

I.10 Conclusion

Le premier chapitre de cette thèse fournit une analyse théorique des communications 5G et MMW. Nous comparons les différentes générations de réseaux sans fil, en soulignant l'évolution de la 1G à la 5G, ainsi que les cas d'utilisation et les exigences de performance associées à cette dernière. Nous explorons les éléments clés des communications MMW, soulignant leurs avantages tels que le débit élevé dû à la bande passante élevée, mais aussi leurs limites, notamment la sensibilité à l'atténuation, à la météo et aux obstacles.

De plus, les principes de modulation OFDM et les techniques MIMO sont analysés, en particulier le multiplexage spatial pour augmenter la capacité du réseau et la diversité spatiale pour améliorer la fiabilité de la transmission. Le rôle de la formation de faisceaux dans les communications micro-ondes a également été étudié, soulignant son potentiel de concentration de l'énergie du signal et d'amélioration de la portée. Ce chapitre pose ainsi les bases théoriques fondamentales des analyses et contributions des chapitres suivants.

Références bibliographiques du chapitre I

- [1] Lan, N. T. M. (2023). Evolution of Wireless Technology: From 1G to 5G. *Asian J. Appl. Sci. Technol.*, 7(04), 68-73.
- [2] Zeqiri, R., Idrizi, F., & Halimi, H. (2019, October). Comparison of Algorithms and Technologies 2G, 3G, 4G and 5G. In *2019 3rd International symposium on Multidisciplinary studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (pp. 1-4). IEEE.
- [3] Gkonis, P. K., Trakadas, P. T., & Kaklamani, D. I. (2020). A comprehensive study on simulation techniques for 5g networks: State of the art results, analysis, and future challenges. *Electronics*, 9(3), 468.
- [4] Shoaib, S., Shoaib, I., Chen, X., & Parini, C. G. (2016, April). MIMO antennas for next generation mobile terminals. In *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-4). IEEE.
- [5] Cheng, X., Tang, C., & Zhang, Z. (2019). Accurate channel estimation for millimeter-wave MIMO systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(5), 5159-5163.
- [6] Li, L., Wang, D., Niu, X., Chai, Y., Chen, L., He, L., ... & You, X. (2018). mmWave communications for 5G: implementation challenges and advances. *Science China Information Sciences*, 61, 1-19.
- [7] Silva, M. M. D., & Guerreiro, J. (2020). On the 5G and Beyond. *Applied Sciences*, 10(20), 7091.
- [8] Haouzi, A., Kameche, S., & Adardour, H. E. (2022, May). Overview: Application of Cognitive Radio Technology in Fifth-Generation Wireless Communications. In *2022 7th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA)* (pp. 1-6). IEEE.
- [9] Siddiqi, M. A., Yu, H., & Joung, J. (2019). 5G ultra-reliable low-latency communication implementation challenges and operational issues with IoT devices. *Electronics*, 8(9), 981.
- [10] Dembele, H. (2021). *5G scenarios and evolutions in the new millimeter-wave bands* (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique).
- [11] Attar, H., Issa, H., Ababneh, J., Abbasi, M., Solyman, A. A., Khosravi, M., & Said Agieb, R. (2022). 5G system overview for ongoing smart applications: structure, requirements, and specifications. *Computational intelligence and Neuroscience*, 2022(1), 2476841
- [12] Philip, A. S., James, J. E., Antony, J., Varghese, J. A., & Sreenath, M. (2020). MILLIMETER WAVE COMMUNICATIONS FOR 5G: THEORY AND APPLICATIONS.

- [13] Mchangama, A., Ayadi, J., Jiménez, V. P. G., & Consoli, A. (2020, July). MmWave massive MIMO small cells for 5G and beyond mobile networks: An overview. In *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)* (pp. 1-6). IEEE.
- [14] Salah, I., Mabrook, M. M., Rahouma, K. H., & Hussein, A. I. (2022). Energy efficiency optimization in adaptive massive MIMO networks for 5G applications using genetic algorithm. *Optical and Quantum Electronics*, *54*(2), 125.
- [15] Kim, J., Jeong, J., & Jeon, S. (2011). Improvement of noise performance in phased-array receivers. *ETRI Journal*, *33*(2), 176-183.
- [16] Gustavsson, U., Sánchez-Perez, C., Eriksson, T., Athley, F., Durisi, G., Landin, P., ... & Svensson, L. (2014, December). On the impact of hardware impairments on massive MIMO. In *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)* (pp. 294-300). IEEE.
- [17] Dini, P., Miozzo, M., Bui, N., & Baldo, N. (2013, August). A model to analyze the energy savings of base station sleep mode in LTE HetNets. In *2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing* (pp. 1375-1380). IEEE.
- [18] Romanous, B., Bitar, N., Imran, A., & Refai, H. (2015, September). Network densification: Challenges and opportunities in enabling 5G. In *2015 IEEE 20th international workshop on computer aided modelling and design of communication links and networks (CAMAD)* (pp. 129-134). IEEE.
- [19] Vaigandla, K. K., Rani, B. S., Srikanth, K., Mounika, T., & Karne, R. (2021). Millimeter wave communications: propagation characteristics, beamforming, architecture, standardization, challenges and applications. *Design Engineering*, *9*, 10144-10169.
- [20] Al-Falahy, N., & Alani, O. Y. (2019). Millimetre wave frequency band as a candidate spectrum for 5G network architecture: A survey. *Physical Communication*, *32*, 120-144.
- [21] Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., ... & Gutierrez, F. (2013). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work. *IEEE access*, *1*, 335-349.
- [22] Mahmood, A., Kiah, M. L. M., Azizul, Z. H., & Azzuhri, S. R. (2024). Analysis of Terahertz (THz) Frequency Propagation and Link Design for Federated Learning in 6G Wireless Systems. *IEEE Access*.
- [23] Bandy, Y., Mohammad Rather, G., & Begh, G. R. (2019). Effect of atmospheric absorption on millimetre wave frequencies for 5G cellular networks. *IET Communications*, *13*(3), 265-270.

- [24] Isanaka, L. P., & Meenakshi, M. (2022). Hybrid FSO/mmWave wireless system: a plausible solution for 5G backhaul applications. *Opto-Electronics Review*, 30.
- [25] Crane, R. K. (1982). A two-component rain model for the prediction of attenuation and diversity improvement (No. NAS 1.26: 169198).
- [26] ITU-R. (1999). *Recommendation ITU-R P.838-1 : Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. International Telecommunication Union. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-1-199910-S!!PDF-E.pdf
- [27] Carneiro de Souza, L., de Souza Lopes, C. H., de Cassia Carletti dos Santos, R., Cerqueira Sodré Junior, A., & Mendes, L. L. (2022). A study on propagation models for 60 GHz signals in indoor environments. *Frontiers in Communications and Networks*, 2, 757842.
- [28] Getahun, H., & Rajkumar, S. (2023). Performance analysis of mmWave radio propagations in an indoor environment for 5G networks. *Engineering Research Express*, 5(2), 025075.
- [29] Husain, S., Kunz, A., & Song, J. (2022). 3GPP 5G core network: An overview and future direction.
- [30] Manga, P. G. (2012). *Étude de performance d'une liaison sans fil OFDM dans un canal complexe*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (Canada).
- [31] Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., & Kang, C. G. (2010). *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*. John Wiley & Sons.
- [32] Mahind, U., & Kadam, M. (2016, December). BER performance of OFDM system in noise and fading channel for modified SL0 sparse algorithm. In *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)* (pp. 363-368). IEEE.
- [33] Chen, X., Soh, J., & Sharawi, M. S. (2024). *MIMO Antenna Systems for 5G and Beyond*. John Wiley & Sons.
- [34] Mane, P. R., Kumar, P., Ali, T., & Alsath, M. G. N. (2023). Planar MIMO antenna for mmWave applications: Evolution, present status & future scope. *Heliyon*, 9(2)
- [35] Sarra, M. A. H. I. (2018). Etude et implémentation d'algorithmes innovants de précodage MIMO associés aux codes LDPC.
- [36] Redondi, A. E., Innamorati, C., Gallucci, S., Fiocchi, S., & Matera, F. (2024). A Survey on Future Millimeter-Wave Communication Applications. *IEEE Access*.

Chapitre II: Communication optique en espace libre

II.1 Introduction

La communication optique en espace libre (FSO) est une technologie sans fil qui utilise la lumière pour transmettre des données à des débits allant jusqu'à 2,5 gigabits par seconde sur des distances allant de 100 mètres à plusieurs kilomètres. Bien qu'elle offre une large bande passante et un spectre non régulé, leur utilisation est entravée par les turbulences atmosphériques [1].

Ce chapitre fournit une description détaillée des systèmes de communication FSO, y compris les caractéristiques de l'émetteur, du canal et du récepteur d'un système FSO. Il aborde également les différents modèles atmosphériques exploités dans les systèmes FSO. En outre, il examine les avantages, les limitations et les applications des systèmes FSO.

II.2 Principe de fonctionnement des systèmes FSO

Les liaisons FSO utilisent des sources optiques pour transmettre des données à grande vitesse via la lumière visible ou l'infrarouge à travers un espace ouvert, nécessitant une LOS. L'émetteur FSO convertit les données électriques en impulsions lumineuses qui traversent l'atmosphère jusqu'à un récepteur FSO distant, et qui les reconvertit en un signal numérique pour le réseau désiré [2,3]. La modulation des données peut exploiter l'intensité, la phase ou la fréquence du faisceau lumineux dans le spectre 850-1550 nm [3].

Les liaisons FSO comprennent trois composants principaux qui travaillent ensemble pour assurer la transmission efficace des données : l'émetteur, le canal optique et le récepteur. La figure (II-1) illustre le schéma de principe du système FSO [4]. Dans cette section, chaque partie de ce système sera examinée en détail.

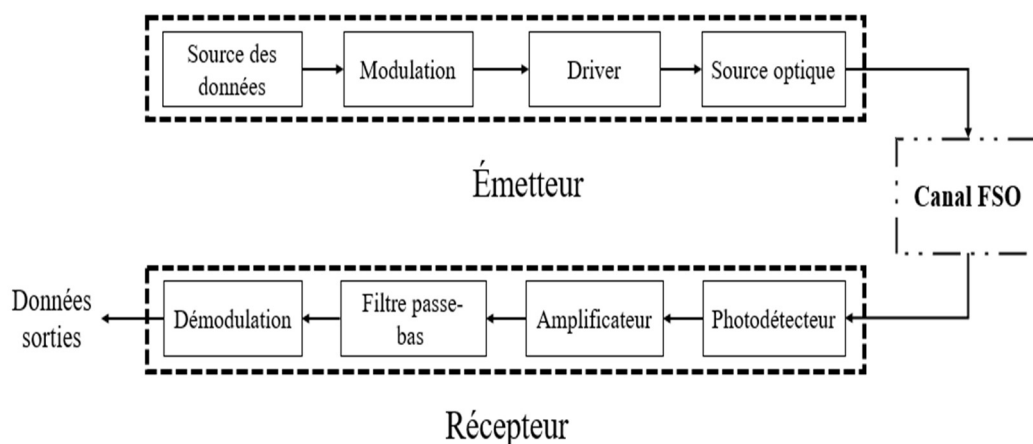


Figure II-1. Schéma de principe du système FSO.

II.2.1 Émetteur

Les éléments indispensables de l'émetteur se composent d'une source des données, d'un modulateur, d'un driver, d'une source optique. Les données provenant de la source d'information sont codées à l'aide de techniques adaptées à la communication optique, puis modulées sur un signal porteur optique. Le signal optique modulé est transmis à travers l'atmosphère jusqu'au récepteur [5].

Pour les systèmes de communication optique, les sources lumineuses utilisées doivent présenter plusieurs caractéristiques telles que la longueur d'onde appropriée, la largeur de raie, l'ouverture numérique, une radiance élevée avec une petite surface émettrice, une longue durée de vie, une fiabilité élevée et une bande passante de modulation élevée. Bien qu'il existe plusieurs sources lumineuses disponibles, les plus couramment utilisées dans les communications optiques sont les LED et les LD, qui reposent toutes deux sur l'excitation électronique de matériaux semi-conducteurs pour leur fonctionnement [6]. La source optique typique des systèmes FSO est une diode laser à semi-conducteurs (LD) ; en raison de leur profil de faisceau directionnel, elle est le plus souvent utilisée dans les applications extérieures telles que la communication FSO [3].

II.2.2 Canal optique

Les systèmes de communication FSO utilisent l'atmosphère comme moyen de propagation. L'absorption, la diffusion, la turbulence et les précipitations ont toutes un impact sur l'atténuation d'un signal optique lorsqu'il traverse le canal atmosphérique. La présence d'aérosols, de poussière, de fumée et de particules de différentes tailles contribue de manière significative à la diminution de la force du signal. L'équation (II-1) est un modèle mathématique du canal atmosphérique [7].

$$y(t) = \gamma\{x(t)h(t) + n(t)\} \quad (\text{II-1})$$

Dans cette équation, $y(t)$ est le signal optique reçu, $x(t)$ est le signal optique transmis, $h(t)$ est le modèle de turbulence du canal, γ est l'atténuation du canal (dB/km) et $n(t)$ est le signal de bruit. Le paramètre d'atténuation γ inclut les effets de l'absorption, de la diffusion, du brouillard, des pluies et de l'affaiblissement dû à la neige. Le paramètre de turbulence du canal $h(t)$ prend en compte les effets de la scintillation.

En plus d'affecter la force du signal, certaines conditions environnementales telles que le vent peuvent provoquer des mouvements de bâtiments, et ces effets peuvent perturber l'alignement du transmetteur et du récepteur. Pour atténuer ces effets, les systèmes FSO utilisent deux approches. Premièrement, un angle de divergence de faisceau plus large peut être utilisé

initialement. Deuxièmement, des systèmes de suivi actif peuvent être utilisés pour maintenir l'alignement du faisceau. Un autre problème pour les liaisons de communication FSO est la scintillation. La température des poches d'air séparées est affectée par l'air chaud montant depuis la base ou les toits. Par conséquent, l'indice de réfraction change au fil du temps lorsqu'il traverse la liaison FSO, provoquant des scintillations dans le faisceau. Le récepteur détecte ces scintillations sous forme de fluctuations de puissance [7,8].

II.2.2.1 Perte de canal atmosphérique

Les processus d'absorption et de diffusion sont des contributeurs majeurs à la perte dans le canal atmosphérique. L'interaction des photons se déplaçant à travers l'atmosphère avec les molécules existantes le long de leur trajet résulte en absorption, diffusion ou ligne de visée. Le processus d'absorption dépend de la longueur d'onde. Certains photons sont détruits, et leur énergie est transformée en chaleur, tandis que d'autres sont diffusés en raison des composants de particules.

En général, l'atténuation atmosphérique est décrite par l'équation (II-2) de la loi de Beer [9] :

$$\tau = e^{-\gamma L} \quad (dB) \quad (II-2)$$

Où, τ représente l'atténuation atmosphérique, γ désigne le coefficient d'atténuation total et L correspond à la distance entre l'émetteur et le récepteur (km).

L'équation (II-3) montre la somme des indices de diffusion et d'absorption des aérosols et des composants moléculaires de l'atmosphère.

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (II-3)$$

Où, $\alpha_m(\lambda)$ et $\alpha_a(\lambda)$ représentent les coefficients d'absorption moléculaire et d'aérosol, et $\beta_m(\lambda)$ et $\beta_a(\lambda)$ sont les coefficients de diffusion moléculaire et d'aérosol, respectivement.

La comparaison entre le rayon de la particule " r " et la longueur d'onde " λ " est utilisée pour calculer l'atténuation de la diffusion. La diffusion de Rayleigh est prédominante lorsque $r < \lambda$ et la diffusion géométrique se produit lorsque $r > \lambda$. Lorsque le rayon de la particule est similaire à la longueur d'onde $r \approx \lambda$, les phénomènes dominants sont les diffusions de Mie. Le tableau (II-1) résume la relation entre le type de particule, le rayon de la particule et les processus de diffusion [7,9].

Type de particule	Rayon de particule (μm)	Processus de diffusion
Molécules d'air	0.0001	Rayleigh
Particules de brume	0.01–1	Rayleigh-Mie
Gouttelettes de brouillard	1–20	Mie-géométrique
Pluie	100–10 000	Géométrique
Neige	1000–5000	Géométrique
Grêle	5000–50 000	Géométrique

Tableau II-1. Taille et type de mécanisme de diffusion des différentes molécules d'air présentes dans le milieu de transmission [9].

La représentation mathématique de l'atténuation spécifique due à la diffusion est donnée par l'équation (II-4) :

$$\beta_a(\lambda) = \frac{17}{V} \left(\frac{550}{\lambda} \right)^{0.195V} \quad (\text{dB/Km}) \quad (\text{II-4})$$

Où, V est la visibilité en km et λ est la longueur d'onde en nm. Il est observé que l'atténuation spécifique due à la diffusion est un processus dépendant de la longueur d'onde [7].

a. Atténuation causée par le brouillard

Dans les liaisons FSO, le brouillard représente la principale source de perte. En règle générale, les principales causes de diminution des signaux dans les systèmes FSO sont le brouillard et la fumée, qui sont des particules minuscules en suspension dans l'air.

Lorsque le faisceau optique interagit avec ces particules, il subit à la fois une absorption et une diffusion de Mie. Deux modèles bien connus, proposés par Kim et Kruse, sont utilisés pour décrire l'atténuation causée par le brouillard. L'atténuation spécifique du canal en dB/km est définie comme suit [7,9] :

$$\beta_{\text{brouillard}} = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-p} \quad (\text{dB/km}) \quad (\text{II-5})$$

Où, λ est la longueur d'onde de la diode laser, λ_0 désigne la longueur d'onde maximale de sensibilité pour l'œil humain, généralement fixée à 550 nm (c'est-à-dire la couleur verte), et p est le coefficient de distribution de taille de diffusion.

- Selon le modèle de Kim, p est donné comme :

$$p = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.16V + 0.34 & 1 < V < 6 \\ V - 0.5 & 0.5 < V < 1 \\ 0 & V < 0.5 \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

- Selon le modèle de Kruse, p est donné comme :

$$p = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.585V^{\frac{1}{3}} & V < 6 \end{cases} \quad (\text{II-7})$$

b. Atténuation causée par la pluie

Lorsque le signal optique traverse l'atmosphère, il est atténué de manière aléatoire par le brouillard et la pluie. Le principal facteur d'atténuation pour les liaisons optiques sans fil est le brouillard. Cependant, la pluie impose également une certaine atténuation. Lorsque la taille des gouttelettes d'eau de pluie devient suffisamment grande pour provoquer des processus de réflexion et de réfraction, ces gouttelettes causent une diffusion indépendante de la longueur d'onde. La plupart des gouttelettes de pluie tombent dans cette catégorie. L'atténuation augmente linéairement avec le taux de précipitation, et la taille moyenne des gouttelettes de pluie augmente avec le taux de précipitation, de l'ordre de quelques millimètres [10]. L'atténuation spécifique de la liaison optique sans fil pour un taux de pluie de R mm/heure est donnée par l'équation (II-8) [9,11] :

$$\beta_{\text{Pluie}} = 1.067R^{0.67} \quad (\text{dB/Km}) \quad (\text{II-8})$$

c. Atténuation causée par la neige

L'atténuation due à la neige correspond à la réduction de la puissance du signal optique lorsque le faisceau lumineux interagit avec les particules de neige présentes dans l'atmosphère. Lorsque le faisceau optique traverse des zones où il y a de la neige, les particules de neige peuvent absorber, diffuser ou dévier le faisceau, ce qui entraîne une diminution de son intensité. Cette atténuation est généralement représentée par une relation linéaire entre le taux de chute de neige et les paramètres a et b , comme donné par l'équation (II-9) [7] :

$$\beta_{\text{neige}} = aS^b \quad (\text{dB/Km}) \quad (\text{II-9})$$

Où, S est le taux de chute de neige en mm/hr, a et b sont des paramètres spécifiques à la nature de la neige.

Pour la neige sèche, les valeurs des paramètres sont :

$$a = 5.42 \times 10^{-5} + 5.4958776, b = 1,38$$

Pour la neige mouillée, les valeurs des paramètres sont :

$$a = 1.023 \times 10^{-4} + 3.7855466, b = 0.72$$

II.2.2.2 Turbulences atmosphériques (AT)

Les phénomènes de turbulence claire perturbent la propagation du faisceau optique en raison de fluctuations aléatoires, à la fois spatiales et temporelles, de l'indice de réfraction. Ces fluctuations sont causées par les variations de température, de pression et de vent le long du chemin de propagation optique. L'AT génère principalement des déphasages des signaux optiques en propagation, entraînant des distorsions du front d'onde. Ces distorsions, appelées aberrations optiques, entraînent également des distorsions d'intensité, connues sous le nom de scintillation. L'humidité, les aérosols, ainsi que les changements de température et de pression provoquent des variations de l'indice de réfraction dans l'air en entraînant des fluctuations aléatoires de densité. Ces variations, appelées tourbillons, agissent comme des lentilles sur la lumière qui les traverse. Lorsqu'une onde plane traverse ces tourbillons, certaines parties sont réfractées de manière aléatoire, ce qui entraîne une déformation de la frontière d'onde avec des effets combinés de variation d'intensité le long de la frontière d'onde et de déformation de la surface isophase [3,12].

II.2.2.3 Variation de l'indice de réfraction

Le paramètre de structure de l'indice de réfraction C_n^2 est le paramètre le plus significatif qui détermine la force de la turbulence et dépend de l'emplacement géographique, de l'altitude et de l'heure de la journée. Le plus grand gradient de température est associé aux valeurs les plus élevées de pression atmosphérique et de densité d'air près du sol. Par conséquent, la valeur du paramètre de structure de l'indice de réfraction devrait être plus élevée au niveau de la mer et plus petite à mesure que l'altitude augmente. Ainsi, le gradient de température diminue avec l'augmentation de l'altitude et donc la densité de l'air, ce qui entraîne une plus petite structure d'indice de réfraction. Sur le trajet horizontal, même sur une distance raisonnablement longue, le paramètre de structure de l'indice de réfraction peut être considéré comme pratiquement constant [13].

II.2.2.4 Scintillations

Dans le contexte des systèmes de communication FSO, la scintillation fait référence aux fluctuations de l'irradiance ou de l'intensité du signal optique reçu causées par les turbulences atmosphériques (AT). L'indice de scintillation, noté σ_i^2 , est un paramètre utilisé pour quantifier la force de ces fluctuations induites par la turbulence. Il est défini comme la variance normalisée de la fluctuation d'intensité, donnée par l'équation (II-10) :

$$\sigma_i^2 = \frac{E[I^2]}{E[I]^2} - 1 \quad (\text{II-10})$$

Où, $E[I^2]$ est la valeur attendue de l'intensité au carré et $E[I]^2$ est la valeur attendue de l'intensité.

L'indice de scintillation est directement lié au paramètre du canal et au paramètre du système, et peut être exprimé en fonction du paramètre de structure de l'indice de réfraction C_n^2 , du nombre d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, où λ est la longueur d'onde, et de la distance de liaison L en mètres [6].

Dans des conditions de turbulence faible, l'indice de scintillation σ_i^2 est approximativement égal à l'indice de scintillation de la variance de Rytov σ_R^2 . Pour un paramètre de structure de l'indice de réfraction atmosphérique C_n^2 constant, l'indice de scintillation dépend principalement de la longueur de liaison L puisque la longueur d'onde de la lumière reste constante.

La scintillation est un paramètre significatif pour les systèmes FSO, car elle provoque des fluctuations d'intensité dans la lumière transmise, même sur des distances de propagation relativement courtes. Comprendre et atténuer les effets de la scintillation est crucial pour concevoir des liaisons de communication FSO fiables [3,13].

II.2.2.5 Erreur de pointage (PE)

Outre les effets des turbulences atmosphériques, la qualité des liaisons FSO dépend également du pointage. Le PE correspond à la différence entre l'orientation désirée de l'antenne et sa position réelle actuelle. Cette erreur peut résulter d'un désalignement mécanique, d'erreurs dans les systèmes de suivi et de vibrations mécaniques dans le système. Ces erreurs de pointage provoquent des fluctuations (ou oscillations) d'amplitude du signal optique reçu dans le plan transversal, contribuant ainsi à la dégradation des performances de la liaison [3].

II.2.2.6 Modèles de turbulence atmosphérique

En outre, les ATs peuvent générer des variations rapides et aléatoires dans le signal optique, entraînant des fluctuations imprévisibles de l'intensité lumineuse. Par conséquent, la fiabilité de la liaison FSO dépend de la capacité à estimer avec précision ces fluctuations, généralement décrites par la fonction de densité de probabilité (PDF) du signal d'éclairement aléatoire. De nombreux modèles PDF ont été proposés pour modéliser les turbulences atmosphériques, en tenant compte à la fois des conditions de turbulence faible et forte, afin d'améliorer la conception et les performances des systèmes de communication FSO.

L'AT est principalement caractérisée par le paramètre de structure de l'indice de réfraction C_n^2 , également connu sous le nom de force de turbulence [3,6].

L'indice du paramètre de structure de réfraction C_n^2 est défini mathématiquement de la manière suivante [7,8] :

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{v}{27}\right)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp\left(\frac{-7}{100}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(\frac{-h}{1500}\right) + A_0 \exp\left(\frac{-h}{100}\right) \quad (\text{II-11})$$

Où, v représente la vitesse locale du vent perpendiculaire à la direction du déplacement (généralement de 21 m/s), A_0 est considéré comme la valeur nominale de $C_n^2(0)$ au niveau du sol en $m^{-2/3}$, et h désigne l'altitude en mètres. C_n^2 est supposé être de $1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ pendant la journée et $8.5 \times 10^{-15} m^{-2/3}$ de la nuit, près du sol. C_n^2 varie entre $10^{-12} m^{-2/3}$ pour une turbulence importante et $10^{-17} m^{-2/3}$ pour une turbulence légère, avec une valeur moyenne standard de $10^{-15} m^{-2/3}$.

Les PDF proposés pour ces canaux pour différents degrés de turbulence sont [6,7] :

- Log-normal ;
- Exponentielle négative ;
- Gamma-Gamma.

a. Log-normal

La distribution log-normale est un modèle largement adopté pour représenter la PDF de l'irradiance. Ce choix est justifié dans des conditions de faible turbulence et pour des distances de propagation relativement courtes (moins de 100 mètres). En considérant le modèle log-normal, la PDF du champ optique reçu I est donnée par l'équation (II-12) [3] :

$$f(I) = \frac{1}{I\sqrt{2\pi\sigma_I^2}} \exp\left(-\frac{(\ln(I/I_0) + \sigma_I^2/2)^2}{2\sigma_I^2}\right), I \geq 0 \quad (\text{II-12})$$

Où, I représente l'irradiance au niveau du récepteur, I_0 est l'irradiance du signal sans scintillation, σ_I^2 est la variance logarithmique de l'irradiance pour une onde plane, et elle est donnée par :

$$\sigma_I^2 \approx \sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (\text{II-13})$$

C_n^2 est le paramètre de structure de l'indice de réfraction, k est le nombre d'onde et L est la distance entre l'émetteur et le récepteur [6]. La figure (II-2) présente la PDF d'une distribution log-normale avec différentes valeurs de variance σ_I^2 . À mesure que la valeur de σ_I^2 augmente, la distribution devient plus asymétrique avec des queues plus longues en direction de l'infini. Cela indique l'ampleur des fluctuations de l'irradiance à mesure que l'inégalité du canal augmente.

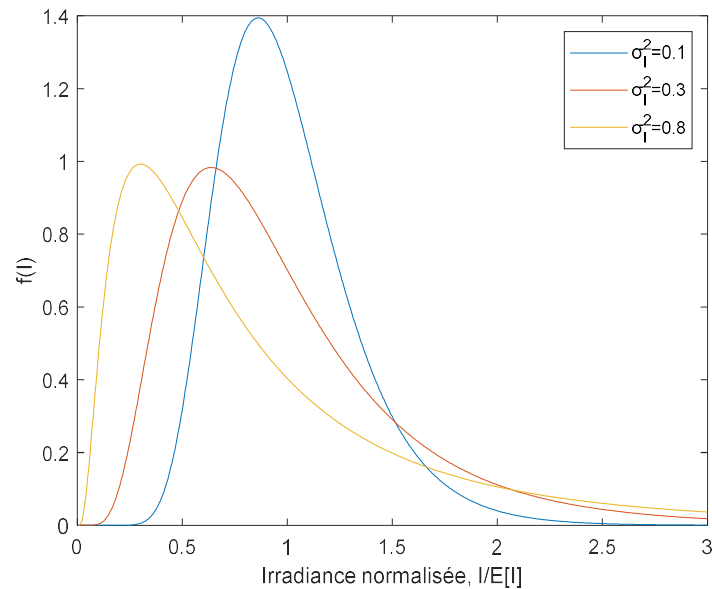


Figure II-2. PDF log-normale avec $E[I] = 1$ pour une plage de variance de l'irradiance logarithmique σ_I^2 .

b. Gamma-Gamma

Andrews et al. [13] ont introduit la théorie de Rytov modifiée et ont proposé la fonction de densité de probabilité (PDF) gamma-gamma comme un modèle mathématique utile pour la turbulence atmosphérique. Cette théorie de Rytov modifiée définit le champ optique en fonction des perturbations causées par les effets atmosphériques à petite échelle (diffusion) et à grande échelle (réfraction). Ce modèle prend en compte tous les régimes de turbulence, de modéré à fort. Dans le régime de saturation, le modèle se rapproche d'une distribution exponentielle négative. La fonction de distribution de l'irradiance gamma-gamma est calculée comme suit [6,7] :

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(\sqrt{2\alpha\beta I}), I \geq 0 \quad (\text{II-14})$$

La fonction $K_n(\cdot)$ désigne la fonction de Bessel modifiée du deuxième type d'ordre n , tandis que $\Gamma(\cdot)$ représente la fonction gamma. Les paramètres α et β représentent respectivement le nombre effectif de tourbillons à grande échelle et à petite échelle dans le processus de diffusion, et ils sont liés aux conditions atmosphériques selon les équations (II-15) et (II-16) :

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49 \cdot \sigma_R^2}{(1 + 1.11 \cdot \sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (\text{II-15})$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51 \cdot \sigma_R^2}{(1 + 0.69 \cdot \sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (\text{II-16})$$

Où, σ_R^2 est la variance de Rytov [6,14]. Une représentation graphique de cette distribution, basée sur l'équation (II-14), est illustrée dans la figure (II-3) pour trois régimes de turbulence distincts : faible, modéré et fort.

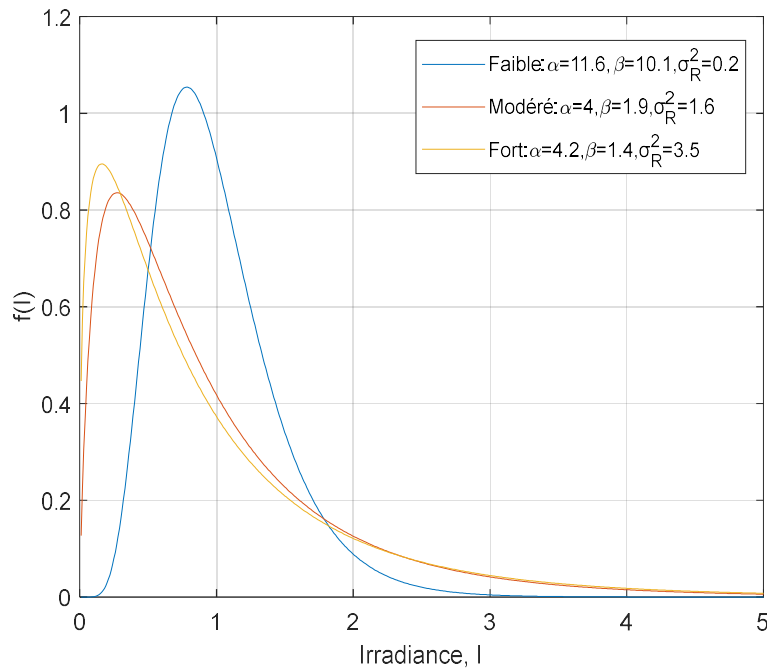


Figure II-3. PDF Gamma-gamma pour trois régimes de turbulence différents, à savoir faible, modéré et fort.

L'observation révèle qu'à mesure que la turbulence passe du régime faible au régime fort, la distribution s'étale davantage, entraînant une augmentation de l'étendue des valeurs possibles de

l'irradiance. Le modèle de turbulence gamma-gamma décrit par l'équation (II-14) est applicable à tous les scénarios de turbulence, qu'ils soient faibles ou forts. Les valeurs de α et β pour n'importe quel régime de turbulence donné peuvent être déterminées à partir des équations (II-15) et (II-16).

La figure (II-4) présente l'évolution des valeurs de α et β en fonction du paramètre de Rytov pour divers régimes de turbulence.

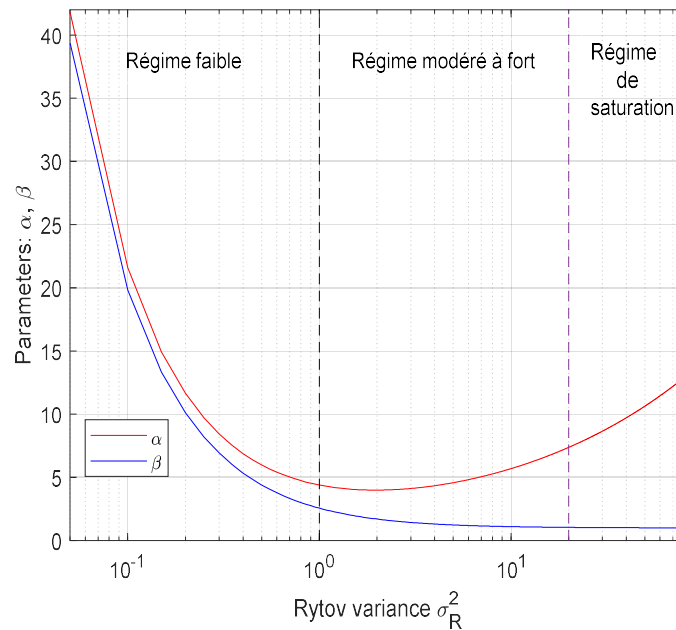


Figure II-4. Valeurs de α et β pour différents régimes de turbulence : faible, modéré à fort et saturation.

Dans le régime de turbulence très faible, $\alpha \gg 1$ et $\beta \gg 1$, comme le montre la figure (II-4). Cela signifie que le nombre effectif de tourbillons à petite et grande échelle est très élevé. Cependant, lorsque les fluctuations d'irradiance augmentent (au-delà de $\sigma_R^2 = 0.2$) et que l'on approche du régime de focalisation, α et β diminuent considérablement, comme illustré dans la figure (II-4). Au-delà du régime de focalisation (de modéré à fort) et en approchant du régime de saturation, β tend vers 1. Cela implique que le nombre effectif de petites cellules/tourbillons diminue finalement pour atteindre une valeur déterminée par le rayon de cohérence spatiale transversale de l'onde optique. Et, le nombre effectif de diffuseurs réfractifs discrets α augmente à nouveau avec l'augmentation de la turbulence et devient éventuellement non borné dans le régime de saturation. Dans ces conditions, la distribution gamma-gamma tend vers la distribution exponentielle négative.

c. Exponentielle négative

Dans le cas de fluctuations d'irradiance importantes (c'est-à-dire, dans le régime de saturation et au-delà), lorsque la distance entre les points de liaison couvre plusieurs kilomètres, le nombre de diffusions indépendantes devient élevé [6]. La variation de l'irradiance suit la distribution de Rayleigh, qui est caractérisée par des statistiques exponentielles négatives. La fonction de densité de probabilité (PDF) de la distribution exponentielle négative peut être calculée comme suit [6,7] :

$$f(I) = \frac{1}{I_0} \exp\left(-\frac{I}{I_0}\right), \quad I_0 \geq 0 \quad (\text{II-17})$$

Où $E[I] = I_0$ représente l'irradiance moyenne reçue. La figure (II-5) représente la PDF pour une distribution exponentielle négative avec différentes valeurs d'intensité de champ en espace libre.

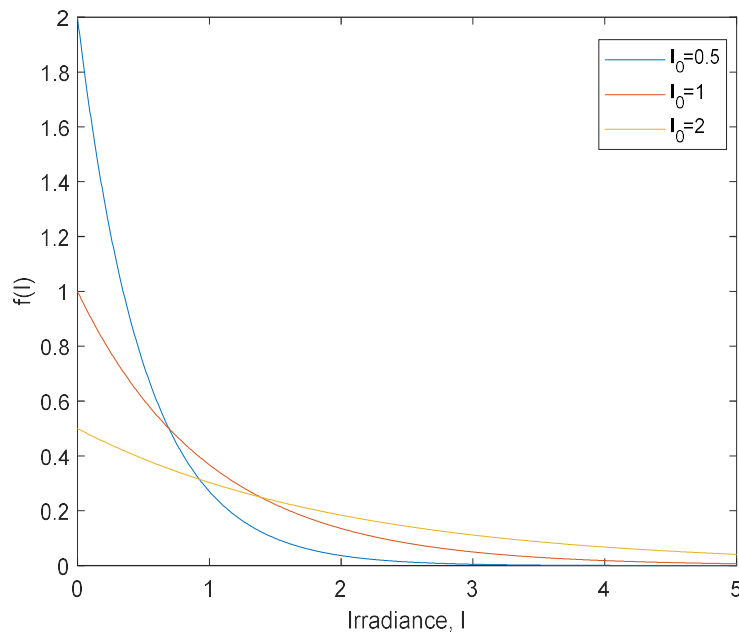


Figure II-5. PDF exponentielle négative pour différentes valeurs de I_0 .

II.2.3 Récepteur

Une fois que le signal lumineux a traversé le canal atmosphérique, il atteint le récepteur qui récupère la séquence binaire sous forme électrique. L'unité de réception est spécialement conçue avec un dispositif de détection ; il s'agit d'une photodiode (APD ou PIN) qui convertit un signal optique en un signal électrique. Comme le courant électrique est très faible, un amplificateur de puissance à gain élevé est ajouté pour rendre le courant photoélectrique de sortie suffisamment fort. Après l'amplification, le signal électrique est filtré par un filtre passe-bas pour minimiser le

bruit qu'il produit à la limite de la plage de passage du signal électrique avant de subir un traitement électronique pour analyser les données présentées [2].

II.2.3.1 Photodétecteurs

Il existe différents types de photodétecteurs qui peuvent être utilisés dans les récepteurs optiques. Les photodétecteurs PIN et APD sont les plus populaires et les plus largement utilisés car ils répondent aux exigences élevées de sensibilité et de réactivité [3].

a. Photodétecteurs PIN

Les photodétecteurs PIN sont constitués de matériaux semi-conducteurs à jonction P et N séparés par une région centrale légèrement dopée, avec une polarisation inverse appliquée pour améliorer la conversion photon-électron. Lorsque des photons dotés d'une énergie suffisante entrent en collision avec la matière, ils génèrent des paires électron-trou, qui sont collectées par le champ électrique dans la région intrinsèque. La longueur d'onde limite supérieure dépend de l'énergie de la bande interdite du matériau. Les photodétecteurs PIN offrent des débits binaires élevés, mais leur réponse reste inférieure à 1 [3,6].

b. Photodétecteurs APD

Les photodétecteurs APD assurent l'acquisition de courant par ionisation par avalanche, ce qui augmente leur sensibilité. Sa réponse comprend un facteur de multiplication, souvent supérieur à 1. Cependant, ce gain s'accompagne d'un bruit de multiplication et d'une sensibilité accrue à la température, qui sont des paramètres critiques à prendre en compte dans les systèmes de communication optique. Les APD offrent une sensibilité supérieure aux dispositifs PIN, mais avec des limitations supplémentaires liées au bruit et à la stabilité thermique [3,6].

II.3 Avantages et limitations

La technologie FSO présente une série d'avantages significatifs ainsi que des défis à relever [15,16] :

II.3.1 Avantages

- Flexibilité et vitesse supérieure : un réseau flexible offrant une vitesse supérieure à celle des connexions haut débit traditionnelles ;

- Installation facile et rapide : l'installation est simple, et prend moins de 30 minutes dans des conditions normales ;
- Faible investissement initial : nécessite un investissement initial relativement bas ;
- Déploiement simple : il est facile à déployer, sans nécessité de licence de spectre ni de coordination de fréquence entre les utilisateurs ;
- Débit de données élevé : assure un débit de données comparable à celui de la fibre optique ;
- Immunité aux interférences : résiste aux interférences radiofréquences et électromagnétiques ;
- Réutilisation spatiale dense : permet un nombre illimité de liaisons FSO dans une zone restreinte ;
- Faible consommation d'énergie : réduit la consommation d'énergie par bit transmis ;
- Bande passante élevée : fournit une bande passante relativement élevée ;
- Vitesse de la lumière : transmet le faisceau optique à la vitesse de la lumière.

II.3.2 Défis et limitations

- Les phénomènes atmosphériques comme la pluie, la fumée, la brume, le brouillard et la neige perturbent la communication FSO ;
- Des interférences de transmission peuvent se produire en raison du rayonnement solaire direct, surtout avec des têtes d'émetteur orientées est-ouest ;
- Les liaisons FSOs nécessitent une ligne de visée entre l'émetteur et le récepteur, limitant les emplacements d'installation ;
- Des pertes de diffusion et atmosphériques élevées, une consommation d'énergie plus élevée et des interruptions potentielles du faisceau par les oiseaux et les scintillements ;
- Les lasers de forte puissance peuvent présenter des risques pour la sécurité, et l'installation nécessite du personnel qualifié ;

II.4 Comparaison entre les liaisons FSO, RF et fibres optiques

Le système de communication FSO offre plusieurs avantages par rapport au système RF [16] :

- Les liaisons FSO dépassent les liaisons RF en termes de bande passante, de coûts d'exploitation et de vitesse d'installation ;
- Les systèmes FSO offrent des portées allant jusqu'à plusieurs kilomètres, adaptées aux systèmes de communication en cas de crise et militaires ;
- Le retour sur investissement des coûts pour les FSO est plus rapide par rapport à la construction de lignes de fibre optique ;

À l'avenir, la fibre optique pourrait être supplantée par le FSO pour les raisons suivantes [10] :

- L'optique étudie le comportement et les propriétés de la lumière ;
- Les fibres optiques peuvent transporter un faisceau laser sur de longues distances ;
- La plupart des récents efforts de déploiement de nouvelles infrastructures en fibre optique visent à étendre le réseau vers de nouveaux centres de distribution, plutôt qu'à connecter directement les clients ;
- Contrairement à la fibre optique, le FSO utilise des lasers pour transmettre les données à travers l'air, plutôt que de les encapsuler dans une fibre de verre.

II.5 Techniques de modulation employées dans les systèmes FSO

Les avantages des systèmes de communication FSO sont indiscutables et la question la plus pressante est la turbulence atmosphérique qui induit la scintillation. En conséquence, cela réduit la qualité du signal et augmente le taux d'erreur binaire (BER) [17]. À cet égard, la sélection et la conception d'un schéma de modulation approprié deviennent extrêmement importantes.

La modulation On-Off Keying (OOK) est simple et efficace en termes de bande passante, mais est affectée par les perturbations atmosphériques. Néanmoins, la modulation de phase apprécie cette température car elle est plus précise et s'adapte mieux aux mauvais états du canal FSO [14]. Des recherches récentes ont été réalisées sur différents schémas de modulation tels que OOK, BPSK, 16-PSK, M-PPM et M-QAM pour les tester dans différentes conditions météorologiques, et ces résultats indiquent que 16-PPM est hautement résistant à ces conditions environnementales, en particulier au brouillard [18,19]. De plus, il est également plus efficace en énergie par rapport aux autres types de M-PPM, M-PSK et M-QAM, où le BER diminue avec des valeurs plus élevées de M, mais M-PSK et M-QAM augmentent [17]. De plus, la modulation L-

PPM est jugée meilleure car elle économise de l'énergie en réduisant la puissance nécessaire à mesure que le nombre de bits augmente [20].

II.6 FSO et préoccupations relatives à la sécurité humaine

Assurer la sécurité oculaire est essentiel pour l'utilisation des liens FSO, notamment lors de l'alignement et de l'exploitation quotidienne. L'utilisation de dispositifs tels que des télescopes ou des jumelles par les techniciens, ainsi que le risque pour des individus non autorisés de traverser le faisceau laser, nécessite une attention particulière. La norme internationale IEC 60825 spécifie les niveaux de radiation sûrs pour les humains, établissant une exposition maximale admissible basée sur des facteurs comme l'intensité, la longueur d'onde, la durée de l'impulsion, et les caractéristiques des tissus exposés [21]. Les dispositifs laser sont classifiés selon la longueur d'onde et la densité de puissance de leur radiation. Les systèmes FSO doivent respecter les normes de la classe 1, tandis que les équipements optiques relèvent de la classe 1M.

La recherche indique que les densités de puissance admissibles pour les systèmes FSO fonctionnant aux longueurs d'onde de 1550 nm et 800 nm sont respectivement de 100 mW/cm² et 2.0 mW/cm² [22]. Par conséquent, pour une lentille émettrice avec un diamètre de 100 mm, la puissance laser peut-être augmentée à 160 mW pour $\lambda = 800$ nm et jusqu'à 8 W pour $\lambda = 1550$ nm. Ainsi, la radiation à 1550 nm peut être émise avec 50 fois plus de puissance qu'à 800 nm, ce qui rend les sources de rayonnement infrarouge préférables pour les systèmes FSO afin d'assurer la sécurité oculaire.

Les liens lumineux visibles ou ultraviolets sont évités en raison d'une énergie photonique plus élevée, posant un danger accru. De plus, les systèmes basés sur la lumière visible peuvent involontairement révéler les faisceaux à l'œil nu la nuit en raison de la diffusion de la lumière, soulignant davantage l'importance des considérations de sécurité oculaire [23,16].

II.7 Applications des systèmes FSO

Les liaisons de communication FSO sont actuellement utilisées pour de nombreux services dans de nombreux endroits. Ces utilisations sont décrites en détail ci-dessous [10,16] :

- Accès sans fil en extérieur : les fournisseurs de services sans fil peuvent utiliser les liaisons FSO pour la communication, et aucune licence n'est nécessaire, contrairement aux bandes de micro-ondes.

- Accès du dernier kilomètre : les câbles de raccordement des utilisateurs dans le dernier kilomètre sont coûteux pour les fournisseurs de services en raison du coût élevé du creusement pour poser des fibres. Les liaisons FSO peuvent résoudre ce problème en les implémentant dans le dernier kilomètre avec d'autres réseaux, offrant une liaison haut débit.
- Connectivité d'entreprise : les systèmes FSO sont facilement installables et peuvent être utilisés pour interconnecter des segments LAN afin de relier deux bâtiments ou d'autres propriétés.
- Sauvegarde de fibre : les liaisons FSO peuvent servir de lien de secours en cas de défaillance de la transmission via le lien en fibre.
- Extensions de réseau métropolitain : elles peuvent être utilisées pour étendre les anneaux de fibre d'une zone métropolitaine existante. Les systèmes FSO peuvent être déployés plus rapidement et la connexion des nouveaux réseaux et de l'infrastructure principale est facilement réalisable.
- Accélération du service : elles peuvent également être utilisées pour fournir un service instantané aux clients pendant le déploiement de leur infrastructure en fibre.
- Accès WAN : les liaisons FSO sont bénéfiques dans les réseaux WAN où elles prennent en charge les services de données à haut débit pour les utilisateurs mobiles et les terminaux satellite, agissant comme une épine dorsale pour les réseaux à ressources partagées à haut débit.
- Communication entre points : Elles peuvent être utilisées pour communiquer entre des liens point à point, par exemple, entre deux bâtiments, deux navires, ou des liens point à multipoint, par exemple, depuis un avion vers le sol ou depuis un satellite vers le sol, pour une communication à courte et longue portée.
- Accès militaire : étant un système sécurisé et indétectable, il peut connecter de vastes zones en toute sécurité avec un temps de planification et de déploiement minimal, et convient donc aux applications militaires.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, la discussion sur les liaisons de communication FSO met en évidence les nombreux avantages de la technologie de communication FSO, tels que les faibles coûts, l'installation rapide et la possibilité de modifier l'équipement optique pour l'adapter à son utilisation. La bande passante élevée disponible et les débits importants en font un choix prometteur pour diverses applications, notamment les communications d'entreprise, la

vidéosurveillance, la reprise après sinistre et la transmission de données pour les réseaux cellulaires.

Cependant, les systèmes FSO sont confrontés à des défis en raison des conditions météorologiques telles que les turbulences, le brouillard, la pluie, la neige, ainsi que les perturbations atmosphériques, qui provoquent une atténuation et affectent les performances de transmission. Les solutions proposées comprennent l'augmentation de la capacité à transmettre la lumière dans les limites de sécurité et l'utilisation de puissantes techniques de modulation pour relever ces défis.

Malgré ces obstacles, le potentiel de la technologie FSO dans les systèmes de communication sans fil reste grand. Des efforts continus de recherche et de développement sont essentiels pour surmonter les limitations et améliorer les performances afin de tirer pleinement parti des communications FSO dans diverses applications.

Références bibliographiques du chapitre II

- [1] Zafar, S., & Khalid, H. (2021). Free space optical networks: applications, challenges and research directions. *Wireless Personal Communications*, 121(1), 429-457.
- [2] Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. (2023, March). FSO and MmWave Technologies for 5G Mobile Networks: A Survey. In *2023 International Conference on Advances in Electronics, Control and Communication Systems (ICAECCS)* (pp. 1-6). IEEE.
- [3] Mehnaz, N. (2019). Analysis of a FSO link for different modulation scheme under various turbulence conditions.
- [4] Altowij, K. S., Alkholidi, A., & Hamam, H. (2010). Effect of clear atmospheric turbulence on quality of free space optical communications in Yemen. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 3, 423-428.
- [5] Khalighi, M. A., & Uysal, M. (2014). Survey on free space optical communication: A communication theory perspective. *IEEE communications surveys & tutorials*, 16(4), 2231-2258.
- [6] Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2019). *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. CRC press.
- [7] Lakshmi Priya, I., & Meenakshi, M. (2022). Hybrid FSO/mmWave wireless system: A plausible solution for 5G backhaul applications. *Opto-Electronics Review*, e141950-e141950.
- [8] Siegel, T., & Chen, S. P. (2021). Investigations of free space optical communications under real-world atmospheric conditions. *Wireless Personal Communications*, 116(1), 475-490.
- [9] Ghassemlooy, Z., & Popoola, W. O. (2010). Terrestrial free-space optical communications. *Mobile and Wireless Communications Network layer and circuit level design*, 17, 355-391.
- [10] Abdulsalam, A., & Khaleel, S. A. (2014). Free Space Optical Communications-Theory and Practices. *Contemporary Issues in Wireless Communications, 1th ed. croatia: intech*, 159-212.
- [11] Malik, S., & Sahu, P. K. (2020). Free space optics/millimeter-wave based vertical and horizontal terrestrial backhaul network for 5G. *Optics Communications*, 459, 125010
- [12] Abadi, M. M. (2017). *A hybrid free space optics/radio frequency antenna-design and evaluation*. University of Northumbria at Newcastle (United Kingdom).
- [13] Andrews, L. C., Phillips, R. L., & Hopen, C. Y. (2001). *Laser beam scintillation with applications* (Vol. 99). SPIE press.

- [14] Anandkumar, D., & Sangeetha, R. G. (2021). A survey on performance enhancement in free space optical communication system through channel models and modulation techniques. *Optical and Quantum Electronics*, 53, 1-39.
- [15] Malik, A., & Singh, P. (2015). Free space optics: current applications and future challenges. *International journal of optics*, 2015.
- [16] Garlinska M, Pregowska A, Masztalerz K, Osial M. From Mirrors to Free-Space Optical Communication—Historical Aspects in Data Transmission. *Future Internet*. 2020; 12(11):179. <https://doi.org/10.3390/fi12110179>
- [17] Maswikang, S. P., Owolawi, P. A., Oio, S. O., Mphahlele, M. I., & Mahlobogwane, Z. L. (2020, September). Investigation of different modulation techniques under strong FSO turbulence channel in South Africa. In *2020 Asia Conference on Computers and Communications (ACCC)* (pp. 75-81). IEEE.
- [18] Kappala, V. K., Pradhan, J., Sahu, M., Turuk, A. K., & Das, S. K. (2021, August). Performance analysis of fso for different modulation techniques under atmospheric turbulence with pointing errors. In *2021 2nd international conference on range technology (ICORT)* (pp. 1-5). IEEE.
- [19] Sahu, M., Kiran, K. V., & Das, S. K. (2018, March). FSO link performance analysis with different modulation techniques under atmospheric turbulence. In *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)* (pp. 619-623). IEEE.
- [20] Malik, S., & Sahu, P. K. (2020). Performance analysis of free space optical communication system using different modulation schemes over weak to strong atmospheric turbulence channels. In *Optical and Wireless Technologies: Proceedings of OWT 2018* (pp. 387-399). Springer Singapore.
- [21] International Electrotechnical Commission. Available online : <https://webstore.iec.ch/publication/62424> (accessed on 25 September 2020).
- [22] Timus, O. Free Space Optics Communication for Navy Surface Ship Platforms; Naval Postgraduate School U.S.: Monterey, CA, USA, 2004; pp. 1–90.
- [23] Kaushal, H., Jain, V. K., Kar, S., Kaushal, H., Jain, V. K., & Kar, S. (2017). Overview of wireless optical communication systems. *Free Space Optical Communication*, 1-39.

**Chapitre III: Étude et conception d'un système
hybride FSO/MMW**

III.1 Introduction

Parmi les technologies les plus prometteuses pour les réseaux de communication modernes, les systèmes hybrides FSO/MMW occupent une place centrale. Ces systèmes sont largement utilisés pour leurs performances supérieures en termes de débit, de portée et de fiabilité, notamment dans les applications nécessitant une transmission de données à haut débit, telles que les réseaux 5G, les communications terrestres longue distance et les connexions dans des environnements difficiles.

Dans ce chapitre, nous introduisons les concepts clés des systèmes de communication hybrides FSO/MMW, en mettant en lumière les deux principales configurations qui définissent ces systèmes : les architectures parallèles et les architectures en série. Nous procédons également à une analyse approfondie d'une architecture hybride spécifique, qui exploite les atouts complémentaires des technologies FSO et MMW. Enfin, nous examinons les performances de ce système hybride dans divers contextes opérationnels afin de mieux comprendre son potentiel et ses limitations.

III.2 Les systèmes de communication hybrides FSO/MMW

Les systèmes hybrides FSO/MMW combinent les technologies FSO et MMW pour surmonter leurs limitations respectives et fournir des communications fiables et performantes. La liaison FSO se caractérise par une bande passante élevée et une sécurité renforcée, mais elle est sensible aux perturbations atmosphériques telles que le brouillard, les turbulences atmosphériques (AT) et les erreurs de pointage (PE). En revanche, le lien MMW est plus résistant face à ces conditions et possède une bande passante plus faible, mais reste très vulnérable à l'atténuation due à la pluie. En combinant ces deux technologies, les systèmes hybrides tirent parti de leur complémentarité pour assurer une transmission continue, robuste et s'adaptant aux environnements complexes. Voici les principaux avantages d'un système hybride FSO/MMW [2] :

- Complémentarité technologique : l'utilisation conjointe de FSO et de MMW combine la capacité élevée de l'un et la robustesse environnementale de l'autre.
- Fiabilité accrue : la combinaison des liens assure une continuité de service, même en cas de défaillance temporaire de l'un des canaux.

- Optimisation des performances : en exploitant les caractéristiques spécifiques des deux technologies, il est possible d'adapter le système à une large gamme de scénarios opérationnels.
- Résilience environnementale : les limitations du FSO face à des conditions météorologiques défavorables peuvent être compensées par la robustesse du lien MMW, et vice versa.

III.3 Applications des systèmes hybrides FSO/MMW

Les systèmes hybrides FSO/MMW offrent des débits élevés, une fiabilité accrue et une résistance aux conditions météorologiques défavorables, ce qui les rend incontournables dans divers domaines d'application. Voici les principales applications des systèmes hybrides FSO/MMW :

III.3.1 Réseaux de raccordement pour les générations futures

Les systèmes hybrides FSO/MMW offrent une alternative économique à la fibre optique tout en assurant une connectivité à haut débit. En combinant la capacité des liaisons FSO et la fiabilité des liaisons MMW, ces systèmes créent des réseaux robustes capables de résister à des conditions climatiques variées. Les applications incluent le raccordement des stations de base cellulaires, la connectivité des navires, les zones isolées et les communications spatiales. Les techniques de diversité coopérative renforcent davantage la résilience de ces réseaux hybrides en atténuant les effets de fading et en étendant leur portée [3].

III.3.2 Communication par satellite

La technologie FSO, lorsqu'elle est intégrée aux liaisons RF, joue un rôle clé dans les systèmes de communication par satellite. Les liaisons FSO sol-satellite sont sensibles aux turbulences atmosphériques et aux atténuations dues aux conditions météorologiques, en particulier sur le lien station au sol (GS)-plateforme à haute altitude (HAPs). Les systèmes hybrides FSO/MMW surmontent ces défis en associant la grande capacité des liaisons FSO à la fiabilité des liaisons MMW. Les HAPs servent de relais pour atténuer la dégradation des canaux et offrir une diversité spatiale distribuée, garantissant une communication fiable entre les stations au sol et les satellites [4,5].

III.3.3 Interconnexion des réseaux et connectivité des campus

Les systèmes hybrides FSO/MMW offrent une alternative efficace aux connexions par fibre optique pour des communications ultra-rapides entre bâtiments dans des environnements d'entreprise ou de campus. Ces systèmes prennent en charge divers types de trafic, notamment la voix, les données multimédia et non multimédia, sans les coûts élevés associés aux installations de fibres optiques dédiées [4].

III.3.4 Autres applications

- Surveillance vidéo et diffusion : les systèmes hybrides prennent en charge la transmission vidéo en haute définition pour une surveillance en temps réel dans les applications commerciales, de sécurité publique et militaires. Ils permettent également la diffusion d'événements en direct grâce à une connectivité fiable entre caméras, véhicules et bureaux centraux [6,7].
- Réponses aux catastrophes : en cas d'urgence ou de catastrophe naturelle, les systèmes hybrides permettent une mise en place rapide de liaisons temporaires, grâce à la nature sans fil des liaisons FSO [4].

III.4 Catégories des systèmes hybrides FSO/MMW

Les systèmes hybrides FSO/MMW peuvent être classés en deux grandes catégories en fonction de leur configuration et de leur mode de fonctionnement : les systèmes parallèles et les systèmes en série.

III.4.1 Systèmes hybrides en parallèle

Dans cette configuration, les canaux FSO et MMW fonctionnent simultanément et indépendamment. Un contrôleur hybride surveille la qualité de chaque canal en temps réel et sélectionne la meilleure liaison en fonction des conditions météorologiques. Si la liaison FSO est défaillante en raison de facteurs tels que le brouillard ou des erreurs de pointage (PE), le système bascule automatiquement vers la liaison MMW, comme le montre la figure (III-1). Cette architecture garantit la continuité du service, car au moins un des canaux reste toujours disponible. Elle est particulièrement bien adaptée aux environnements dynamiques où les conditions de propagation varient rapidement [8,9].

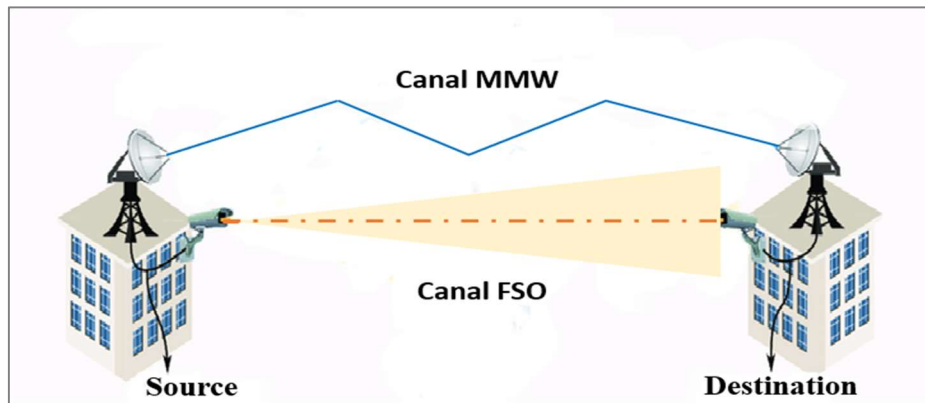


Figure III-1. Architecture des systèmes hybrides en parallèle.

III.4.2 Systèmes hybrides en série (ou systèmes mixtes)

Dans une configuration en série, les données transitent successivement par le lien FSO, puis par le lien MMW (ou l'inverse) avant d'atteindre leur destination, comme le montre la figure (III-2). Cette approche, également appelée systèmes mixtes, vise à tirer parti des forces complémentaires des deux technologies. En combinant leurs capacités, elle permet d'augmenter la distance de transmission et d'améliorer la fiabilité. Les données étant réparties sur plusieurs chemins, cette configuration est idéale pour des scénarios nécessitant une redondance accrue et une meilleure qualité de transmission globale [10, 11].

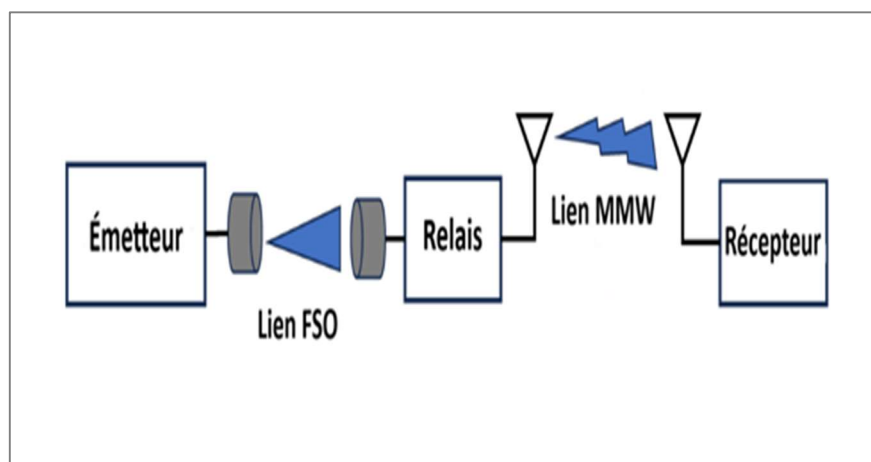


Figure III-2. Architecture des systèmes hybrides en série.

III.5 Étude et amélioration d'un système de communication hybride FSO/MMW sous PE pour le réseau 5G

Les systèmes de communication hybrides FSO/MMW ont suscité un intérêt croissant, avec de nombreuses recherches axées sur leurs performances dans divers scénarios et configurations.

Cependant, il est bien établi que ces systèmes souffrent d'une dégradation significative de leurs performances dans des conditions atmosphériques défavorables. Ces limitations compromettent leur efficacité, en particulier lorsqu'il s'agit de garantir une transmission fiable dans des environnements réels.

Une solution prometteuse pour surmonter ces défis réside dans la mise en œuvre d'un système hybride combinant les technologies MIMO-FSO et MIMO-MMW, associé à des techniques de modulation avancées pour la liaison FSO, notamment NRZ-OOK, BPSK, QPSK et M-PPM. Cette approche offre des avantages substantiels en exploitant la complémentarité des canaux FSO et MMW tout en utilisant la diversité spatiale du MIMO. Grâce à cette intégration, les contraintes identifiées dans les études précédentes, telles que les effets des turbulences atmosphériques (AT) et les erreurs de pointage (PE), peuvent être efficacement atténuées, ce qui conduit à une amélioration significative des performances, notamment à une réduction notable du BER.

Pour fournir une vision claire des méthodologies employées, la figure (III-3) présente un schéma détaillé des étapes suivies pour concevoir et analyser le système proposé. Ces étapes incluent la modélisation des canaux FSO et MMW, l'intégration de diverses techniques de modulation et l'évaluation comparative des performances en termes de BER dans différents scénarios atmosphériques. Cette étude apporte une contribution essentielle à l'optimisation des systèmes hybrides FSO/MMW, ouvrant la voie à des solutions de communication plus fiables et performantes pour répondre aux exigences croissantes des réseaux 5G.

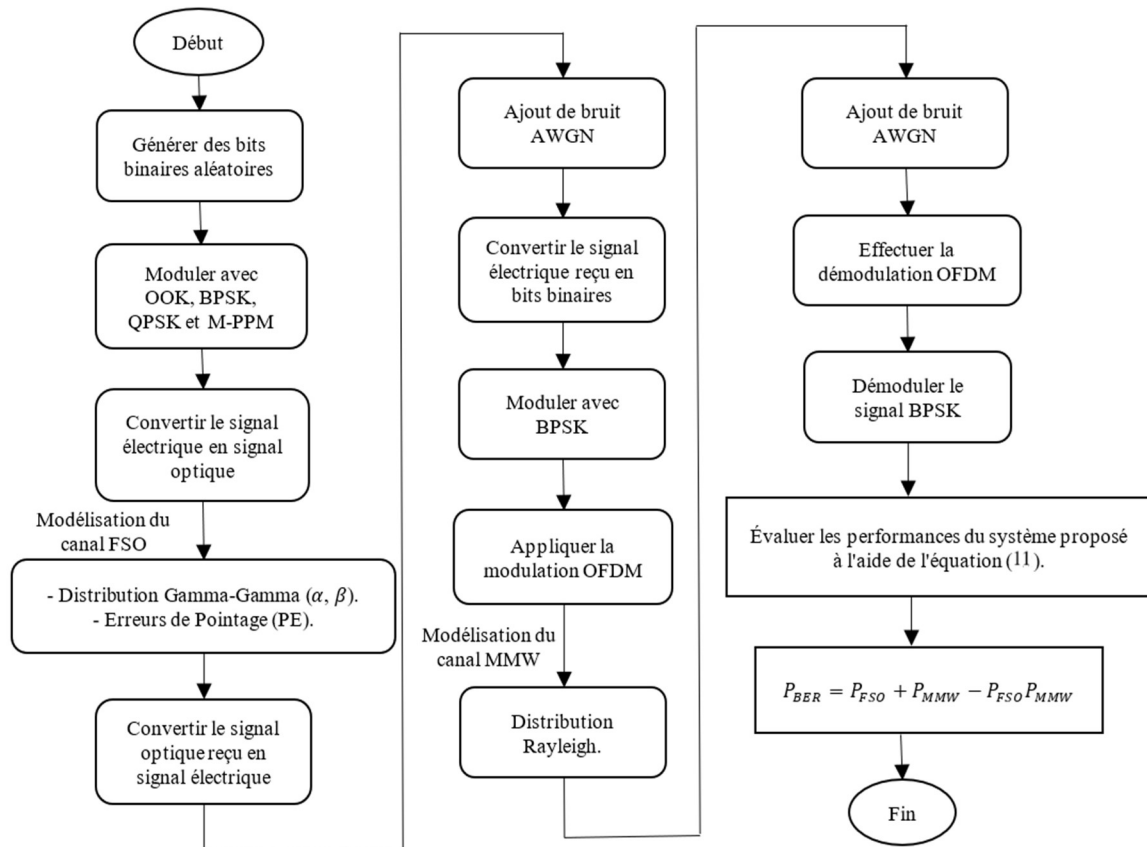


Figure III-3. Algorithme de simulation et d'évaluation des performances du système proposé.

III.5.1 Système MIMO-FSO/MIMO-MMW proposé

Le système de communication relais hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW constitue élément clé des réseaux 5G, car il répond aux exigences strictes en termes de débit, de fiabilité et de couverture dans des environnements complexes. La figure (III-4) illustre une architecture typique où un nœud source transmet des données via une liaison FSO vers une BS, qui relaie ensuite les données vers l'utilisateur final à l'aide d'une liaison MMW. Cette configuration met en évidence la complémentarité des technologies FSO et MMW.

La communication débute par l'émission de signaux optiques depuis la source à l'aide de plusieurs antennes optiques. Ces signaux traversent un canal FSO, souvent soumis à des perturbations comme les turbulences atmosphériques (AT) et les erreurs de pointage (PE), avant d'être captés par la station de base. À ce stade, les signaux optiques sont convertis en signaux électriques grâce à un convertisseur optique-électrique (O/E). Ces signaux électriques sont ensuite transmis à destination via un canal MMW, à l'aide de plusieurs antennes MMW. Enfin, les signaux sont réceptionnés, décodés et interprétés par l'utilisateur final, complétant ainsi la transmission.

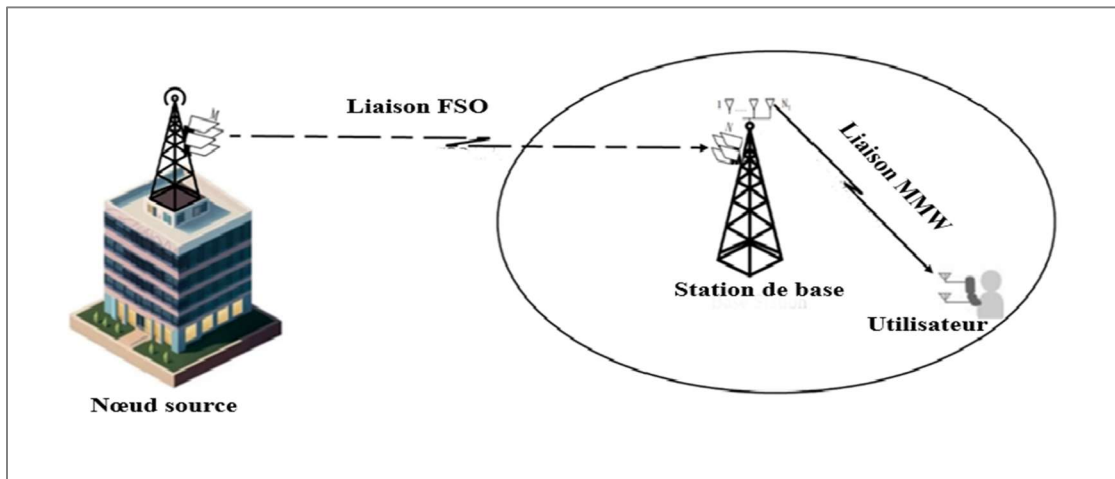


Figure III-4. Illustration schématique du modèle proposé.

L'objectif principal de ce système est d'améliorer les performances globales, notamment en réduisant le BER, tout en atténuant les effets négatifs des perturbations, telles que le fading, les erreurs de pointage (PE) et les turbulences atmosphériques (AT). Ces efforts permettent de renforcer la résilience du système face aux conditions défavorables, contribuant ainsi à la mise en place de réseaux 5G hybrides plus robustes et fiables.

III.5.1.1 Sous-système FSO

Le sous-système FSO est une composante essentielle du système hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW. À travers le canal MIMO-FSO, qui utilise la technique de modulation d'intensité/détection directe (IM/DD), les données du signal original, représentées par le symbole x , sont transmises avec précision depuis le nœud source vers la station de base (BS). Le signal reçu au BS, noté $y_{1,mn}$ peut-être exprimé mathématiquement comme suit :

$$y_{1,mn} = \eta \cdot x \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{1,mn} + \sum_{n=1}^N b_{1,n} \quad (\text{III-1})$$

L'intensité I_{mn} représente l'irradiance normalisée provenant du $m^{\text{ème}}$ émetteur vers le $n^{\text{ème}}$ récepteur, tandis que η désigne l'efficacité du récepteur à convertir la lumière en signal électrique. De plus, $b_{1,n}$ correspond au bruit blanc additif Gaussien (AWGN) présent dans le $n^{\text{ème}}$ récepteur, caractérisé par une moyenne nulle et une variance σ^2 [12].

On suppose que le lien MIMO-FSO est soumis à un phénomène de fading Gamma-Gamma. Pour $M \cdot N$ variables aléatoires Gamma-Gamma statistiquement indépendantes et identiquement distribuées, la PDF est donnée comme suit [12] :

$$f_{\gamma_{FSO}}(\gamma) = 2 \left(\frac{\alpha_s \beta_s}{M \cdot N} \right)^{\frac{\alpha_s + \beta_s}{2}} \gamma^{\frac{\alpha_s + \beta_s}{4} - 1} K_{\alpha_s - \beta_s} \left(2 \sqrt{\frac{\alpha_s \beta_s}{MN}} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{FSO}}} \right) \quad (\text{III-2})$$

Où γ représente le SNR instantané de la liaison FSO, et $\bar{\gamma}_{FSO}$ désigne le SNR moyen de cette même liaison. Les termes $\alpha_s = M \cdot N \cdot \alpha$, $\beta_s = M \cdot N \cdot \beta$ sont des paramètres du modèle associés à la distribution d'irradiance Gamma-Gamma, où α et β sont définis par les équations (II-15) et (II-16) [13].

Une technique pour simuler le PE dans le système consiste à supposer que les déplacements en élévation et en direction horizontale (c'est-à-dire le balancement) suivent des distributions gaussiennes indépendantes et identiquement distribuées. L'erreur de pointage sur la $j^{\text{ème}}$ antenne réceptrice est alors décrite par la PDF suivante [13] :

$$f(h_j^p) = \frac{\phi^2}{A_0 \phi^2} (h_j^p \phi^{2-1}), \quad 0 < h_j^p < A_0 \quad (\text{III-3})$$

Le paramètre $\phi = \frac{\omega_{zeq}}{2\sigma_s}$ est défini comme le rapport entre le rayon équivalent du faisceau ω_{zeq} au récepteur et l'écart-type de PE σ_s . Le paramètre ϕ représente le "jitter", au niveau du récepteur.

$A_0 = [\text{erf}(v)]^2$ est exprimé comme le carré de la fraction de puissance collectée à $r = 0$, et $\omega_{zeq} = \omega_z^2 \frac{\sqrt{\pi} \cdot \text{erf}(v)}{2v \cdot \exp(-v^2)}$ représente la largeur équivalente du faisceau, où $v = \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} \right) \frac{R_a}{\omega_z}$, ω_z est la largeur du faisceau, et R_a désigne le rayon de l'ouverture du récepteur.

Dans [13], une nouvelle approche pour estimer la PDF pour l'agrégat de canaux $M \cdot N$ Gamma-Gamma, en tenant compte de la présence de PE, est présentée. La PDF, telle que définie dans leur recherche, est décrite par la représentation mathématique suivante :

$$f_{\gamma_{FSO,p}}(\gamma) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=0}^n \Lambda(v, n, i) \frac{2^{L \cdot g - \alpha_s - \beta_s + 1}}{\Gamma(\alpha_s) \cdot \Gamma(\beta_s)} L^L \cdot g^L \left(\frac{\alpha_s \beta_s}{A_0 \cdot \omega} \cdot \frac{MN}{F} \right)^{\frac{L \cdot g}{2}} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{FSO}} \right)^{\frac{L \cdot g}{4}} (\gamma)^{\frac{L \cdot g}{4} - 1} \times$$

$$G_{L, L+1}^{L+1, 0} \left(2 \sqrt{\frac{\alpha_s \beta_s}{A_0 \cdot \omega} \cdot \frac{MN}{F}} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{FSO}}} \left| \begin{matrix} 1, 1, \dots, 1 \\ 2\beta_s + i - L \cdot g, 0, \dots, 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (\text{III-4})$$

Où les coefficients $\Lambda(v, n, i)$ sont définis comme suit :

$$\Lambda(v, n, i) = \frac{(-1)^i \sqrt{\pi} \Gamma(2v) \Gamma\left(\frac{1}{2} + n - v\right) L(n, i)}{2^{v-i} \Gamma\left(\frac{1}{2} - v\right) \Gamma\left(\frac{1}{2} + n + v\right) n!} \quad (\text{III-5})$$

Ces coefficients impliquent les nombres de Lah $L(n, i) = \binom{n-1}{i-1} \frac{n!}{i!}$, pour $n, i > 0$, et $v = \alpha_s - \beta_s$ représente l'ordre de la fonction de Bessel modifiée de deuxième espèce. $\Gamma(\cdot)$ est la fonction Gamma, et $G_{\dots; \dots}[\dots]$ représente la fonction Gamma-Gamma de Meijer. Le facteur de correction F est défini par : $F = \frac{(2+g.L)^L}{L^L g^{L-1} (2+g)}$, où $g = 2\phi^2$ désigne le paramètre lié au désalignement.

Dans l'analyse du lien SISO-FSO, on suppose que l'PE et la turbulence Gamma-Gamma ont un impact sur le canal. La PDF générée qui régit le comportement de ce lien est définie comme suit [14] :

$$f_{\gamma_{FSO,p}}(\gamma) = \frac{\phi^2}{2\gamma \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left(\alpha \cdot \beta \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{FSO}}} \middle| \phi^2 + 1, \phi^2, \alpha, \beta \right) \quad (\text{III-6})$$

III.5.1.2 Sous-système MMW

Le vecteur du signal reçu pour le lien MMW avec M antennes de transmission et N antennes de réception, qui utilise la modulation BPSK-OFDM, peut être écrit comme suit :

$$y_{2,mn} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{1,mn} h_{2,mn} + \sum_{n=1}^N b_{2,n} \quad (\text{III-7})$$

Où $y_{1,mn}$ est le signal transmis entre l'antenne $m^{\text{ème}}$ de transmission et l'antenne $n^{\text{ème}}$ de réception sur le canal MIMO-MMW, et $b_{2,n}$ représente la composante de AWGN avec une moyenne nulle et une variance non nulle. Le coefficient d'atténuation sur le lien MIMO-MMW, noté $h_{2,mn}$, est supposé suivre une distribution de Rayleigh, avec la fonction de répartition cumulative (CDF) du SNR instantané γ exprimée comme suit [13] :

$$F_{\gamma_2}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}\right) \sum_{u=0}^{MN-1} \frac{1}{u!} \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}\right)^u \quad (\text{III-8})$$

Où γ symbolise le SNR instantané du lien MMW et $\bar{\gamma}_2$ désigne le SNR moyen dans le canal MMW.

Dans le cadre de notre étude du lien SISO-MMW avec fading de Rayleigh, la CDF qui régit le comportement de ce lien peut être décrite comme suit [14] :

$$F_{\gamma_2}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_2}\right) \quad (\text{III-9})$$

La formule suivante décrit la perte de transmission globale utilisée dans les réseaux de communication MMW fonctionnant à une fréquence de 60 GHz [15] :

$$\text{Attenuation}_{dB} = 20 \times \log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) + 10 \times PLE_{NLOS} \times \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (\text{III-10})$$

Les variables λ , d_0 , et d représentent respectivement la longueur d'onde de la BS en mètres, la distance de référence en mètres et la distance estimée entre la BS et l'utilisateur MMW en mètres. L'exposant de perte de chemin dans des scénarios sans ligne de vue (NLOS) est représenté par PLE_{NLOS} .

III.5.2 Analyse du BER en présence de PE

Le BER représente le pourcentage de bits incorrects parmi toutes les données transférées lors d'un processus de communication. Nous considérons l'évaluation des taux d'erreur en bits P_{FSO} pour la communication sur le lien FSO et P_{MMW} pour la communication sur le lien MMW dans notre modèle de système hybride. Le BER global du système peut être représenté comme suit [16] :

$$P_{BER} = P_{FSO} + P_{MMW} - P_{FSO}P_{MMW} \quad (\text{III-11})$$

III.5.2.1 Analyse du BER d'un système hybride FSO/MMW en configurations SISO et MIMO

Dans le système hybride SISO-FSO/SISO-MMW, nous considérerons la modulation BPSK-OFDM pour le lien MMW et la modulation NRZ-OOK pour le lien FSO. Le BER peut être calculé comme suit :

- En utilisant l'équation (III-6), le P_{FSO} pour le lien FSO dans le système SISO peut être calculé [13] :

$$P_{FSO} = \int_0^{\infty} BER_{NRZ-O} f_{\gamma_{FSO,p}}(\gamma) d\gamma = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}}\sqrt{\gamma}\right) f_{\gamma_{FSO,p}}(\gamma) d\gamma \quad (\text{III-12})$$

- En utilisant l'équation (III-9), P_{MMW} pour la connexion MMW dans le système SISO peut être calculé [12] :

$$P_{MMW} = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-q\gamma} F_{\gamma_2}(\gamma) d\gamma \quad (\text{III-13})$$

Les valeurs spécifiques des paramètres $p = 1/2$ et $q = 1$ sont indiquées pour la modulation BPSK.

Dans le système hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW, nous pouvons utiliser les mêmes formules pour le BER, désignées par P_{FSO} et P_{MMW} , en remplaçant l'équation (III-6) par (III-4) pour P_{FSO} et l'équation (III-9) par (III-8) pour P_{MMW} .

III.5.2.2 Analyse et comparaison du BER de système hybride avec différentes techniques de modulation pour MIMO-FSO

Le choix de la bonne technique de modulation est essentiel, car il influence la performance du système en tenant compte des différents besoins et limitations. Ce qui suit est une description du BER d'un système MIMO-FSO avec différentes techniques de modulation [17] :

- Modulation QPSK : le P_{FSO} pour la modulation QPSK est donné par :

$$P_{FSO} = \int_0^\infty BER_{QPSK} f_{\gamma_{FSO,p}}(\gamma) d\gamma = \int_0^\infty \text{erfc}(\sqrt{\gamma}) f_{\gamma_{FSO,p}}(\gamma) d\gamma \quad (\text{III-14})$$

- Modulation BPSK : le P_{FSO} pour la modulation BPSK est donné par :

$$P_{FSO} = \int_0^\infty BER_{BPSK} f_{\gamma_{FSO,p}}(\gamma) d\gamma = \int_0^\infty \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\gamma}) f_{\gamma_{FSO,p}}(\gamma) d\gamma \quad (\text{III-15})$$

- Modulation M-PPM : le P_{FSO} pour la modulation M-PPM est donné par :

$$P_{FSO} = \int_0^\infty BER_{PPM} f_{\gamma_{FSO,p}}(\gamma) d\gamma = \int_0^\infty \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\gamma \times (M/2) \log_2 M} \right) f_{\gamma_{FSO,p}}(\gamma) d\gamma \quad (\text{III-16})$$

III.5.3 Résultats et discussions

Les performances du système hybride FSO/MMW en termes de BER sont évaluées en tenant compte de différentes conditions d'AT, de PE et de schémas de modulation. Cette analyse est menée de manière mathématique, et les figures suivantes fournissent une représentation visuelle des résultats obtenus. Pour modéliser l'AT dans la liaison FSO, un modèle Gamma-Gamma est utilisé, avec des paramètres définis comme suit : $C_n^2 = 1,7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ pour une turbulence

modérée et $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ pour une turbulence forte. Pour la liaison MMW, une distribution de Rayleigh est adoptée. Le tableau (III-1) récapitule l'ensemble des paramètres utilisés pour les liaisons FSO et MMW.

Paramètres	Valeurs
FSO paramètres	
Portée de la liaison	3500 m
Longueur d'onde	1550 nm
Puissance optique	4 mW
Diamètre d'ouverture d'émetteur	5 cm
Diamètre d'ouverture du récepteur	5 cm
Sensibilité	1 A/V
Type de modulation	NRZ-OOK, BPSK, QPSK, M-PPM
MMW paramètres	
Rayon de cellule	50 m
Fréquence porteuse	60 GHz
Largeur de bande opérationnelle	2.16 GHz
Densité de bruit	-174 dBm/Hz
Distance de référence	1 m
Facteur de bruit	5 dB
Exposant de perte de trajet	$PLE_{NLOS} = 3.01$
Type de modulation	BPSK-OFDM

Tableau III-1. Paramètres du système.

Pour analyser les performances du système hybride FSO/MMW, nous déterminons dans l'étude suivante que le SNR $\gamma_{2(BS,Utilisateur)} = 49 \text{ dB}$ à une distance $d_{(BS,Utilisateur)} = 50 \text{ m}$ séparant la station de base de l'utilisateur MMW.

Dans notre système hybride MIMO-FSO/SISO-MMW utilisant le schéma de modulation NRZ-OOK/BPSK-OFDM, la figure (III-5) illustre les performances en termes de BER en fonction du SNR moyen du lien FSO, sous des conditions de turbulences atmosphériques (AT) modérées et fortes. Cette analyse prend en compte un écart-type du déplacement dû à l'erreur de pointage (PE) de $\sigma_s = 0.1$ ainsi que différentes configurations d'antennes optiques.

La figure (III-5) montre clairement qu'une diminution de la turbulence atmosphérique améliore les performances en termes de BER. Par exemple, pour un SNR moyen du lien FSO égal à 5 dB et des valeurs de $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ (forte turbulence) et $C_n^2 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

(turbulence modérée), les performances en BER du système hybride SISO-FSO/SISO-MMW sont respectivement de 6.1×10^{-2} et 4.8×10^{-2} . En revanche, pour le système hybride MIMO-FSO/SISO-MMW, les performances en BER s'améliorent considérablement, atteignant respectivement 3.2×10^{-5} et 1.5×10^{-5} , dans les mêmes conditions d'AT.

De plus, la figure (III-5) montre sans ambiguïté que les performances en BER s'améliorent avec l'augmentation du nombre de lasers et de photodétecteurs, lorsque M passe de 1 à 2 et N de 1 à 2. Cette augmentation du nombre d'antennes optiques renforce la robustesse du système face aux turbulences atmosphériques (AT) et aux erreurs de pointage (PE). Le BER de ce système semble se stabiliser à une valeur constante de 3×10^{-6} lorsque le SNR_{FSO} moyen atteint des niveaux élevés. Cela indique que le BER atteint une valeur limite et n'évolue plus favorablement au-delà d'un certain seuil de SNR_{FSO} , suggérant que le système a atteint sa capacité optimale de réduction du BER.

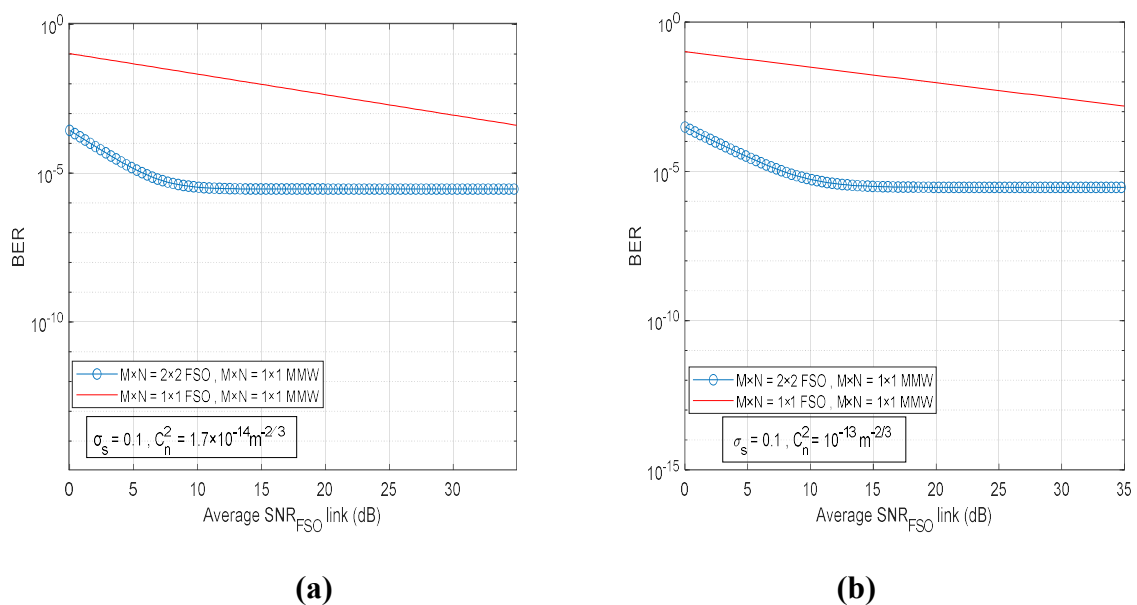


Figure III-5. Performances en BER du système hybride proposé MIMO-FSO/SISO-MMW en fonction du SNR_{FSO} moyen : (a) Modérée et (b) Forte.

Dans un système hybride MIMO-FSO/MISO-MMW utilisant un schéma de modulation NRZ-OOK/BPSK-OFDM, la figure (III-6) présente les performances du BER en fonction du SNR_{FSO} moyen sous des conditions de canal AT modéré et fort, en tenant compte de la déviation standard du déplacement PE $\sigma_s = 0.1$ et de différentes configurations d'antennes optiques. Comme le montre la figure (III-6), une diminution d'AT améliore les performances en termes de BER. Plus précisément, le BER du système hybride MIMO-FSO/MISO-MMW est respectivement de $1,8 \times 10^{-9}$ et $6,7 \times 10^{-11}$, lorsque le SNR_{FSO} moyen est de 25 dB pour $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$

et $C_n^2 = 1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$. Il est clairement observé que, lorsque le SNR_{FSO} augmente dans ce système, le BER diminue. Cependant, il atteint un plateau et reste constant à 5.1×10^{-11} lorsque le SNR_{FSO} moyen continue d'augmenter.

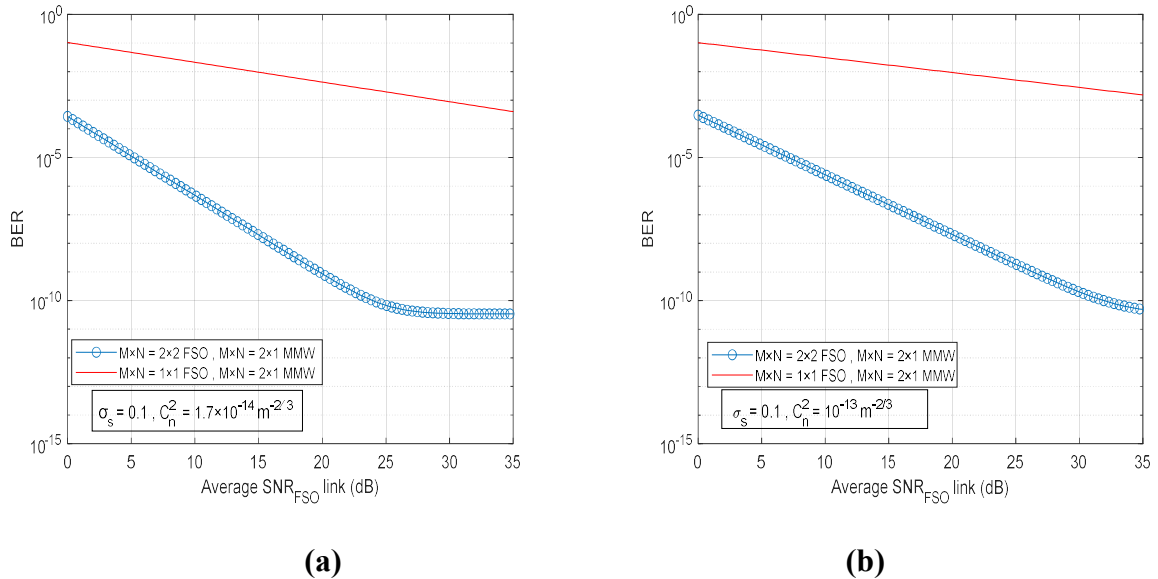


Figure III-6. Performances en BER du système hybride proposé MIMO-FSO/MISO-MMW en fonction du SNR_{FSO} moyen : (a) Modérée et (b) Forte.

La figure (III-7) examine un système hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW avec le schéma de modulation NRZ-OOK/BPSK-OFDM dans deux conditions différentes : $C_n^2 = 10^{-1} m^{-2/3}$ et $C_n^2 = 1,7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$, en tenant compte de la déviation standard du déplacement PE $\sigma_s = 0.1$. Le système proposé présente un BER d'environ 1.7×10^{-11} dans le premier cas et 7×10^{-14} dans le second. Il est évident, en comparant les trois systèmes MIMO-FSO/SISO-MMW, MIMO-FSO/MISO-MMW et MIMO-FSO/MIMO-MMW que l'augmentation du nombre d'antennes au niveau de la BS de $M = 1$ à $M = 2$ et de $N = 1$ à $N = 2$, ainsi que l'augmentation du nombre d'antennes du côté utilisateur de $M = 1$ à $M = 2$ et de $N = 1$ à $N = 2$, permet de réduire le BER. Selon cette observation, tous les trois systèmes présentent de meilleures performances en termes de BER lorsque la configuration des antennes est augmentée des deux côtés du lien de communication.

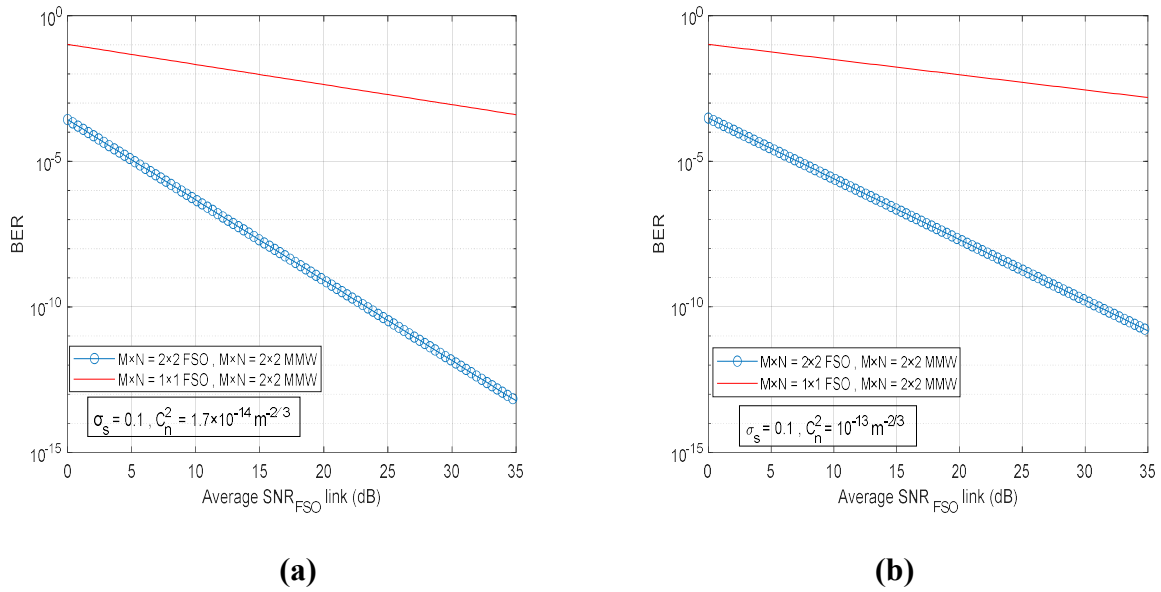


Figure III-7. Performances en BER du système hybride proposé MIMO-FSO/MIMO-MMW en fonction du SNR_{FSO} moyen : (a) Modérée et (b) Forte.

Les figures (III-5), (III-6) et (III-7) illustrent le BER du système hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW avec le schéma de modulation NRZ-OOK/BPSK-OFDM dans deux conditions différentes : $C_n^2 = 1,7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ et $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, en tenant compte de la déviation standard du déplacement PE $\sigma_s = 0.1$ et de l'utilisation de multiples antennes. Il ressort des figures que, même en présence d'erreurs de pointage (PE), le BER du système diminue à mesure que le nombre d'antennes augmente, tant du côté de l'émetteur que du récepteur, aussi bien pour le FSO que pour le MMW. Plus précisément, le BER du système SISO (M×N = 1×1 FSO, M×N = 1×1 MMW) atteint la valeur de 4×10^{-4} lorsque le SNR_{FSO} est de 35 dB sous turbulence modérée, tandis que pour le système MIMO (M×N = 2×2 FSO, M×N = 2×2 MMW), le BER est de 7×10^{-14} sous la même turbulence. En revanche, sous forte turbulence et avec la même valeur de SNR_{FSO} , le BER du système SISO (M×N = 1×1 FSO, M×N = 1×1 MMW) atteint la valeur de $1,5 \times 10^{-3}$, tandis que pour le système MIMO (M×N = 2×2 FSO, M×N = 2×2 MMW), le BER est de $1,7 \times 10^{-11}$.

Les résultats de ces figures illustrent l'effet combiné du MIMO sur les liens FSO et MMW, mettant en évidence l'amélioration du BER grâce à l'utilisation du MIMO. À partir de ces résultats, nous pouvons confirmer les performances optimisées du MIMO en termes de résistance aux erreurs, par rapport à une configuration à antenne unique.

La performance d'un système hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW utilisant le schéma de modulation NRZ-OOK/BPSK-OFDM sous de fortes conditions d'AT est montrée dans la figure

(III-8) en fonction de la déviation standard du déplacement PE. Des valeurs de $\sigma_s = [0.1, 0.2, 0.22, 0.23]$ ont été utilisées pour estimer l'impact de la déviation standard du déplacement PE. Il est évident que la déviation standard du déplacement PE a un impact considérable sur les performances du BER de ce système, des niveaux plus élevés de σ_s étant associés à un BER plus élevé.

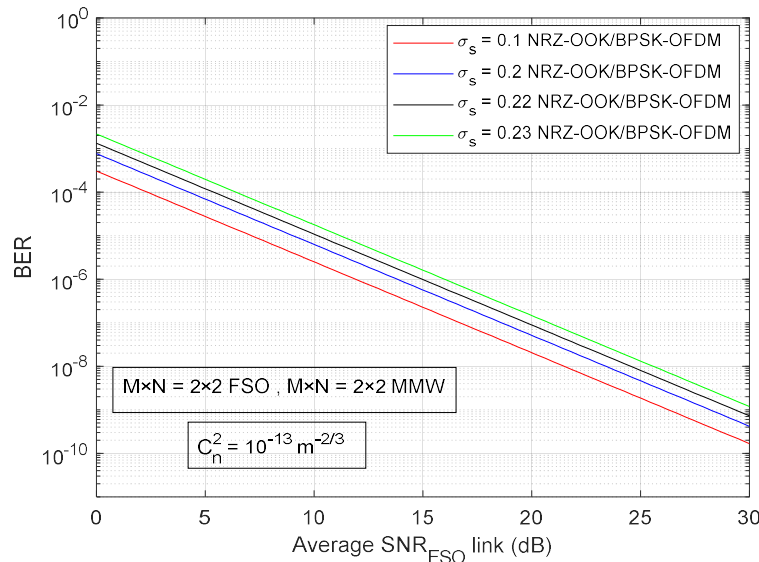


Figure III-8. Performance du BER du système MIMO-FSO/MIMO-MMW proposé en fonction du SNR_{FSO} moyen pour différents σ_s .

Par exemple, le système proposé atteint un BER de 1.75×10^{-10} lorsque le SNR_{FSO} moyen est égal à 30 dB et que la déviation standard du déplacement PE $\sigma_s = 0.1$. En revanche, ce système présente un BER plus élevé de 1.25×10^{-9} lorsque la déviation standard du déplacement PE $\sigma_s = 0.23$. Cela montre que le BER du système proposé augmente avec la déviation standard du déplacement PE σ_s , ce qui indique une dégradation des performances.

Le système mixte proposé, fonctionnant dans des conditions de forte turbulence atmosphérique (AT) avec $C_n^2 = 10^{-1} m^{-2/3}$ et de turbulence atmosphérique modérée avec $C_n^2 = 1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$, est présenté dans la figure (III-9) accompagnée d'une comparaison des performances du BER pour plusieurs schémas de modulation. De plus, deux déviations standards distinctes du déplacement PE, $\sigma_s = 0.1$ et $\sigma_s = 0.23$, sont utilisées pour évaluer le système proposé.

Les résultats obtenus montrent que, pour $\sigma_s = 0.1$ et $\sigma_s = 0.23$, le système proposé, utilisant le schéma de modulation 64-PPM/BPSK-OFDM, offre de meilleures performances que les autres schémas de modulation, notamment NRZ-OOK/BPSK-OFDM, BPSK/BPSK-OFDM,

QPSK/BPSK-OFDM, 4PPM/BPSK-OFDM et 16-PPM/BPSK-OFDM. En particulier, le système proposé avec 64-PPM/BPSK-OFDM atteint un BER remarquablement faible de 7.7×10^{-19} pour $\sigma_s = 0.1$ et 3.55×10^{-18} pour $\sigma_s = 0.23$, lorsque le SNR_{FSO} moyen est de 30 dB et $C_n^2 = 1.7 \times 10^{-1} m^{-2/3}$.

En comparaison, d'autres schémas de modulation NRZ-OOK/BPSK-OFDM, 4PPM/BPSK-OFDM, QPSK/BPSK-OFDM, BPSK/BPSK-OFDM et 16-PPM/BPSK-OFDM affichent des BER plus élevés dans les mêmes conditions. Pour $\sigma_s = 0.1$, les valeurs de BER sont respectivement 1.5×10^{-12} , 3.3×10^{-14} , 9.8×10^{-15} , 4.9×10^{-15} , et 1×10^{-16} . De même, $\sigma_s = 0.23$, les BER atteignent 7×10^{-12} , 1.5×10^{-13} , 4.5×10^{-1} , 2.2×10^{-1} , et 4.9×10^{-1} , respectivement.

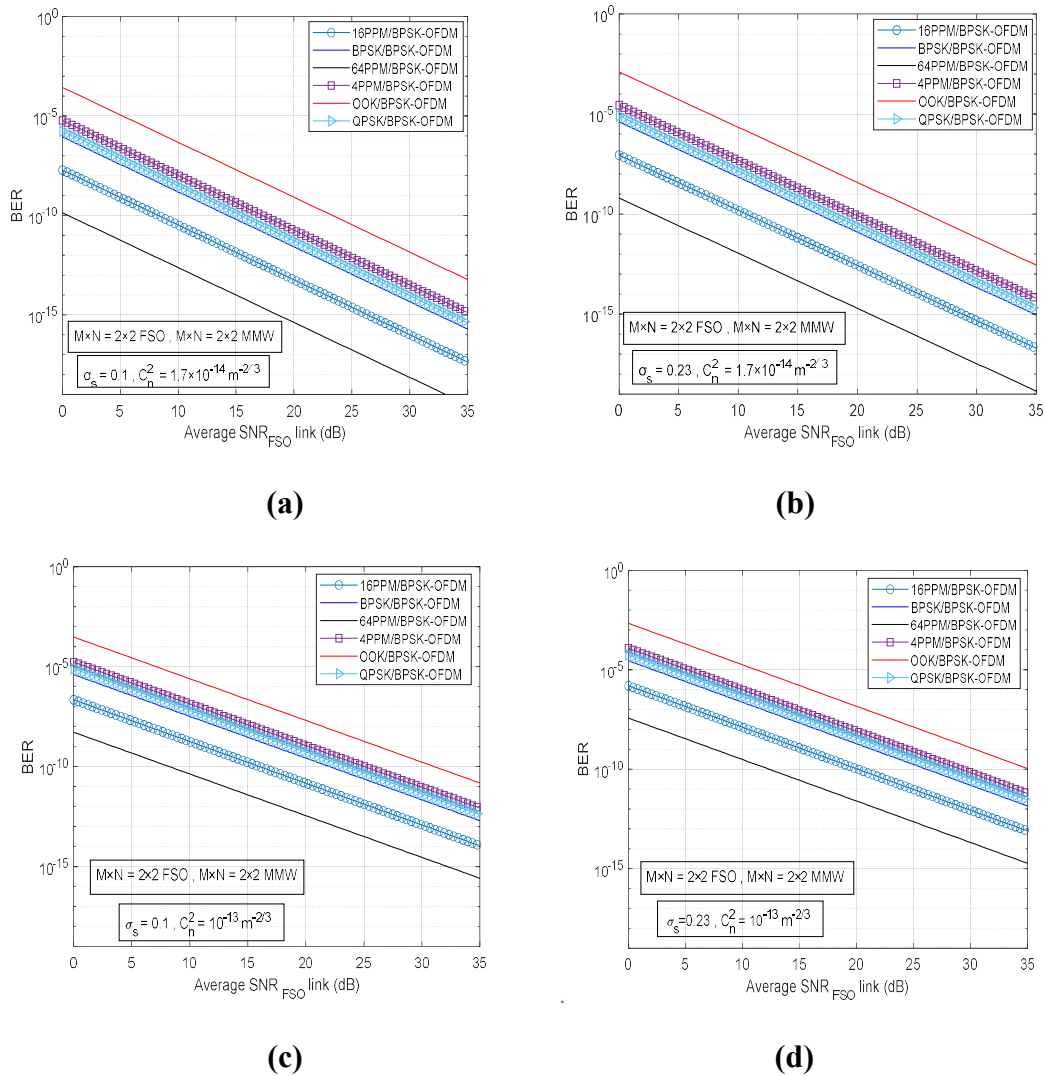


Figure III-9. Performance du BER du système MIMO-FSO/MIMO-MMW proposé en fonction du SNR_{FSO} moyen pour diverses techniques de modulations : **(a)** Modérée avec $\sigma_s = 0.1$, **(b)** Modérée avec $\sigma_s = 0.23$, **(c)** Forte avec $\sigma_s = 0.1$, et **(d)** Forte avec $\sigma_s = 0.23$.

De plus, le système proposé utilisant le schéma de modulation 64-PPM/BPSK-OFDM affiche des valeurs de BER remarquablement faibles de 3×10^{-15} pour $\sigma_s = 0.1$ et 2×10^{-14} pour $\sigma_s = 0.23$. Ces performances sont obtenues avec la même valeur moyenne de SNR_{FSO} mais sous des conditions turbulence atmosphérique (AT) caractérisées $C_n^2 = 10^{-1} \text{ m}^{-2/3}$. En revanche, lorsque le système proposé utilise les schémas de modulation NRZ-OOK/BPSK-OFDM, 4PPM/BPSK-OFDM, QPSK/BPSK-OFDM, BPSK/BPSK-OFDM et 16-PPM/BPSK-OFDM, d'autres résultats significatifs émergent. Plus précisément, les valeurs de BER plus élevées pour $\sigma_s = 0.1$ sont respectivement 1.7×10^{-10} , 9.75×10^{-12} , 4.5×10^{-1} , 2.3×10^{-1} et 1.2×10^{-13} , tandis que pour $\sigma_s = 0.23$, elles sont respectivement 1.2×10^{-9} , 6.9×10^{-1} , 3.26×10^{-11} , 1.6×10^{-1} et 9×10^{-13} . Ces résultats confirment que le système proposé utilisant le schéma de modulation 64-PPM/BPSK-OFDM présente une résilience au BER nettement supérieure dans ces conditions spécifiques.

III.5.4 Étude comparative avec travaux antérieurs

Notre travail s'inscrit dans le prolongement des recherches antérieures tout en apportant une contribution significative dans le domaine des systèmes hybrides MIMO-FSO/MMW, comme le montre le tableau (III-2). Par exemple, dans [12], le système hybride MMW/MIMO-FSO a intégré une modulation BPSK tout en tenant compte des erreurs de pointage (PE), et a atteint un BER minimal de 10^{-5} . De son côté, l'étude [13] a porté sur un système hybride MIMO-RF/FSO sans prendre en compte les PEs, utilisant une modulation BPSK et un BER minimal de 10^{-8} . En comparaison, notre étude propose un système hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW avec une modulation hybride 64-PPM/BPSK-OFDM, tout en tenant compte des PEs. Cette approche permet d'atteindre un BER minimal impressionnant de 2×10^{-14} , illustrant la supériorité de notre solution en termes de fiabilité et d'efficacité, notamment dans des conditions opérationnelles variées.

Références	[12]	[13]	Travail proposé
Modèles de systèmes hybrides	MMW/MIMO-FSO	MIMO-RF/FSO	MIMO-FSO/MIMO-MMW
PE	Oui	Non	Oui
Modulation	BPSK	BPSK	64-PPM/BPSK-OFDM
BER minimum	10^{-5}	10^{-8}	2×10^{-14}

Tableau III-2. Comparaison de divers modèles des systèmes hybrides.

III.6 Transmission d'images via un système hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW

Le système proposé modélise la transmission d'une image couleur de dimensions 700 x 393 pixels dans le cadre d'une simulation. La performance de ce système est analysée en faisant varier trois paramètres principaux : le nombre d'antennes à l'émetteur et au récepteur, l'écart-type du déplacement de pointage σ_s ainsi que les techniques de modulation employées. L'image est tout d'abord importée depuis un fichier à l'aide de la fonction "imread" de MATLAB, puis convertie en vecteurs binaires grâce à la fonction "de2bi" avant d'être transmise via le système proposé. La figure (III-10) illustre en détail les étapes du processus de transmission d'image via le système MIMO FSO/MMW proposé.

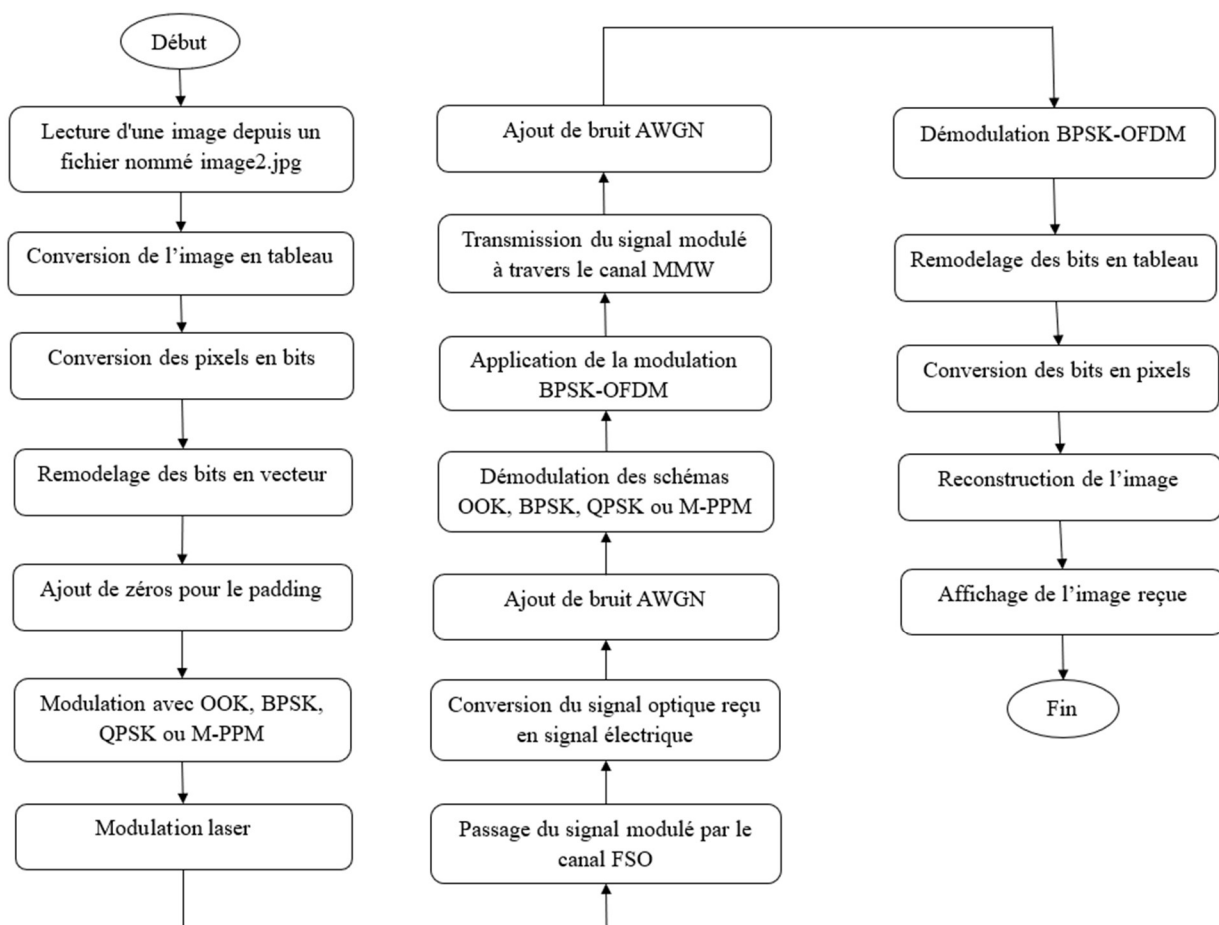




Figure III-10. Algorithme de transmission d'images.

Dans un premier temps, le tableau (III-3) présente les images reconstruites après leur transmission à travers deux scénarios distincts. Le premier correspond à un système SISO-FSO/SISO-MMW, tandis que le second concerne un système MIMO-FSO/SISO-MMW. Ces transmissions utilisent la technique de modulation NRZ-OOK/BPSK-OFDM et sont évaluées pour trois niveaux de SNR_{FSO} moyen (5 dB, 15 dB, and 30 dB). Les simulations ont été réalisées dans

des conditions où l'indice de structure d'AT est fixé à $C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$ et où $\sigma_s = 0.1$. Les résultats obtenus montrent que la dégradation visuelle est moins importante dans le second scénario (MIMO-FSO/SISO-MMW), avec une stabilité de la qualité de l'image observée dans un système hybride 2×2-FSO/SISO-MMW, où le BER reste constant à 8.976×10^{-6} malgré une augmentation progressive du SNR_{FSO} .

Ensuite, le tableau (III-4) illustre les images reconstruites après leur transmission via un système hybride 2×2-FSO/2×2-MMW en utilisant également la technique NRZ-OOK/BPSK-OFDM. Ces simulations se déroulent sous des conditions de fortes turbulences atmosphériques ($C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$) tout en faisant varier l'écart-type du déplacement de pointage ($\sigma_s = 0.1$ et $\sigma_s = 0.23$). Les résultats montrent un impact significatif de l'augmentation de σ_s sur la qualité des images, notamment à des niveaux de SNR_{FSO} faibles, comme 5 dB. Une valeur plus élevée de σ_s entraîne une dégradation visuelle plus marquée, confirmant l'importance de limiter les déplacements de pointage pour améliorer la robustesse du système.

Enfin, le tableau (III-5) compare la qualité des images obtenues avec différentes techniques de modulation dans un système 2×2-FSO/2×2-MMW soumis à des conditions défavorables ($\sigma_s = 0.23$ et $C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$) et un SNR_{FSO} de 5 dB. Les résultats révèlent que les techniques de modulation telles que BPSK/BPSK-OFDM, QPSK/BPSK-OFDM, 16-PPM/BPSK-OFDM et 64-PPM/BPSK-OFDM offrent une meilleure qualité d'image par rapport aux techniques NRZ-OOK/BPSK-OFDM et 4PPM/BPSK-OFDM. Ces dernières présentent une dégradation plus prononcée dans des conditions similaires, soulignant l'efficacité des techniques avancées dans ce type de système MIMO-FSO/MIMO-MMW.

Scénarios	Système SISO-FSO/SISO-MMW	Système 2×2-FSO/SISO-MMW
$SNR_{FSO} = 5 \text{ dB}$	 BER = 1.324×10^{-1}	 BER = 2.096×10^{-5}









$SNR_{FSO} = 15 \text{ dB}$	 <p style="text-align: center;">$BER = 5.35 \times 10^{-2}$</p>	 <p style="text-align: center;">$BER = 8.976 \times 10^{-6}$</p>
$SNR_{FSO} = 30 \text{ dB}$	 <p style="text-align: center;">$BER = 7.2 \times 10^{-3}$</p>	 <p style="text-align: center;">$BER = 8.976 \times 10^{-6}$</p>

Tableau III-3. Analyse comparative de la qualité d'image dans les systèmes hybrides SISO-FSO/SISO-MMW et MIMO-FSO/SISO-MMW utilisant la modulation NRZ-OOK/BPSK-OFDM.

Scénarios	Système 2×2-FSO/2×2-MMW	
Écart-type du déplacement de pointage (σ_s)	$\sigma_s = 0.1$	$\sigma_s = 0.23$
$SNR_{FSO} = 5 \text{ dB}$	 <p style="text-align: center;">$BER = 1.681 \times 10^{-5}$</p>	 <p style="text-align: center;">$BER = 7.197 \times 10^{-4}$</p>
$SNR_{FSO} = 15 \text{ dB}$	 <p style="text-align: center;">$BER = 3.1761 \times 10^{-7}$</p>	 <p style="text-align: center;">$BER = 2.168 \times 10^{-6}$</p>


$SNR_{FSO} = 30 \text{ dB}$	 $BER = 0$	 $BER = 0$
-----------------------------	--	--

Tableau III-4. Impact de l'écart-type du déplacement de pointage (σ_s) sur la qualité de l'image dans un système hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW utilisant NRZ-OOK/BPSK-OFDM.







Scénarios	Système 2×2-FSO/2×2-MMW	
Type de modulation	NRZ-OOK/BPSK-OFDM	4PPM/BPSK-OFDM
$SNR_{FSO} = 5 \text{ dB}$	 $BER = 6.8959 \times 10^{-4}$	 $BER = 3.0357 \times 10^{-5}$
Type de modulation	QPSK/BPSK-OFDM	BPSK/BPSK-OFDM
$SNR_{FSO} = 5 \text{ dB}$	 $BER = 1.9753 \times 10^{-5}$	 $BER = 8.9863 \times 10^{-6}$
Type de modulation	16PPM/BPSK-OFDM	64PPM/BPSK-OFDM
$SNR_{FSO} = 5 \text{ dB}$	 $BER = 1.3489 \times 10^{-7}$	 $BER = 0$

Tableau III-5. Analyse comparative de la qualité d'image dans un système hybride MIMO-FSO/MIMO-MMW utilisant différents types de modulation pour $\sigma_s = 0,23$.

III.7 Conclusion

Le système hybride que nous proposons repose sur l'intégration des liens FSO et MMW, chacun étant confronté à des défis spécifiques : les turbulences atmosphériques (AT) et les erreurs de pointage (PE) pour le FSO, et le phénomène de fading pour le MMW. L'association de ces technologies avec MIMO permet de tirer parti de la diversité spatiale, améliorant ainsi les performances par rapport à l'utilisation de l'un ou l'autre des liens de manière isolée. Le lien FSO est modélisé selon un modèle de turbulence Gamma-Gamma, tandis que le lien MMW est soumis à un modèle de fading de Rayleigh.

Les résultats obtenus démontrent une amélioration significative du BER, atteignant des valeurs aussi faibles que 2×10^{-14} grâce à l'utilisation d'une modulation 64-PPM/BPSK-OFDM, prenant en compte les PEs. Cette étude prolonge les recherches existantes, surpassant les performances observées dans des travaux antérieurs, et offre ainsi une solution plus robuste et performante pour les réseaux 5G et d'autres applications haut débit. La validation du système, réalisée à travers la transmission d'images, confirme son efficacité dans des environnements perturbés.

Références bibliographiques du chapitre III

- [1] Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., & Amjad, H. (2023). Hybrid FSO/RF networks: A review of practical constraints, applications and challenges. *Optical Switching and Networking*, 47, 100697.
- [2] Han, B. (2023, November). A comprehensive review of performance analysis of RF-FSO hybrid communication systems. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2649, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- [3] Bopardikar, R., Joseph, C., & Raj, A. B. A Review Paper on Hybrid RF/FSO System for Communication. *International Journal of Engineering Research and Reviews*, 12(3), 90-115.
- [4] Sharma, S. (2021). Hybrid free space optics/radio frequency communication for next generation wireless networks.
- [5] Raible, D. E., Romanofsky, R. R., Budinger, J. M., Nappier, J., Hylton, A., Swank, A. J., & Nerone, A. L. (2014). On the physical realizability of hybrid RF and optical communications platforms for deep space applications. In *32nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference* (p. 4482).
- [6] Xu, G., & Song, Z. (2021). Performance analysis of a UAV-assisted RF/FSO relaying systems for internet of vehicles. *IEEE internet of things journal*, 9(8), 5730-5741.
- [7] Wang, J. Y., Ma, Y., Lu, R. R., Wang, J. B., Lin, M., & Cheng, J. (2021). Hovering UAV-based FSO communications: Channel modelling, performance analysis, and parameter optimization. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(10), 2946-2959.
- [8] Odeyemi, K. O., & Owolawi, P. A. (2019). Selection combining hybrid FSO/RF systems over generalized induced-fading channels. *Optics Communications*, 433, 159-167.
- [9] Magidi, S., & Jabeena, A. (2022). Analysis of hybrid FSO/RF communication system under the effects of combined atmospheric fading and pointing errors. *Optical and Quantum Electronics*, 54(4), 210.
- [10] Roumelas, G. D., Nistazakis, H. E., Leitgeb, E., Ivanov, H. D., Volos, C. K., & Tombras, G. S. (2020). Serially DF relayed hybrid FSO/MMW links with Weibull fading, M-turbulence and pointing errors. *Optik*, 216, 164531.
- [11] Sharma, H. K., & Kumbhani, B. (2024). Secrecy capacity of hybrid FSO-RF communication links. *Journal of Optics*, 1-6.

- [12] Goel, A., Upadhya, A., & Dwivedi, V. K. (2021). Diversity aided millimeter-wave/free space optical cooperative relaying systems. *International Journal of Communication Systems*, 34(4), e4700.
- [13] Liang, H., Li, Y., Miao, M., Gao, C., & Li, X. (2021). Unified performance analysis of MIMO mixed RF/FSO relaying system. *Applied Sciences*, 11(7), 3054.
- [14] Jiang, T., Zhao, L., Liu, H., Deng, D., Luo, A., Wei, Z., & Yang, X. (2019). Performance improvement for mixed RF–FSO communication system by adopting hybrid subcarrier intensity modulation. *Applied Sciences*, 9(18), 3724.
- [15] Adardour, H.E., Meliani, M., and Hachemi, M.H. (2017). Improved local spectrum sensing in cluttered environment using a simple recursive estimator. *Computers and Electrical Engineering* 61, July 2017, 208-222.
- [16] Jin, M., Liu, W., Hao, Y., Wu, R., Wei, Z., Deng, D., & Liu, H. (2022). Hybrid dual-hop RF/FSO terrestrial-deep space communication system under solar scintillation during superior solar conjunction. *Applied Sciences*, 12(2), 619.
- [17] Malik, S., & Sahu, P. K. (2020). Performance analysis of free space optical communication system using different modulation schemes over weak to strong atmospheric turbulence channels. In *Optical and Wireless Technologies: Proceedings of OWT 2018* (pp. 387-399). Springer Singapore.

**Chapitre IV: Optimisation des systèmes hybrides
FSO/MIMO-MMW à l'aide de la
sélection adaptative de modulation
par DNN**

IV.1 Introduction

Les systèmes hybrides FSO/MIMO-MMW, essentiels pour les réseaux 5G et 6G, offrent une grande bande passante, une faible latence et une robustesse accrue, répondant aux besoins des environnements urbains denses. Cependant, les turbulences atmosphériques dues aux variations de C_n^2 affectent négativement les performances des liens FSO en augmentant le BER et en réduisant la capacité. La mise en œuvre d'une modulation adaptative est donc cruciale afin de permettre une adaptation dynamique aux conditions changeantes du canal, garantissant un équilibre optimal entre la fiabilité de transmission et la capacité du système, y compris en environnement perturbé.

Dans ce contexte, ce chapitre propose une méthode innovante basée sur des réseaux de neurones profonds (DNN) pour optimiser la sélection adaptative de modulation dans les systèmes hybrides FSO/MIMO-MMW.

IV.2 Système hybride FSO/MIMO-MMW basé sur l'apprentissage automatique

L'intégration de l'apprentissage automatique (ML) dans les systèmes hybrides FSO/MIMO-MMW permet d'améliorer les performances en ajustant dynamiquement les paramètres du système en fonction des conditions environnementales. Cette stratégie repose sur deux piliers essentiels : la prédiction des conditions du canal et la sélection adaptative de la modulation.

La prédiction des conditions du canal vise à estimer des paramètres clés tels que le coefficient C_n^2 . Cette estimation repose sur des algorithmes de régression développés à partir de données expérimentales mesurées en temps réel, notamment la vitesse du vent (U_{mSonic}), la température de l'air (T), la concentration de vapeur d'eau (ρ), la pression atmosphérique (P_{air}), la température au sol ($IRtemp$) et le flux solaire (SF). Ces données ont été collectées en continu sur une période de 11 mois, de fin janvier à fin novembre 2021, depuis le toit de Spanagel Hall à la Naval Postgraduate School, à environ 20 mètres au-dessus du niveau de la mer. Les paramètres climatiques ont été enregistrés tout au long de cette période, permettant une prédiction précise des effets des perturbations atmosphériques. Les données ont été divisées en quatre ensembles saisonniers (automne, hiver, printemps, été) afin de tenir compte des variations saisonnières, notamment des températures qui dépendent fortement des saisons. Cette segmentation a permis de mieux comprendre les fluctuations climatiques et d'optimiser l'efficacité des modèles d'apprentissage automatique [1]. Le tableau (IV-1) présente les statistiques récapitulatives de C_n^2

pour chaque saison, offrant un aperçu de ses variations dans différentes conditions environnementales.

Métrique descriptive	Hiver	Printemps	Été	Automne
Min	1.960×10^{-16}	5.489×10^{-16}	6.071×10^{-16}	1.431×10^{-16}
Max	1.621×10^{-12}	1.820×10^{-12}	1.065×10^{-12}	1.279×10^{-12}

Tableau IV-1. Statistiques récapitulatives de C_n^2 .

En parallèle, la sélection adaptative de la modulation repose sur des modèles de classification avancés, comme le DNN. Ces modèles déterminent automatiquement le format de modulation optimal pour le sous-système FSO (NRZ-OOK ou 8-QAM) en fonction des conditions prévues. Pour le sous-système MMW, la modulation BPSK, combinée à la technologie MIMO, garantit une transmission fiable dans des environnements soumis à l'évanouissement de Rayleigh.

L'utilisation de l'apprentissage automatique dans les systèmes FSO/MIMO-MMW contribue à une réduction du BER tout en optimisant la capacité du canal, même en présence de conditions climatiques défavorables. Cette approche offre une solution robuste et fiable qui répond aux besoins des réseaux de communication de nouvelle génération, tout en ouvrant la voie à des innovations dans des scénarios réels et variés.

IV.3 Système hybride FSO/MIMO-MMW proposé

Le système hybride FSO/MIMO-MMW proposé comporte un nœud relais intermédiaire (R) qui assure la communication entre le nœud source (S), la station de base FSO centrale et le nœud de destination (D), représentant une station de base MMW. Le nœud source (S) dispose d'une seule antenne d'émission. Le nœud relais (R) est équipé d'une antenne unique pour la réception FSO et de M antennes ou ouvertures pour l'émission des signaux MMW. Quant au nœud de destination (D), il est doté de N ouvertures de réception, où « N » représente le nombre d'ouvertures utilisées pour recevoir les signaux MMW.

En outre, le lien FSO entre la source et le relais intègre une modulation adaptative afin d'optimiser les performances. Cette méthode permet au système d'ajuster dynamiquement le format de modulation en réponse aux variations des conditions du canal. Pour maximiser les débits de données, le système peut adopter une modulation d'ordre supérieur (8-QAM) lorsque les conditions du canal sont favorables. En revanche, en cas de dégradation des conditions du canal,

le système peut passer à une modulation OOK, offrant ainsi une plus grande robustesse au détriment de la capacité de transmission.

Le sous-système FSO exploite des données expérimentales de C_n^2 , dont les valeurs varient selon différents régimes. Afin de modéliser ces variations, la distribution Gamma-Gamma est utilisée, car elle représente de manière appropriée les fluctuations dans l'ensemble des régimes dynamiques observés. L'expression de la PDF de la distribution Gamma-Gamma est donnée comme suit [2]:

$$f_{\gamma_{FSO}}(\gamma) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{FSO}}}^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{FSO}}} \right), \gamma > 0 \quad (IV-1)$$

Dans le sous-système MIMO-MMW, les signaux transmis sont influencés par la perte de FSL et l'absorption atmosphérique, ainsi que par les effets de multipath caractéristiques des environnements à évanouissement de Rayleigh. La perte totale de transmission à travers l'air, applicable aux réseaux de communication MMW, est représentée par la formule suivante [3] :

$$Attenuation_{dB} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 10 \times \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \gamma(f, P_{air}, T, \rho) \quad (IV-2)$$

Les variables λ , d_0 et d représentent respectivement la longueur d'onde (en mètres), la distance de référence (en mètres) et la distance estimée entre le récepteur (R) et l'utilisateur MMW (en mètres). L'atténuation spécifique de l'absorption atmosphérique est donnée par [4] :

$$\gamma(f, P_{air}, T, \rho) = \gamma_{dry}(f, P_{air}, T) + \gamma_{water}(f, P_{air}, T, \rho) \quad (IV-3)$$

Où $\gamma_{dry}(f, P_{air}, T)$ et $\gamma_{water}(f, P_{air}, T, \rho)$ représentent respectivement l'atténuation spécifique causée par l'air sec et la vapeur d'eau, données par [4] :

$$\gamma_{dry}(f, P_{air}, T) = \alpha(f) \cdot \left(\frac{P_0}{P_{air}} \right) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (IV-4)$$

Où P_{air} , T et ρ représentent respectivement la pression atmosphérique, la température de l'air et la concentration de la vapeur d'eau, mesurées expérimentalement [1] :

$$\gamma_{water}(f, P_{air}, T, \rho) = \beta(f) \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right) \cdot \left(\frac{P_0}{P} \right) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (IV-5)$$

Où f est la fréquence porteuse (Hz), P_0 représente la pression atmosphérique standard (Pa), T_0 est la température standard (°K), ρ_0 représente la densité de référence de la vapeur d'eau au niveau de la mer (g/m³), et $\alpha(f)$ et $\beta(f)$ sont les coefficients dépendant de la fréquence f [4].

IV.3.1 Evaluation du BER

Comme mentionné précédemment, la turbulence atmosphérique peut altérer et dégrader le signal optique, affectant ainsi directement la fiabilité du lien FSO. Par conséquent, les liens FSO sont particulièrement sensibles à ces turbulences. La performance du système se dégrade en présence de toute forme de turbulence, se manifestant par une augmentation du BER et une réduction de la capacité du canal.

Dans notre modèle de système hybride, nous prenons en compte le BER pour le lien MMW P_{MMW} et le lien FSO P_{FSO} . Pour le lien MMW, nous utiliserons la modulation BPSK, tandis que pour le lien FSO, une modulation adaptative incluant (NRZ-OOK et 8-QAM) sera employée. Ainsi, le BER peut être calculé comme indiqué dans les équations (IV-6) et (IV-7).

$$P_{FSO} = \int_0^{\infty} BER_{NRZ-O} f_{\gamma_{FSO}}(\gamma) d\gamma = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\gamma} \right) f_{\gamma_{FSO}}(\gamma) d\gamma \quad (IV-6)$$

$$P_{FSO} = \int_0^{\infty} BER_{M-QAM} f_{\gamma_{FSO}}(\gamma) d\gamma = \int_0^{\infty} \frac{4}{\log_2(M)} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2(M)}{M-1}} \gamma \right) f_{\gamma_{FSO}}(\gamma) d\gamma \quad (IV-7)$$

IV.3.2 Evaluation de la capacité du canal

Lors de l'évaluation des systèmes de communication sans fil, la capacité moyenne du canal est tout aussi importante que l'évaluation du BER. Cette métrique sera utilisée dans cette section pour évaluer la performance d'un lien FSO dans différentes conditions de turbulence atmosphérique. Le taux de données maximal possible est déterminé par la capacité moyenne du canal. L'équation (IV-8) fournit une formule pour estimer cette capacité pour une modulation adaptative sur une distribution Gamma-Gamma [5].

La capacité du canal pour le lien FSO utilisant NRZ-OOK et M-QAM est donnée par :

$$\langle C \rangle_{FSO(NRZ-O, M-QAM)} = \int_0^{\infty} B \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma_{FSO}}(\gamma) d\gamma \quad (IV-8)$$

Nous pouvons exprimer la capacité d'un système MIMO-MMW modulé en BPSK dans un canal à évanouissement de Rayleigh comme suit [6] :

$$\langle C \rangle_{MIMO-MMW(BPSK)} = \int_0^{\infty} B \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma_{MIMO-MMW}}(\gamma) d\gamma \quad (IV-9)$$

Où $f_{Y_{MIMO-MMW}}(\gamma) = \frac{d}{d\gamma} F_{\gamma_2}(\gamma)$ et $F_{\gamma_2}(\gamma)$ est donné par l'équation (III-8).

Dans un système FSO/MIMO-MMW, la capacité globale de bout en bout est généralement limitée par le lien ayant la capacité la plus faible, comme indiqué ci-dessous :

$$\langle C \rangle_{FSO/MIMO-MMW} = \min(\langle C \rangle_{FSO(NRZ-OOK,M-QAM)}, \langle C \rangle_{MIMO-MMW(BPSK)}) \quad (IV-10)$$

Cette comparaison permet une évaluation approfondie de la performance du lien FSO et offre des perspectives sur sa capacité à maintenir de hauts débits de données sous diverses conditions météorologiques.

IV.4 Modélisation du paramètre C_n^2 avec algorithmes de régression ML

La première étape dans l'application de ML pour prédire le coefficient C_n^2 consiste à diviser les données collectées en deux sous-ensembles distincts. Le sous-ensemble principal, qui représente 80 % de l'ensemble de données, est réservé à l'entraînement du modèle. Pendant cette phase, le modèle est alimenté avec les données disponibles pour identifier des motifs et apprendre les relations entre les caractéristiques d'entrée, telles que la vitesse du vent, la température de l'air, la concentration de vapeur d'eau, la pression atmosphérique, la température du sol et le flux solaire, et la variable cible C_n^2 . Cette comparaison permet une évaluation approfondie de la performance du lien FSO et offre des perspectives sur sa capacité à maintenir de hauts débits de données sous diverses conditions météorologiques.

Le sous-ensemble restant de 20 % est utilisé comme ensemble de test, jouant un rôle essentiel dans l'évaluation de la capacité du modèle à généraliser sur des données non vues auparavant. Cela permet de s'assurer que les prédictions du modèle ne sont pas influencées par les données déjà rencontrées lors de l'entraînement, fournissant ainsi une évaluation plus précise de sa capacité à effectuer des prédictions dans des scénarios réels. Le sous-ensemble de test est donc essentiel pour vérifier la robustesse du modèle et sa capacité à généraliser au-delà de l'ensemble d'entraînement.

Une fois le modèle entraîné, il est évalué à l'aide d'un sous-ensemble de données de test. L'évaluation des performances repose sur des indicateurs clés, tels que le coefficient de détermination R^2 et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Le coefficient R^2 , dont la valeur varie de 0 à 1, permet de mesurer la capacité du modèle à prédire la variable cible en évaluant la proportion de la variance de la variable dépendante expliquée par les variables indépendantes. Quant à l'erreur RMSE, elle mesure l'écart entre les valeurs prédites et réelles, des valeurs plus faibles étant synonymes d'une meilleure performance prédictive. Un R^2 élevé et un RMSE faible

signalent l'efficacité du modèle à fournir des prédictions précises. Les formules de R^2 et RMSE sont les suivantes [7] :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (IV-11)$$

Où N représente le nombre total d'observations, x_i désigne la valeur réelle de C_n^2 pour l'observation de l'indice i , \hat{x}_i est la valeur prédite par le modèle pour l'observation de l'indice i , et \bar{x}_i correspond à la moyenne des valeurs réelles de C_n^2 .

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (IV-12)$$

Un organigramme de l'approche de ML suivie dans ce travail est présenté dans la figure (IV-1).

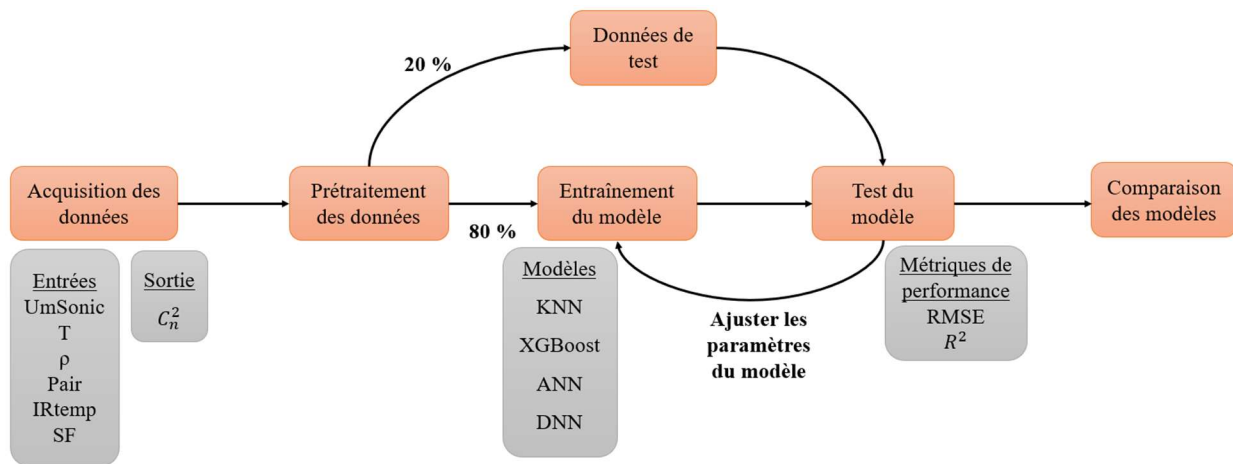


Figure IV-1. Organigramme de la méthodologie basée sur le ML pour la modélisation du C_n^2 .

Pour cette étude de modélisation par régression, quatre algorithmes populaires d'apprentissage automatique (ML) ont été utilisés : les k-plus proches voisins (KNN), le gradient boosting extrême (XGBoost), les réseaux de neurones artificiels (ANN) et DNN. Chaque algorithme a été sélectionné pour ses caractéristiques particulières et sa capacité à gérer efficacement les données météorologiques et les valeurs de C_n^2 . La figure (IV-2) illustre une comparaison qualitative des quatre algorithmes de ML utilisés dans cette étude. Chaque algorithme est catégorisé selon deux critères principaux : la simplicité/complexité et la performance (faible ou forte).

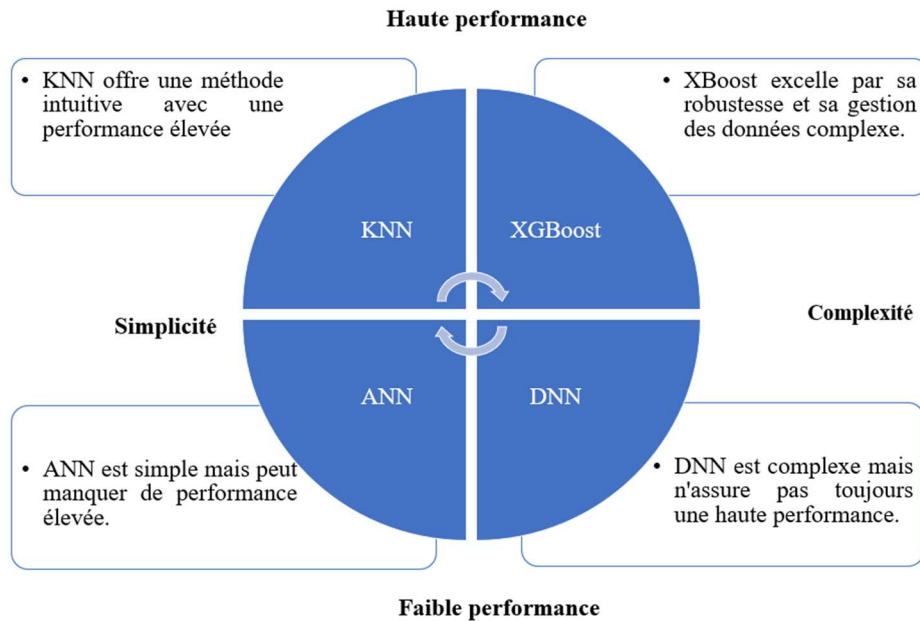


Figure IV-2. Catégorisation des algorithmes de ML [8].

Les modèles ont été formés et évalués à partir de données couvrant toutes les saisons (automne, hiver, printemps, été), comme le montre la figure (IV-3), afin d'évaluer leurs performances dans diverses conditions environnementales. Ces analyses ont été effectuées dans l'environnement Jupyter Notebook, en utilisant Python (version 3.8).

Les performances optimales de l'algorithme KNN ont été obtenues en ajustant les hyperparamètres, notamment le nombre de voisins (`n_neighbors`), les poids (uniformes ou en fonction de la distance) et la métrique de distance (euclidienne, manhattan ou minkowski). L'utilisation de `GridSearchCV` avec une validation croisée à cinq plis a permis d'optimiser ces paramètres. Le KNN a donné les résultats suivants : R^2 et RMSE de 0.83 et 0.04 pour l'été, 0.87 et 0.04 pour le printemps, 0.8 et 0.06 pour l'automne, et 0.78 et 0.07 pour l'hiver, surpassant ainsi les autres algorithmes.

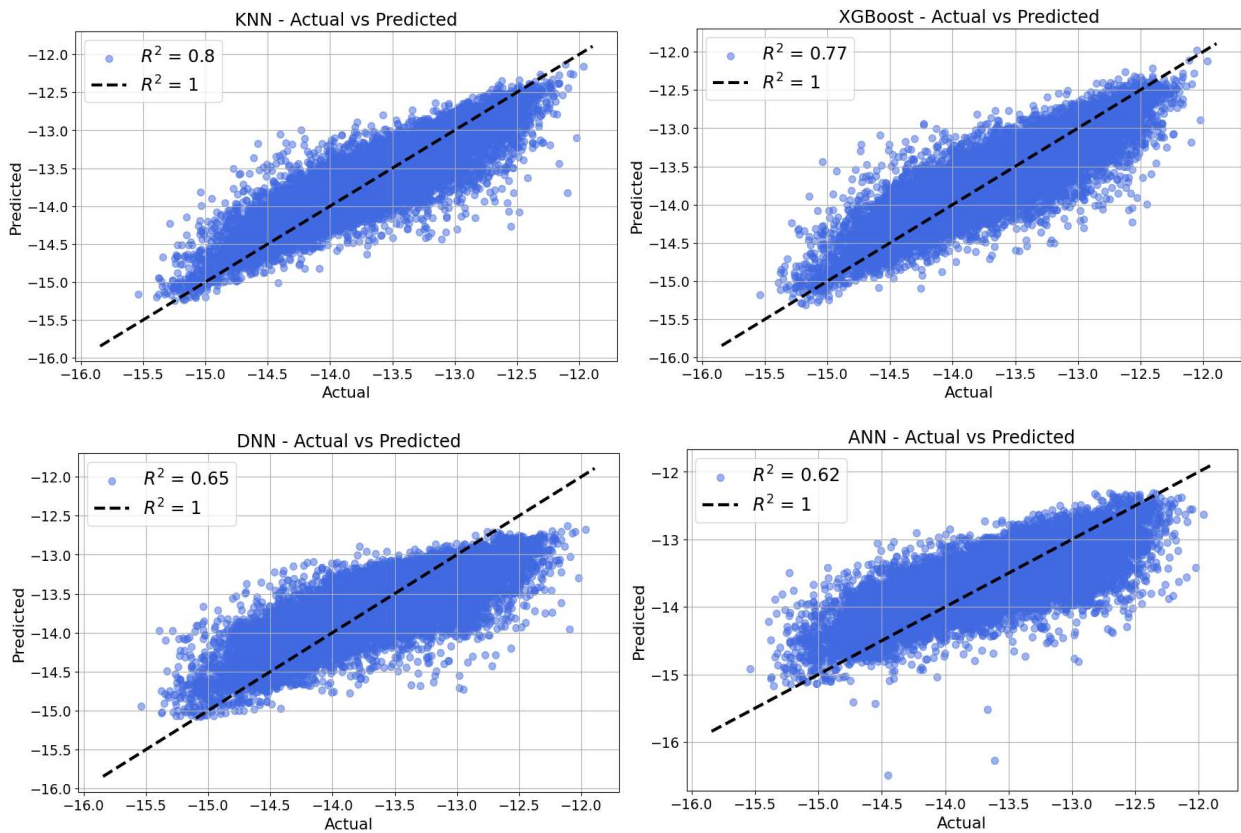
L'algorithme XGBoost a atteint ses performances optimales avec 3000 estimateurs, un taux d'apprentissage de 0.1, une profondeur maximale de 8 et 42 états aléatoires pour garantir la reproductibilité. Les résultats sont comme suit : $R^2 = 0.81$ et $RMSE = 0.05$ pour l'été, $R^2 = 0.85$ et $RMSE = 0.04$ pour le printemps, $R^2 = 0.77$ et $RMSE = 0.07$ pour l'automne, et $R^2 = 0.75$ et $RMSE = 0.08$ pour l'hiver. Cela indique que XGBoost a bien performé, rivalisant avec le KNN.

Les résultats du modèle ANN sont moins satisfaisants que ceux obtenus par les autres algorithmes. Avec des valeurs de R^2 et RMSE de 0.7 et 0.08 pour l'été, 0.77 et 0.07 pour le

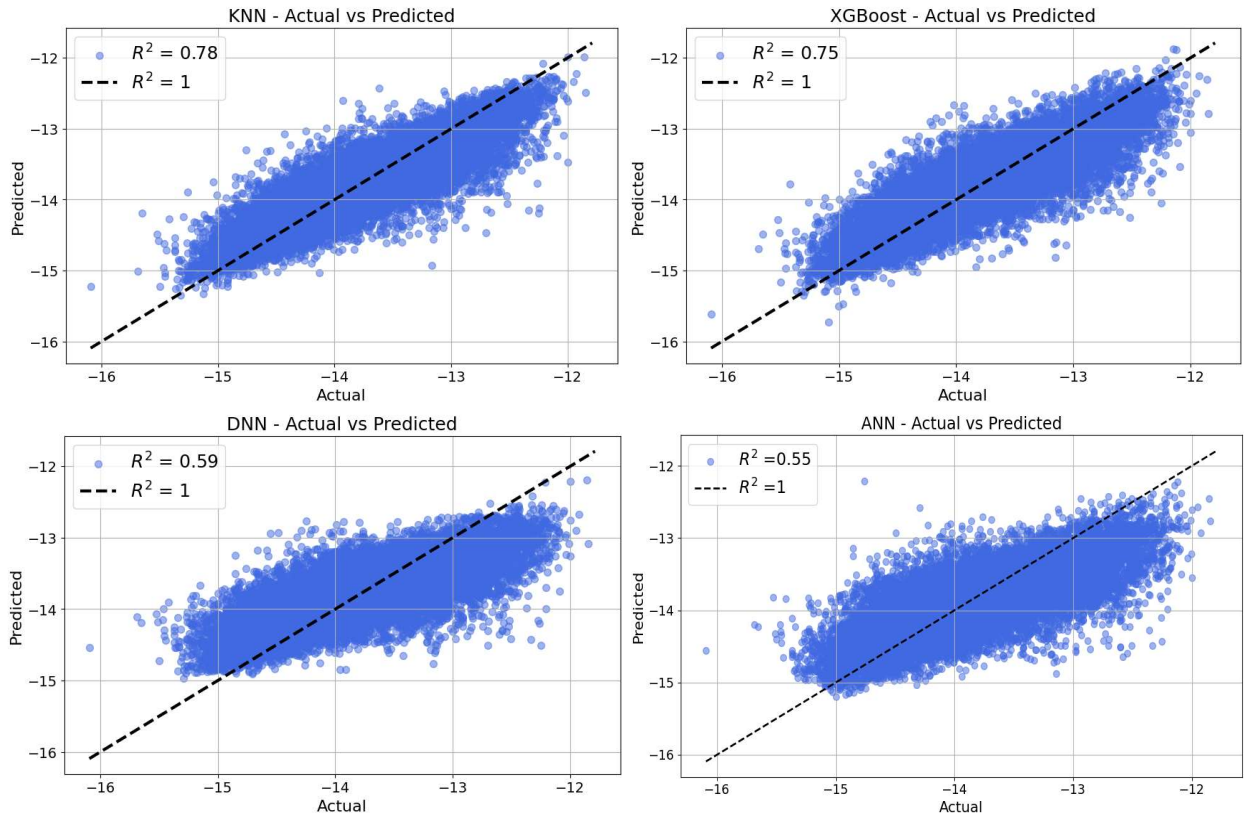
printemps, 0.62 et 0.09 pour l'automne, et 0.55 et 0.11 pour l'hiver, le modèle ANN n'a pas réussi à égaler la précision des autres. Le modèle a été défini avec une couche d'entrée de 64 neurones et deux couches cachées de 32 et 16 neurones, toutes utilisant la fonction d'activation ReLU (Rectified Linear Unit). L'optimiseur utilisé était Adam, qui ajuste le taux d'apprentissage pour chaque paramètre, offrant une solution efficace pour des ensembles de données complexes. Le modèle a été entraîné pendant 200 époques avec une taille de groupe de 32.

Le dernier algorithme, le DNN, plus complexe à ajuster, comportait trois couches cachées de 128, 64 et 32 neurones, avec des couches Dropout pour éviter le surapprentissage. L'optimiseur Adam a également été utilisé, avec des résultats de R^2 et RMSE variant selon les saisons : 0.73 et 0.07 pour l'été, 0.79 et 0.06 pour le printemps, 0.65 et 0.09 pour l'automne, et 0.59 et 0.1 pour l'hiver.

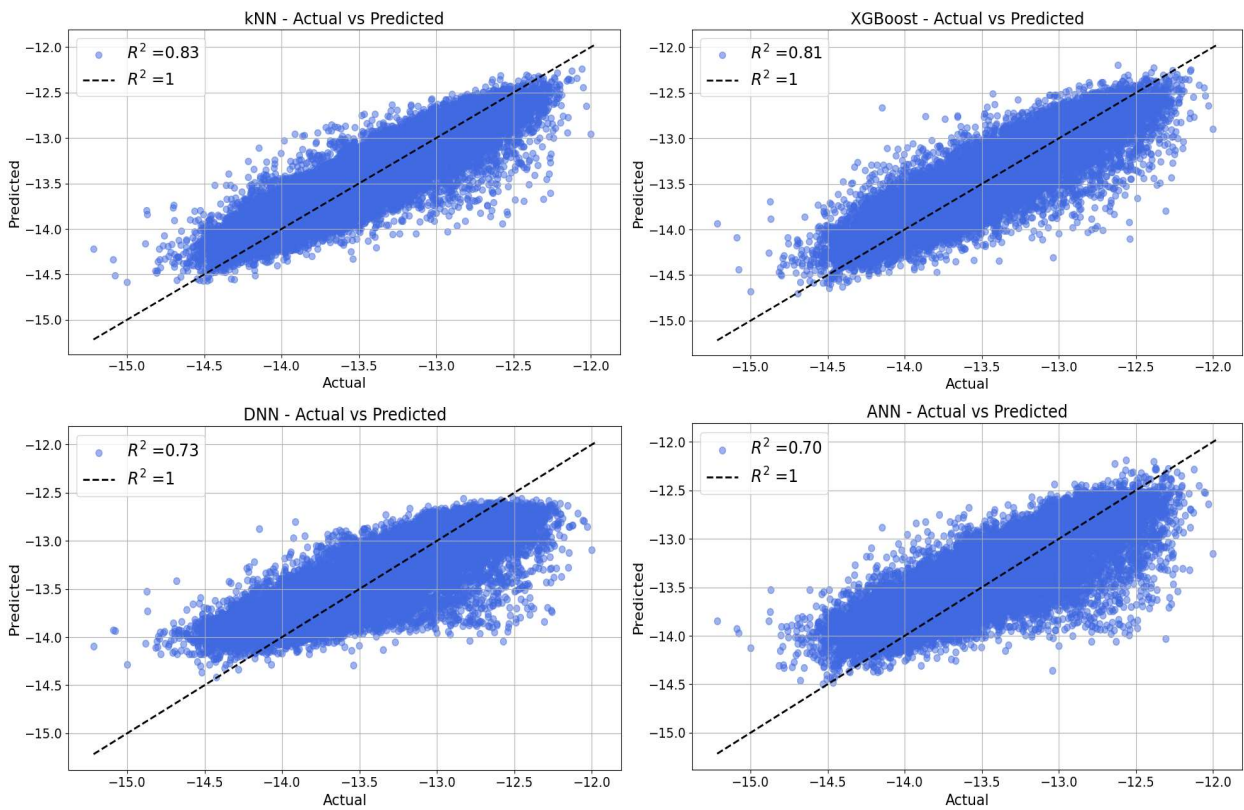
En conclusion, le KNN a montré les meilleures performances globales, atteignant les meilleures valeurs de R^2 et de RMSE. XGBoost a également donné de bons résultats, tandis que les performances des algorithmes ANN et DNN étaient inférieures, avec un ajustement particulièrement faible pour l'ANN.



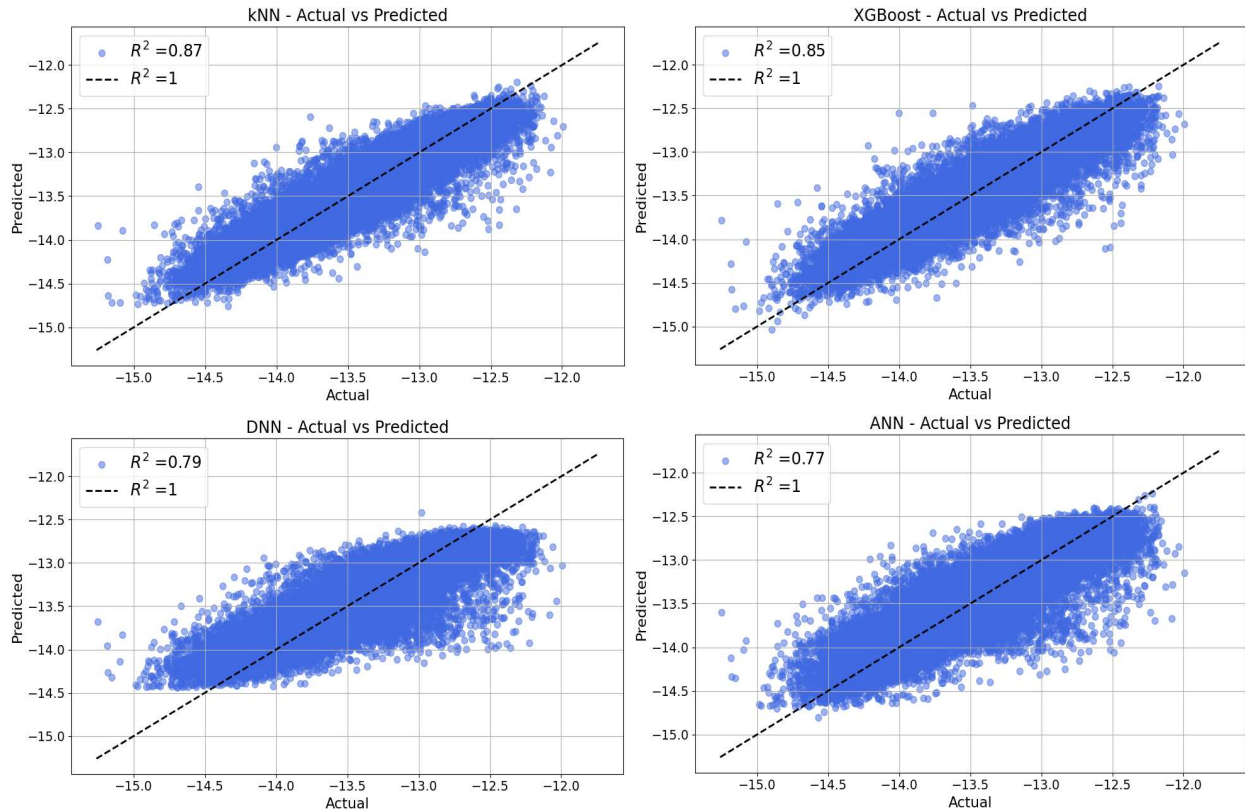
(a) Données de la saison d'automne



(b) Données de la saison d'hiver



(c) Données de la saison d'été



(d) Données de la saison de printemps

Figure IV-3. Diagrammes de dispersion des quatre algorithmes de ML pour l'ensemble de données à travers toutes les saisons.

IV.5 Calcul du BER et de la capacité de FSO en utilisant la classification DNN pour la modulation adaptative

IV.5.1 Classification DNN

Dans ce contexte, la deuxième étape de notre étude a porté sur la modélisation des deux types de modulation utilisés en hiver, en fonction de l'intensité de la turbulence : l'OOK pour des turbulences modérées à fortes et le 8-QAM pour des turbulences faibles, en utilisant un modèle de classification basé sur le DNN.

Pour cette modélisation, plusieurs variables environnementales ont été prises en compte, telles que : T , IR_{temp} , P_{air} , SF , ρ , Um_{Sonic} et C_n^2 . Ces paramètres ont une influence directe sur la propagation du signal optique, notamment en raison de la distorsion causée par la turbulence. Au départ, les données expérimentales du paramètre C_n^2 ont été utilisées pour calculer σ_R^2 à l'aide de l'équation (II-13) pour une onde plane avec une λ de 1550 nm et une distance de transmission L de 3000 m.

Dans notre ensemble de données, la modulation "8-QAM" a été assignée lorsque $\sigma_R^2 < 1$, ce qui indique des conditions de faible turbulence. À l'inverse, la modulation "OOK" a été choisie pour $\sigma_R^2 > 1$, indiquant une turbulence plus forte. La figure (IV-4) illustre l'utilisation de DNN pour identifier le type de modulation utilisé dans une liaison FSO. Ce modèle a été validé pour les autres saisons, avec des résultats similaires observés tout au long de l'année.

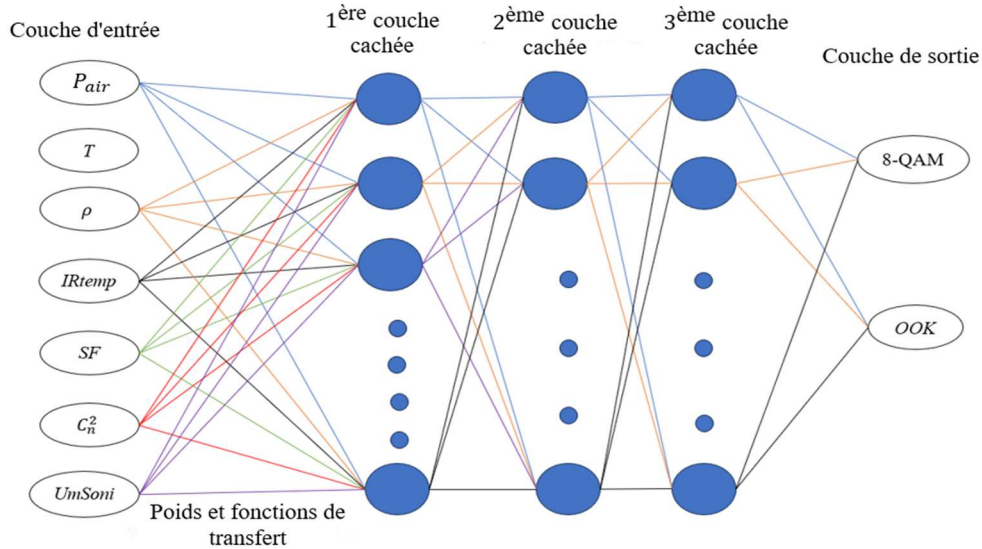


Figure IV-4. Méthode DNN pour l'identification du type de modulation d'une liaison FSO.

Le réseau de classification DNN utilisé dans cette étude se compose de trois couches cachées, avec respectivement 128, 64 et 32 neurones. Afin de prévenir le surapprentissage, une fonction d'activation ReLU a été intégrée dans chaque couche cachée. De plus, des couches de Dropout ont été ajoutées après chaque couche cachée pour réduire le surapprentissage, avec un taux de Dropout de 50 %. Dans un cadre de classification binaire, la couche de sortie du réseau utilise une fonction d'activation sigmoïde pour prédire les classes (OOK ou 8-QAM). Le modèle a été conçu avec un taux d'apprentissage de 0,001 et la fonction de perte entropie croisée binaire. L'optimisation du modèle a été réalisée avec l'optimiseur Adam, reconnu par sa capacité à ajuster les paramètres du modèle de manière efficace. L'ensemble de données a été divisé en deux parties : 80 % des données pour l'entraînement et 20 % pour les tests. Afin d'améliorer l'efficacité de l'entraînement et d'éviter le surapprentissage, des techniques telles que l'arrêt anticipé et un planificateur de taux d'apprentissage ont été mises en place. Le modèle a été entraîné avec une taille de groupe de 32, pendant un maximum de 150 époques.

La figure (IV-5) montre l'évolution des performances du modèle pendant l'entraînement, avec les courbes de précision et de perte pour les ensembles d'entraînement et de validation. Au début de l'entraînement, le modèle affiche une bonne précision, qui se stabilise après 50 époques.

L'arrêt anticipé a permis d'interrompre l'entraînement à la 102^{ème} époque, une fois que les performances du modèle se sont stabilisées.

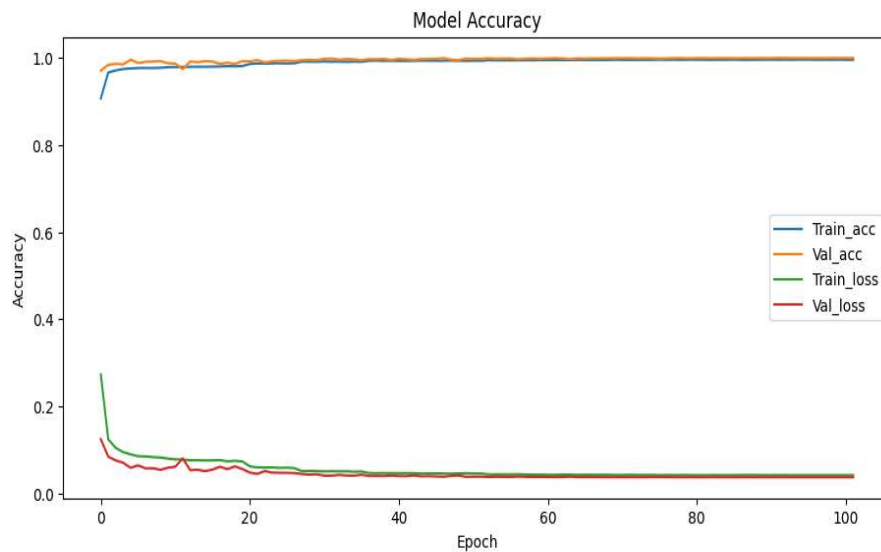


Figure IV-5. Performance du classificateur DNN en hiver en termes de précision et de perte.

La figure (IV-6) présente la matrice de confusion du modèle DNN pour évaluer ses performances en classification binaire. Elle inclut les valeurs suivantes :

- Vrais négatifs ($C_{0,0}$) : observations correctement classées comme "8-QAM".
- Faux négatifs ($C_{1,0}$) : observations de la classe "OOK" incorrectement classées comme "8-QAM".
- Vrais positifs ($C_{1,1}$) : observations correctement classées comme "OOK".
- Faux positifs ($C_{0,1}$) : observations de la classe "8-QAM" incorrectement classées comme "OOK".

Les résultats montrent une excellente performance du DNN, avec seulement 1 faux négatif ($C_{1,0} = 1$) et 5 faux positifs ($C_{0,1} = 5$). Cela indique qu'à partir de 20206 instances étiquetées "1", seules 5 ont été mal classées, et parmi 5733 instances étiquetées "0", seulement 1 a été faussement classée.

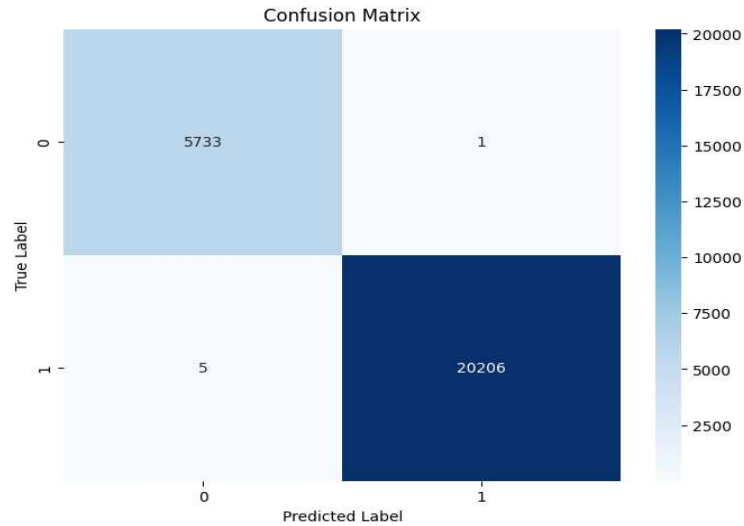


Figure IV-6. Matrice de confusion du classificateur DNN en hiver.

IV.5.2 Analyse des performances du système FSO avec et sans modulation adaptative

Cette analyse a pour objectif d'estimer le BER et la capacité de la liaison FSO en utilisant des données expérimentales sur la turbulence optique et les conditions météorologiques. Les données de σ_R^2 ont permis de calculer les paramètres environnementaux α et β à partir des équations (II-15 et II-16). Nous avons supposé des niveaux de SNR typiques $I = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{FSO}}}$ de 10 dB et 20 dB qui ont été utilisés pour appliquer les équations (IV-6), (IV-7) et (IV-8). Ces équations permettent de calculer le BER et la capacité du canal pour chaque mesure de σ_R^2 au cours des quatre saisons, avec et sans modulation adaptative.

La figure (IV-7) montre les performances de la capacité du canal et du BER en fonction de σ_R^2 pour la modulation adaptative, 8-QAM et OOK avec des SNR de 10 dB et 20 dB. L'augmentation de σ_R^2 entraîne une augmentation du BER pour OOK et 8-QAM et une diminution de la capacité du canal pour ces deux modulations.

La modulation adaptative réduit le BER, notamment sous des conditions de turbulence élevée ($\sigma_R^2 > 1$). Dans ces conditions, le système peut passer à une modulation d'ordre inférieur, comme OOK, pour augmenter la robustesse et la résistance aux distorsions. Sous de bonnes conditions de canal ($\sigma_R^2 < 1$), il peut passer à une modulation d'ordre supérieur, comme 8-QAM, pour maximiser la capacité du canal.

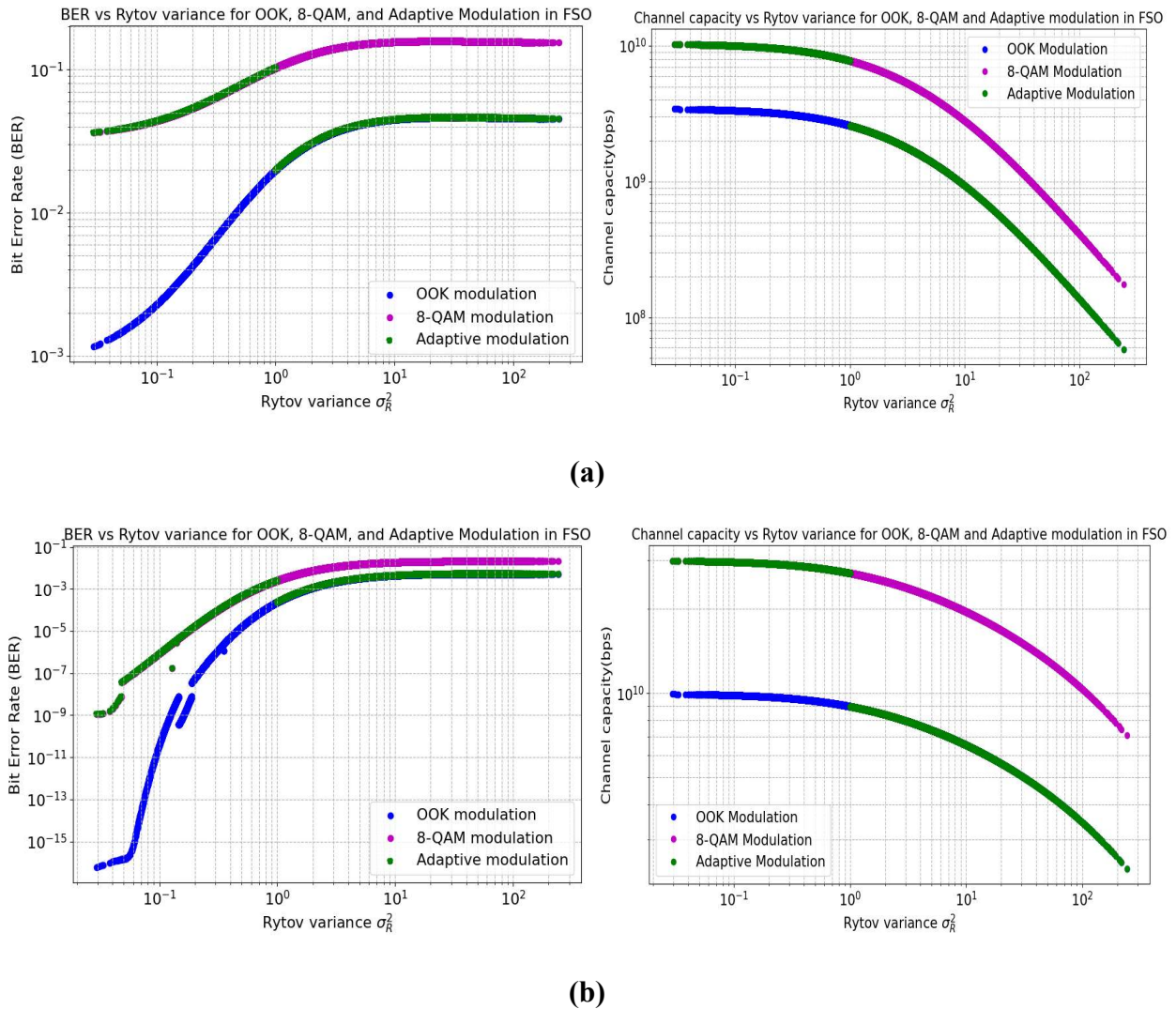
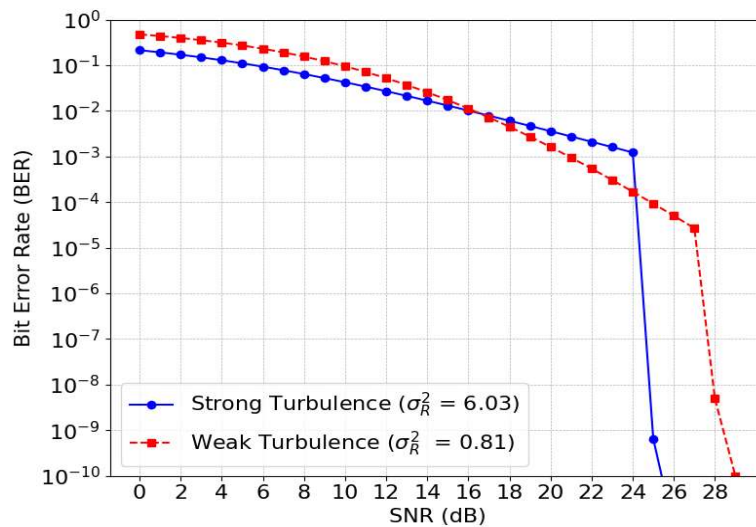


Figure IV-7. BER et capacité du canal en fonction de σ_R^2 d'un système FSO avec et sans modulation adaptative : (a) SNR = 10 dB et (b) SNR = 20 dB.

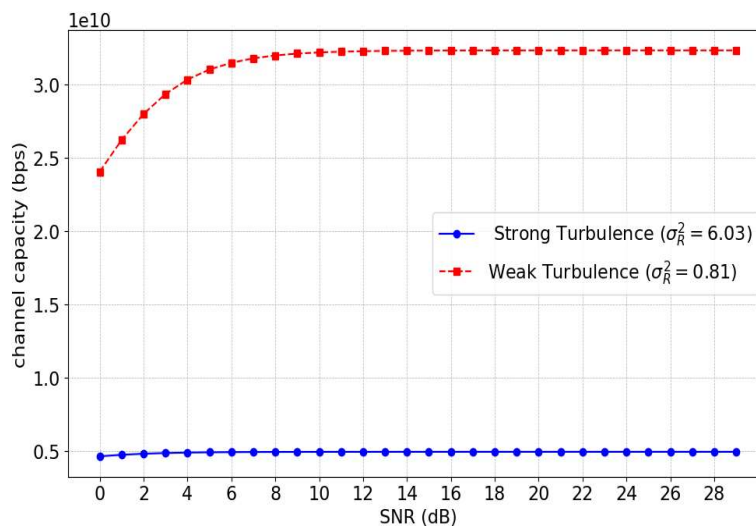
Nous avons également étudié l'impact des niveaux de SNR sur le BER et la capacité du canal pour la modulation adaptative dans des conditions hivernales. Les résultats présentés dans les graphiques BER vs SNR (Figure (IV-8 (a))) montrent que les performances de la liaison FSO s'améliorent avec l'augmentation du SNR, aussi bien sous faible que forte turbulence. Sous une forte turbulence, le BER est plus élevé en raison de la distorsion et de l'atténuation du signal. Cependant, la modulation adaptative permet de réduire cet effet en passant dynamiquement à la modulation OOK, plus robuste. Sous une faible turbulence, les distorsions étant moindres, le système peut utiliser des modulations d'ordre supérieur (8-QAM) pour maximiser la capacité du canal. Toutefois, ces modulations sont plus sensibles au bruit et nécessitent des SNRs plus élevés pour maintenir des BERs faibles. Ce compromis explique la différence de performances observées

entre les scénarios de faible et forte turbulence, où une turbulence plus forte peut offrir de meilleures performances de BER grâce à la sélection de schémas de modulation plus robustes.

De même, les graphiques capacités du canal en fonction du SNR (Figure (IV-8 (b))) montrent une augmentation régulière de la capacité du canal avec l'augmentation du SNR, les améliorations étant plus marquées en présence de faible turbulence. L'approche de modulation adaptative permet l'utilisation de modulations d'ordre supérieur (8-QAM) lorsque les conditions du canal sont favorables, et d'une modulation plus robuste (OOK) en forte turbulence, optimisant ainsi le compromis entre fiabilité et efficacité.



(a)



(b)

Figure IV-8. BER et capacité du canal en fonction du SNR du système FSO avec modulation adaptative :

(a) BER et (b) capacité du canal.

IV.6 Analyse du BER et de la capacité d'un système hybride FSO/MIMO-MMW avec et sans modulation adaptative

Dans cette section, nous examinons un système de communication hybride FSO/MIMO-MMW visant à améliorer la fiabilité de la transmission de données et les performances, en particulier sous des conditions atmosphériques variables. L'objectif principal est de calculer le BER et la capacité pour le système MIMO-MMW au cours des quatre saisons : automne, hiver, printemps et été, à une fréquence de 100 GHz.

Les performances du sous-système MIMO-MMW sont influencées par plusieurs facteurs, y compris l'absorption atmosphérique, qui varie considérablement en fonction de la fréquence. De plus, les niveaux d'absorption sont affectés par des paramètres tels que la T , la P_{air} et la ρ . Pour réaliser l'analyse, nous avons calculé le BER et la capacité du sous-système MIMO-MMW en utilisant les équations (III-13) et (IV-9) ainsi que les valeurs listées dans le tableau (IV-2). Nous avons ensuite intégré ces données avec un jeu de données saisonnier. Enfin, nous avons calculé le BER et la capacité pour le système FSO/MIMO-MMW en utilisant les équations (III-11) et (IV-10).

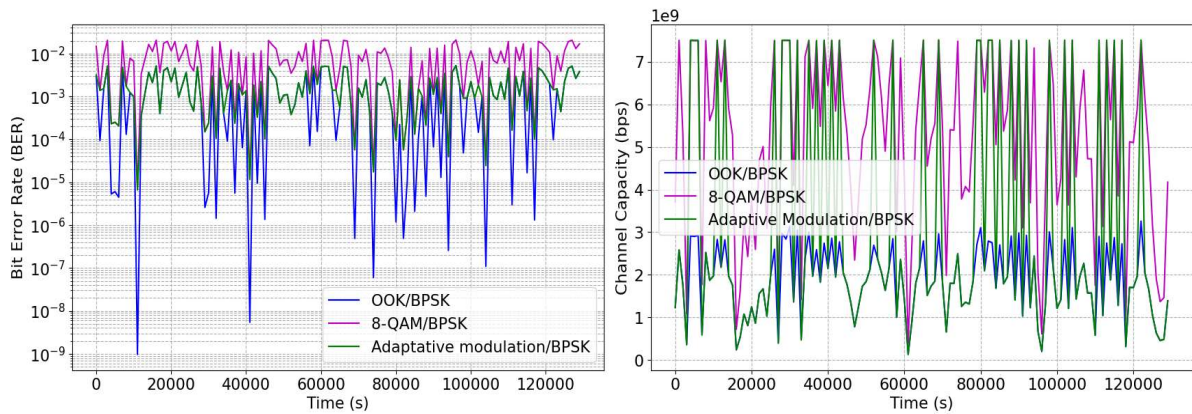
Paramètre	Valeur
Paramètres FSO	
Portée de la liaison	3000 m
Longueur d'onde	1550 nm
Mode de modulation	OOK and 8-QAM
Niveau typique de SNR (I)	10 dB and 20 dB
Paramètres MMW	
Fréquence	100 GHz
Modulation	BPSK
Nombre d'antennes d'émission	6
Nombre d'antennes de réception	6
Environnement	NLOS
Distance de séparation R-D	50 m and 200 m
Bande passante	1 GHz
Pression atmosphérique standard	101325 Pa
Température standard	288.15 K
Densité de vapeur d'eau de référence au niveau de la mer	7.5 g/m ³

Tableau IV-2. Paramètres du système.

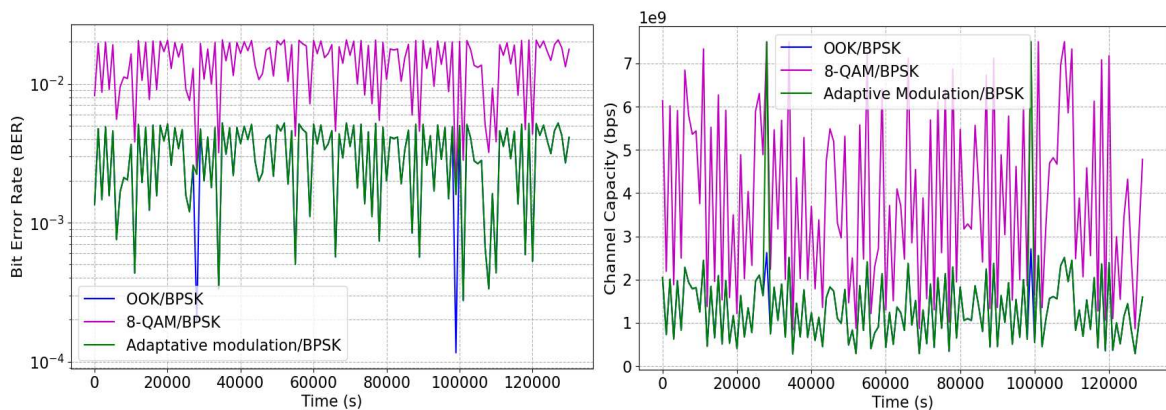
Les figures (IV-9) et (IV-10) présentent une représentation visuelle du BER et de la capacité du système mixte au cours des quatre saisons : automne, hiver, printemps et été. Les résultats montrent comment différentes techniques de modulation se comportent au fil du temps et sous

différentes conditions atmosphériques pour deux distances différentes : 50 mètres et 200 mètres entre le relais et l'utilisateur.

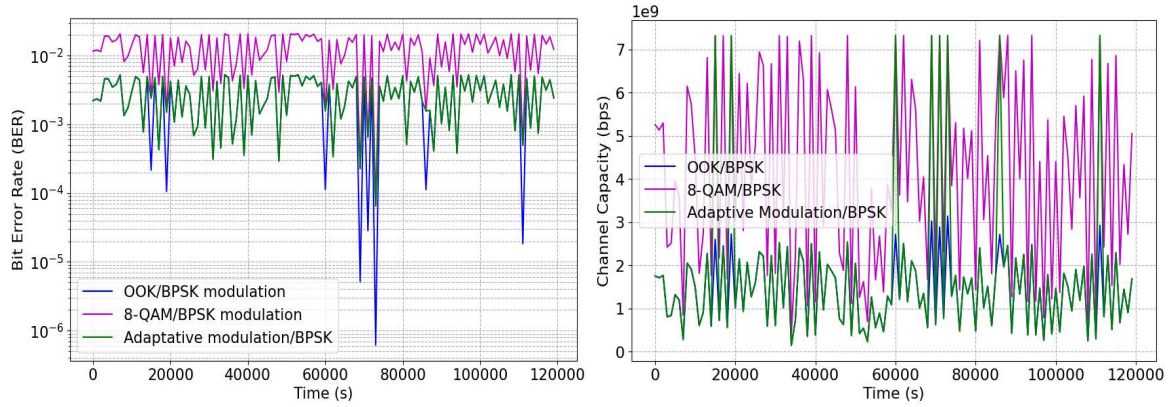
Les résultats montrent que OOK/BPSK a le BER le plus bas durant toute la période en raison de sa résistance aux distorsions, mais il atteint une capacité de canal plus faible. En revanche, 8-QAM/BPSK présente un BER plus élevé que OOK/BPSK et la modulation adaptative. Ainsi, 8-QAM est plus sensible au bruit et aux interférences, bien qu'il atteigne une capacité de canal plus élevée. La modulation adaptative permet de trouver un équilibre entre OOK/BPSK et 8-QAM/BPSK en ajustant dynamiquement le schéma de modulation en fonction des conditions du canal. Cela permet de minimiser le BER tout en atteignant une capacité de canal plus élevée simultanément.



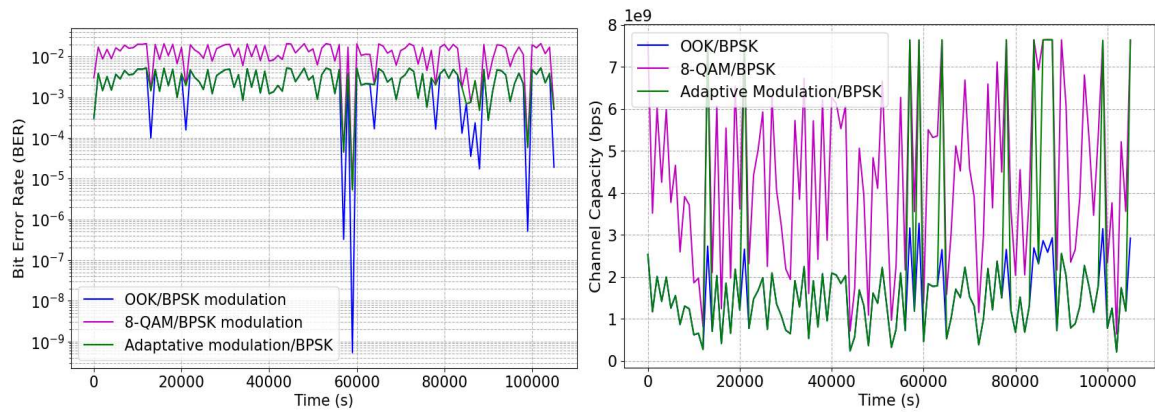
Hiver



Été

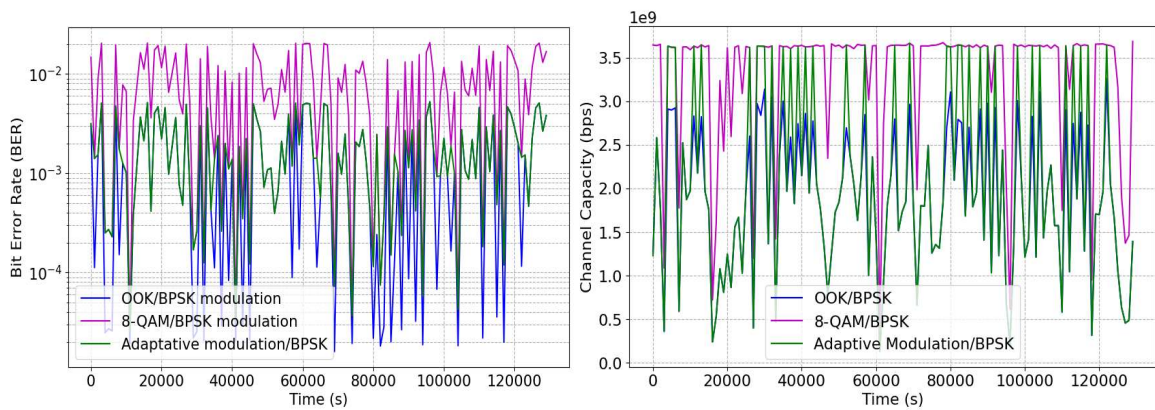


Printemps

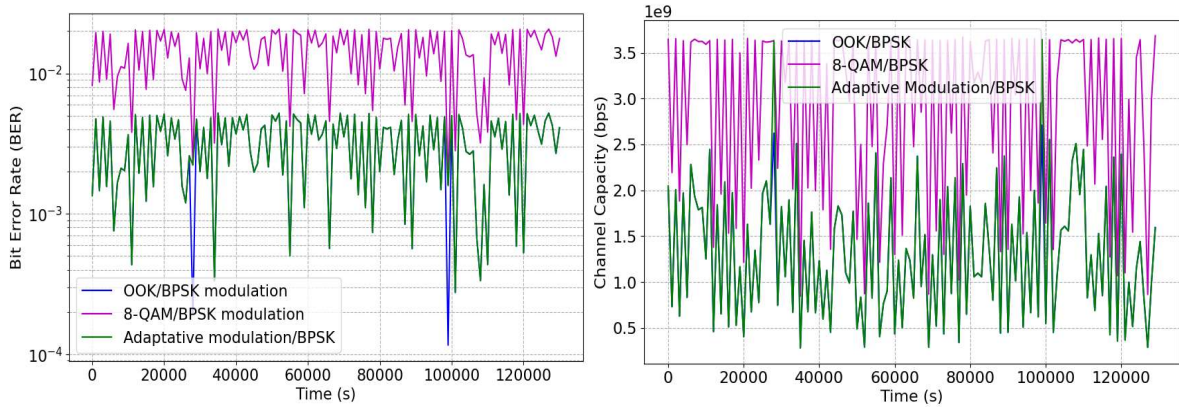


Automne

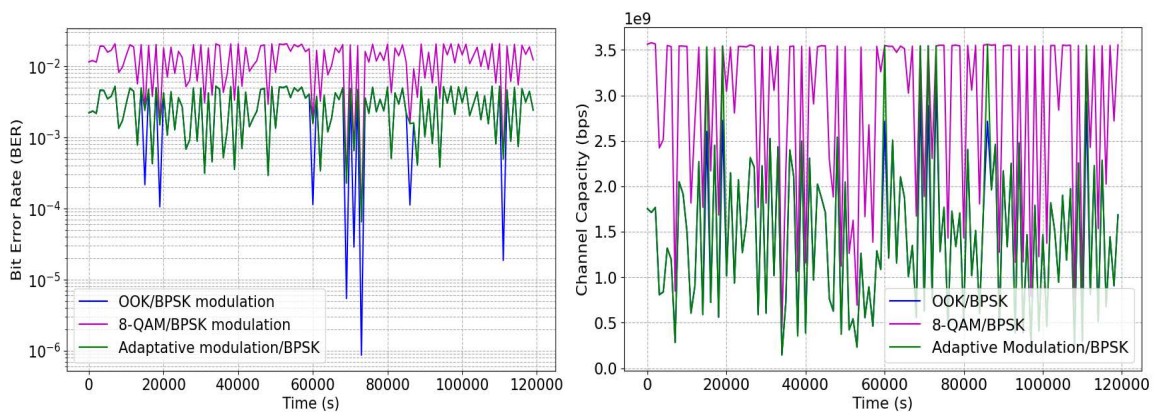
Figure IV-9. Variation quotidienne du BER et de la capacité du canal pour un système hybride FSO/MIMO-MMW au cours de chaque saison avec une distance de séparation R-D de 50 m.



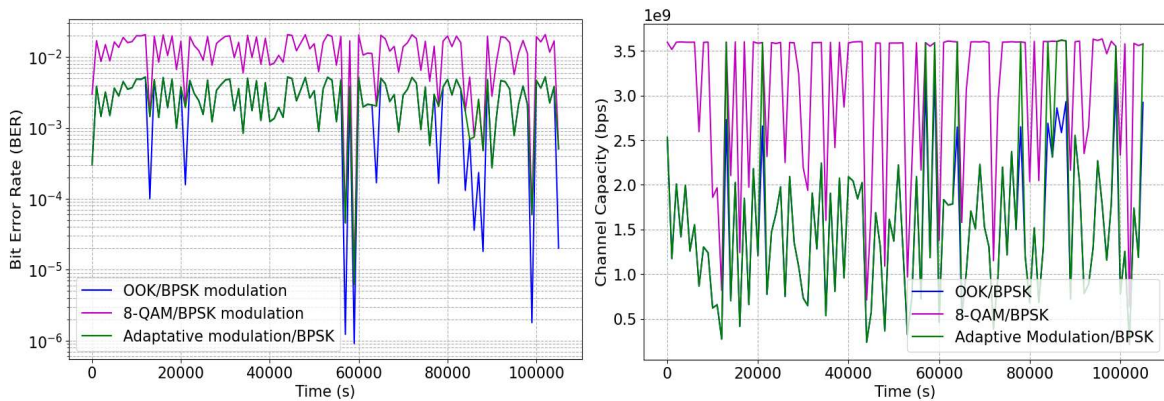
Hiver



Été



Printemps



Automne

Figure IV-10. Variation quotidienne du BER et de la capacité du canal pour un système hybride FSO/MIMO-MMW au cours de chaque saison avec une distance de séparation R-D de 200 m.

IV.7 Étude comparative avec les travaux antérieurs

Comparativement aux recherches existantes, telles que les études utilisant un algorithme de forêt aléatoire basé sur le ML pour changer la modulation dans des liens hybrides FSO/RF [9],

notre approche présente des avantages distincts. Bien que l'étude citée traite principalement des conditions de pluie et de brouillard pour adapter la modulation, notre modèle DNN offre une analyse plus complète en prenant en compte plusieurs variables atmosphériques et les données du canal en temps réel, ce qui permet d'améliorer l'exactitude de l'adaptation de la modulation et d'optimiser l'efficacité du système. De plus, contrairement à l'approche de [10], qui se concentre sur l'apprentissage de bout en bout pour la modulation M-PAM adaptative sous turbulence et bruit, notre méthode exploite le DNN pour optimiser la modulation dans un environnement hybride FSO/MMW, en tenant efficacement compte des variables environnementales dynamiques.

Pour souligner davantage la nouveauté et l'efficacité de notre approche proposée, le tableau (IV-3) présente une analyse comparative complète des principaux paramètres et méthodologies. Cette comparaison met en évidence les contributions uniques et les performances supérieures de notre système sous diverses conditions atmosphériques.

Étude	Modèle du système	Technologies clés	Conditions du canal	Mesures de performance	Contributions clés
[9]	Liaison hybride FSO/RF avec commutation dynamique (Random Forest)	Random Forest (ML), modulation adaptative	Pluie, brouillard	BER, disponibilité de la liaison	Commutation adaptative de la modulation basée sur les conditions météorologiques à l'aide d'algorithmes de ML.
[10]	Liaison FSO avec M-PAM adaptative basée sur apprentissage bout-en-bout	M-PAM, apprentissage bout-en-bout, égaliseur de canal	Turbulence atmosphérique, bruit	BER, débit de données	L'apprentissage bout-en-bout permet une adaptation en temps réel de l'ordre de modulation sans dépendre du CSI, maximisant le débit dans des conditions de puissance et de canal variables.
Notre travail	Système hybride FSO/MMW avec adaptation de modulation basée sur DNN	MIMO, modulation adaptative (DNN)	Turbulence atmosphérique	BER, Capacité du canal	Adaptation en temps réel de la modulation utilisant le DNN pour des variables environnementales dynamiques, améliorant la robustesse et l'efficacité du système mixte FSO/MMW.

Tableau IV-3. Analyse comparative des études connexes.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une approche novatrice intégrant des DNN pour la sélection adaptative de modulation dans des systèmes hybrides FSO/MIMO-MMW. Notre méthode exploite les forces complémentaires des technologies FSO et MMW, améliorant ainsi la fiabilité des communications et les performances dans des conditions atmosphériques variées. L'étude est structurée en deux sections principales. La première fournit une analyse approfondie du paramètre C_n^2 . Nous avons réalisé une analyse de régression en utilisant quatre algorithmes de ML courants, formés sur des ensembles de données saisonniers contenant six paramètres météorologiques mesurés expérimentalement. Les résultats ont révélé que l'algorithme KNN offrait les meilleures performances globales avec des valeurs de R^2 et RMSE allant respectivement de 0,78 à 0,87 et de 0,04 à 0,07 selon la saison. L'algorithme XGBoost a montré des performances comparables, tandis que les modèles ANN et DNN se sont avérés moins précis, avec des variations significatives selon les saisons.

La seconde section analyse les performances d'un lien hybride FSO/MIMO-MMW théorique, en se concentrant sur le BER et la capacité. Nous avons utilisé le DNN pour la sélection adaptative de modulation dans le sous-système FSO. Les modèles DNN ont permis de classifier dynamiquement les schémas de modulation, en sélectionnant 8-QAM pour une faible turbulence et OOK pour une forte turbulence. Les simulations ont montré que cette approche adaptative améliore la fiabilité et optimise les performances du système en ajustant les stratégies de modulation en temps réel. En conséquence, notre méthode réduit significativement le BER tout en augmentant la capacité du canal, démontrant ainsi le potentiel de DNN pour optimiser les communications dans des environnements dynamiques. Cette approche constitue une avancée importante pour les systèmes de communication hybrides, offrant une robustesse accrue face aux variations des conditions atmosphériques.

Références bibliographiques du chapitre IV

- [1] Lionis, A., et al. (2023). Experimental machine learning approach for optical turbulence and FSO outage performance modeling. *Electronics*, 12(3), 506.
- [2] Goel, A., Upadhya, A., & Dwivedi, V. K. (2021). Diversity aided millimeter-wave/free space optical cooperative relaying systems. *International Journal of Communication Systems*, 34(4), e4700.
- [3] Siles, G. A., Riera, J. M., & García-del-Pino, P. (2011). On the use of radiometric measurements to estimate atmospheric attenuation at 100 and 300 GHz. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 32, 528-540.
- [4] Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. (2024). 5G network performance using novel MIMO mixed FSO/MMW communication systems under pointing errors effect: test analysis using image transmission. *Journal of Optics*, 26(11), 115707. <https://dx.doi.org/10.1088/2040-8986/ad835f>
- [5] Giri, R. K., & Patnaik, B. (2018). BER analysis and capacity evaluation of FSO system using hybrid subcarrier intensity modulation with receiver spatial diversity over log-normal and gamma-gamma channel model. *Optical and Quantum Electronics*, 50, 1-20.
- [6] Ali Amirabadi, M., & Tabataba Vakili, V. (2020). Performance analysis of a novel hybrid FSO/RF communication system. *IET Optoelectronics*, 14(2), 66-74.
- [7] Lionis, A., Peppas, K., Nistazakis, H. E., Tsigopoulos, A., Cohn, K., & Zagouras, A. (2021, June). Using machine learning algorithms for accurate received optical power prediction of an FSO link over a maritime environment. In *Photonics* (Vol. 8, No. 6, p. 212). MDPI.
- [8] Pineda-Jaramillo, J. D. (2019). A review of Machine Learning (ML) algorithms used for modeling travel mode choice. *Dyna*, 86(211), 32-41.
- [9] Shao, J., Liu, Y., Du, X., & Xie, T. (2024, April). Adaptive Modulation Scheme for Soft-Switching Hybrid FSO/RF Links Based on Machine Learning. In *Photonics* (Vol. 11, No. 5, p. 404). MDPI.
- [10] Hameed, S. M., Mohammed, J. K., & Abdulsatar, S. M. (2024). Performance of adaptive M-PAM modulation for FSO systems based on end-to-end learning. *Journal of Optics*, 1-10.

**Chapitre V: Système RoFSO en MMW sécurisé
par Chaos**

V.1 Introduction

Ce chapitre aborde la conception et l'optimisation des systèmes radio sur optique en espace libre (RoFSO) basés sur les MMWs, en commençant par l'analyse des méthodes de génération optique de signaux MMW pour renforcer les signaux à 60 GHz. Il explore les performances du système de transmission RoFSO avec technologie MIMO dans un environnement réel, améliorant la fiabilité des communications dans des conditions complexes. Le chapitre se concentre également sur la sécurisation des systèmes RoFSO à l'aide du chaos optique, une approche non linéaire garantissant une protection efficace des données sensibles. Enfin, il présente la conception et la simulation d'un système MIMO-RoFSO à 60 GHz, intégrant le chaos optique pour renforcer la sécurité des systèmes avancés.

V.2 RoFSO basé sur MMW

La technologie 5G est conçue pour répondre à la demande croissante de connectivité, en prenant en charge des applications telles que les véhicules autonomes, les villes intelligentes et la télémédecine. Avec une latence inférieure à 1 ms et un débit allant jusqu'à 10 Gbps [1].

Les MMWs offrent des vitesses élevées et une grande capacité, mais souffrent de certaines limitations telles que l'absorption atmosphérique et la faible portée. Les bandes millimétriques, avec leur large gamme de fréquences, permettent la transmission rapide de grandes quantités de données, couvrant une gamme de 30 à 300 GHz [2,3]. Parmi ces bandes, la bande 60 GHz se distingue par sa disponibilité mondiale et son statut sans licence, ce qui a suscité un intérêt croissant et conduit à sa normalisation pour différentes applications. Bien qu'il présente une perte de propagation importante, il reste adapté aux communications à courte portée et a été largement étudié pour être intégré dans les réseaux de transport à petites cellules de nouvelle génération [4,5].

L'intégration de la bande MMW aux systèmes optiques, notamment via RoFSO, permet de relever ces défis. RoFSO combine les signaux MMW avec la transmission FSO, en modulant directement les signaux MMW sur un faisceau optique, comme illustré dans la figure (V-1). Idéale pour le fronthaul et le backhaul des réseaux 5G, cette technologie offre une solution flexible et économique, particulièrement adaptée aux zones à climat favorable. Malgré sa sensibilité aux perturbations climatiques, RoFSO présente des avantages tels qu'une faible latence et une transmission à haut débit, répondant aux besoins des réseaux 5G et au-delà [6,7].

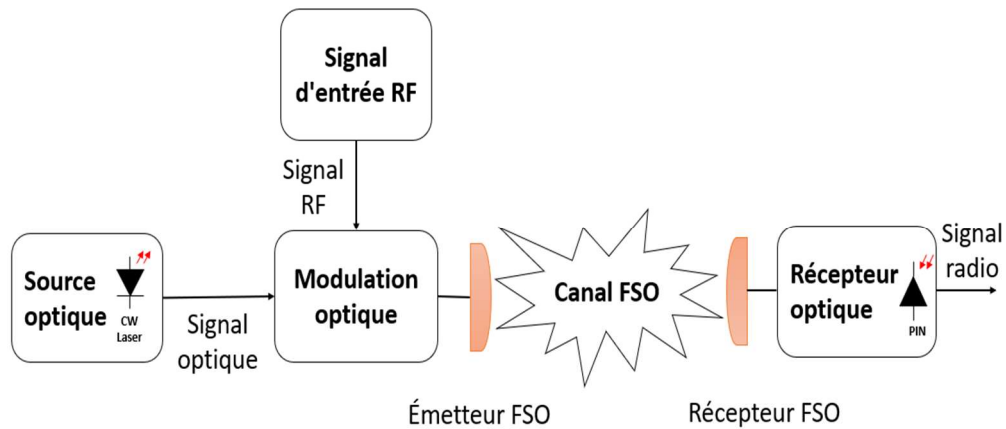


Figure V-1. Schéma-bloc généralisé d'un système de communication RoFSO.

V.2.1 Génération optique de signaux MMW

Les techniques de génération optique exploitent des composants photoniques avancés pour produire des signaux MMW à haute fréquence. Parmi les techniques les plus couramment utilisées, on trouve [15] : modulation d'intensité directe, modulation externe et hétérodyne optique, comme catégorisé dans la figure (V-2).

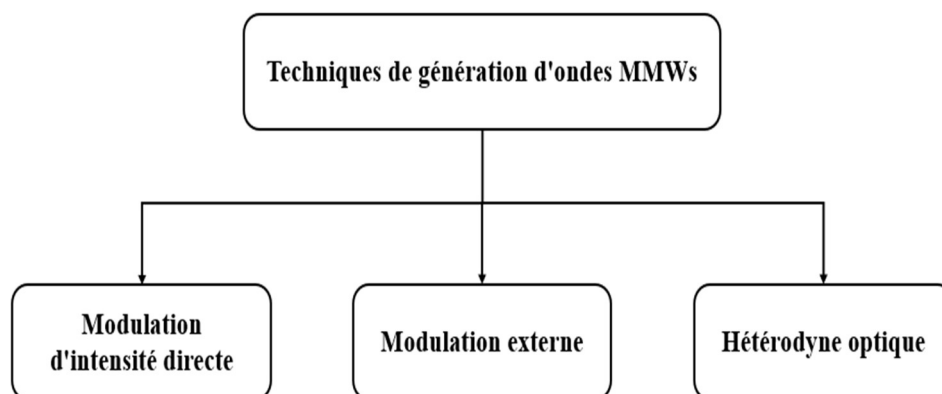


Figure V-2. Techniques de génération d'ondes MMW.

V.2.1.1 Modulation d'intensité directe

La modulation d'intensité directe est une méthode simple et économique pour générer des signaux MMW, où le signal de modulation contrôle directement l'intensité du laser à semi-conducteur, comme illustré dans la figure (V-3). Le signal millimétrique est ensuite récupéré via un photodétecteur.

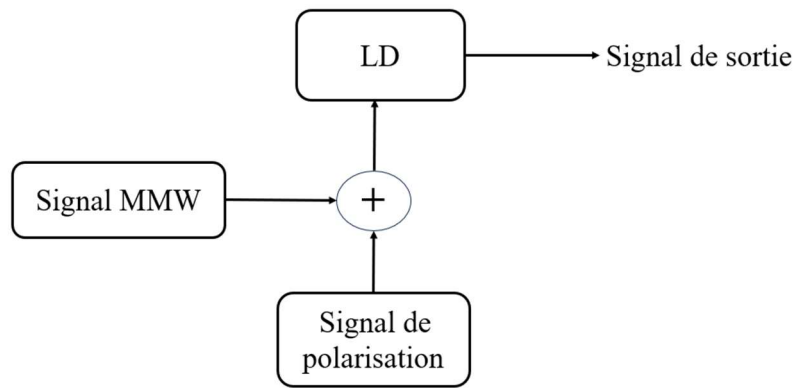


Figure V-3. Méthode de modulation directe (LD : Diode laser, MMW : Onde millimétrique).

Cependant, cette méthode est limitée aux basses fréquences, généralement inférieures à 40 GHz, en raison de la bande passante limitée du laser. Au-delà de cette limite, des problèmes tels que le bruit indésirable, les variations de fréquence et la non-linéarité apparaissent, ce qui compromet la stabilité du signal. Pour surmonter ces limitations, une modulation externe peut être utilisée, offrant des performances supérieures à des fréquences plus élevées [16].

V.2.1.2 Modulation externe

Cette technique utilise des modulateurs externes, tels qu'un modulateur Mach-Zehnder (MZM), un modulateur électro-absorbant (EAM) ou un modulateur de phase externe (EPM), pour générer des signaux à ondes millimétriques haute fréquence en exploitant les non-linéarités du modulateur, comme illustré dans la figure (V-4). Les harmoniques produites sont contrôlables via la tension de polarisation et l'indice de modulation, tandis que l'amplitude dépend de la tension de l'oscillateur local (LO) [17]. Cette approche réduit la bande passante requise, permet de générer des signaux haute fréquence à moindre coût et est disponible en modulation d'intensité ou de phase externe [18].

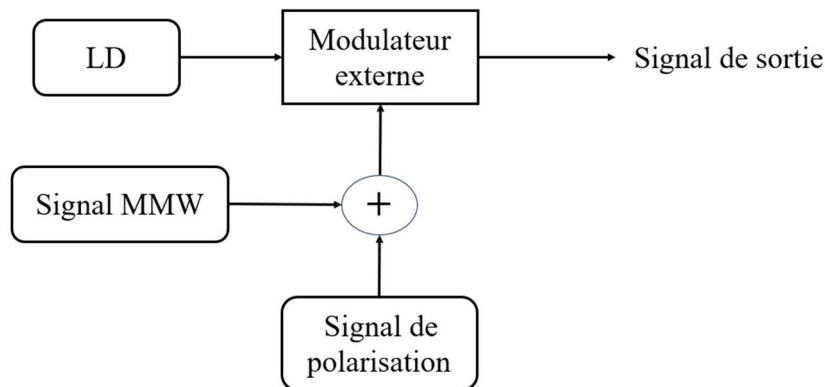


Figure V-4. Schéma fonctionnel de la modulation externe.

V.2.1.3 Hétérodyne optique

La méthode d'hétérodyne optique génère un signal d'impulsion haute fréquence à la sortie du photodétecteur en combinant deux signaux optiques de fréquences différentes ($\omega_1 - \omega_2$), comme illustré dans la figure (V-5). Il offre un gain de liaison accru, un rapport porteuse/bruit (CNR) élevé et une résistance améliorée à la dispersion chromatique, en particulier si une seule porteuse est modulée. Cependant, cette méthode est sensible au bruit de phase laser [19,20].

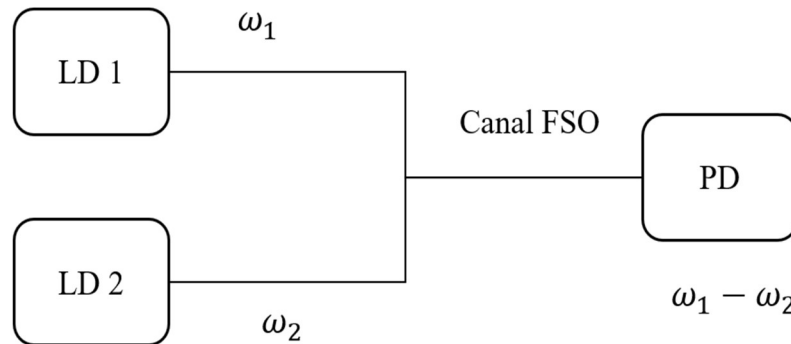


Figure V-5. Technique d'hétérodyne optique (LD 1 : Diode laser 1, LD 2 : Diode laser 2, PD : Photodétecteur).

V.3 Système de transmission RoFSO de 60 GHz avec la technologie MIMO

Le système RoFSO proposé utilise un modulateur d'intensité externe pour générer et transmettre des signaux MMW à 60 GHz depuis une station centrale vers une station de base (BS). Des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel OptiSystem.

L'architecture du système repose sur l'utilisation d'un laser à onde continue (CW) fonctionnant à une longueur d'onde de 1550 nm, avec une puissance d'entrée de 10 dBm et une largeur de raie de 1 MHz. Les données, générées par une séquence binaire pseudo-aléatoire (PRBS) codée en NRZ, sont modulées sur une porteuse RF de 60 GHz à l'aide d'un modulateur AM et d'un modulateur Mach-Zehnder pour générer le signal MMW. Le signal est transmis via un canal FSO et subit des atténuations dues aux conditions atmosphériques (brouillard, pluie, brume). À la BS, une photodiode PIN convertit le signal optique en électrique, et un démodulateur AM extrait les données. Exploitant la bande des 60 GHz, ce système allie faible latence et haut débit, mais reste sensible aux perturbations atmosphériques. La technologie MIMO compense ces limitations, améliorant portée et fiabilité. La figure (V-6) illustre l'architecture de ce système.

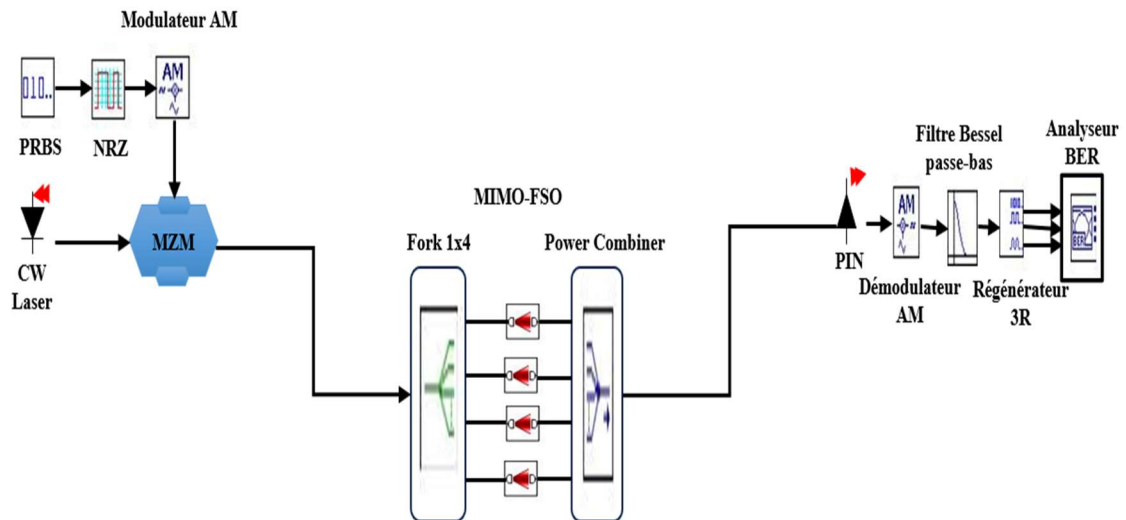


Figure V-6. Représentation schématique du système MIMO-RoFSO proposé.

V.3.1 Technologie MIMO dans les communications FSO

Les systèmes MIMO-FSO représentent une avancée majeure dans les communications optiques sans fil, offrant une fiabilité accrue et une capacité élevée grâce à la diversité spatiale et au multiplexage spatial. La diversité spatiale permet d'atténuer les effets des perturbations atmosphériques et des déviations du trajet grâce à plusieurs faisceaux ou fentes, garantissant ainsi une transmission fiable. Et, le multiplexage spatial augmente la capacité du système en exploitant plusieurs flux de données indépendants sur la même bande de fréquence, maximisant ainsi le débit sans augmenter la bande passante [21].

Ces caractéristiques font des systèmes MIMO-FSO une solution clé pour les réseaux modernes, y compris les réseaux 5G, répondant aux exigences de débit élevé et de fiabilité dans des environnements complexes [22]. Une illustration simplifiée du système MIMO-FSO est présentée à la figure (V-7).

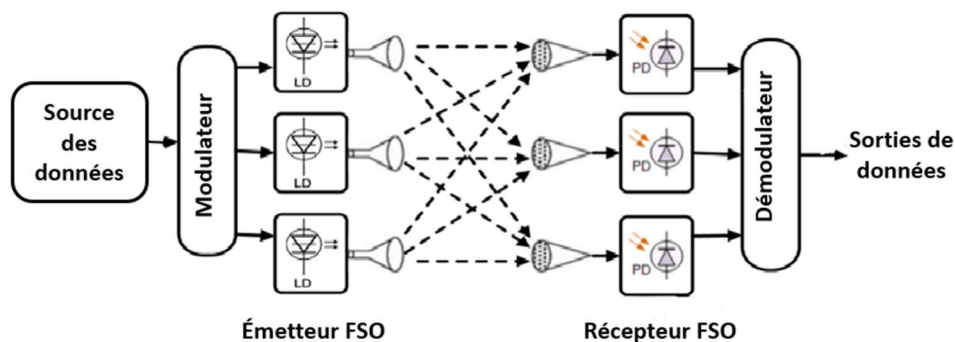


Figure V-7. Schéma-bloc d'un système MIMO-FSO.

V.3.2 Évaluation des performances

L'évaluation des performances du système de transmission RoFSO proposé repose sur des métriques essentielles, notamment le *BER*, le facteur de qualité *Q* et la portée de transmission. Ces paramètres permettent d'analyser la fiabilité et l'efficacité du système proposé sous différentes conditions atmosphériques, telles que le brouillard dense, les fortes pluies, et la brume. À travers des simulations effectuées sur OptiSystem, les performances du système RoFSO avec MIMO sont comparées à celles de configurations équivalentes sans MIMO, mettant en évidence les améliorations en termes de robustesse et de portée.

Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (V-1). Il serait intéressant de fixer certains paramètres tout en modifiant d'autres afin de mieux analyser leur impact sur la performance du système.

Paramètre	Valeurs
Puissance du laser CW	10 dBm
Longueur d'onde	1550 nm
Débit binaire	10 Gbit/s
Largeur de ligne	1 MHz
Atténuation	Brume : 4 dB/Km, Fortes pluies : 19,29 dB/Km et Brouillard dense : 113,2 dB/Km
Diamètre d'ouverture de l'émetteur	5 cm
Diamètre d'ouverture du récepteur	25 cm
Divergence du faisceau	1 mrad

Tableau V-1. Paramètres de la liaison FSO.

Le facteur de qualité *Q* est calculé en utilisant l'équation (V-1), prenant en compte les moyennes (μ_0 et μ_1) et les écarts types (σ_0 et σ_1) des signaux correspondant respectivement aux états logiques "0" et "1". Ce facteur intègre l'influence du bruit gaussien global affectant les performances du système [3] :

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

En outre, le *BER* est une métrique critique pour évaluer la précision des données transmises, est obtenu à partir de l'équation (V-2).

$$BER = \frac{M}{N+M} \cdot P_{e0} + \frac{N}{N+M} \cdot P_{e1} \quad (V-2)$$

Les probabilités des erreurs P_{e0} et P_{e1} , liées aux symboles logiques "0" et "1", sont définies par :

$$P_{e0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{S-\mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0}\right) \quad (\text{V-3})$$

$$P_{e1} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\mu_1-S}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) \quad (\text{V-4})$$

Où, S représente la valeur seuil pour la détection des symboles logiques, M et N indiquent les nombres d'échantillons pour les logiques "0" et "1", respectivement et $\operatorname{erfc}()$ est la fonction d'erreur [23].

V.3.3 Résultats et discussions

Les figures (V-8), (V-9) et (V-10) montrent les performances du système de communication RoFSO proposé en termes de BER et de Q , évaluées sous différentes conditions météorologiques, notamment en présence de brouillard dense, de fortes pluies et de brume. Ces performances sont mesurées pour les configurations SISO-FSO, 2×2-FSOs et 4×4-FSOs, en fonction de la longueur de la liaison FSO. Les résultats obtenus montrent l'effet des conditions météorologiques sur la fiabilité du système, le BER augmentant avec la distance de liaison. Les conditions de performance acceptables pour la distance maximale sont définies par un taux d'erreur binaire inférieur ou égal à 10^{-9} et un facteur de qualité supérieur ou égal à 6.

Dans des conditions de brouillard, la portée maximale atteinte est d'environ 1700 mètres pour le système SISO-FSO et de 2300 mètres pour le système 4×4-FSOs. En cas de fortes pluies, la distance maximale est réduite à 700 m pour le SISO-FSO et à 900 m pour le 4×4-FSOs. Enfin, en cas de brouillard dense, la portée maximale est limitée à 200 mètres pour le SISO-FSO et 240 mètres pour le 4×4-FSOs, en tenant compte des seuils BER et du Q .

Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'intégration de la technologie MIMO pour surmonter les limitations imposées par des conditions météorologiques défavorables.

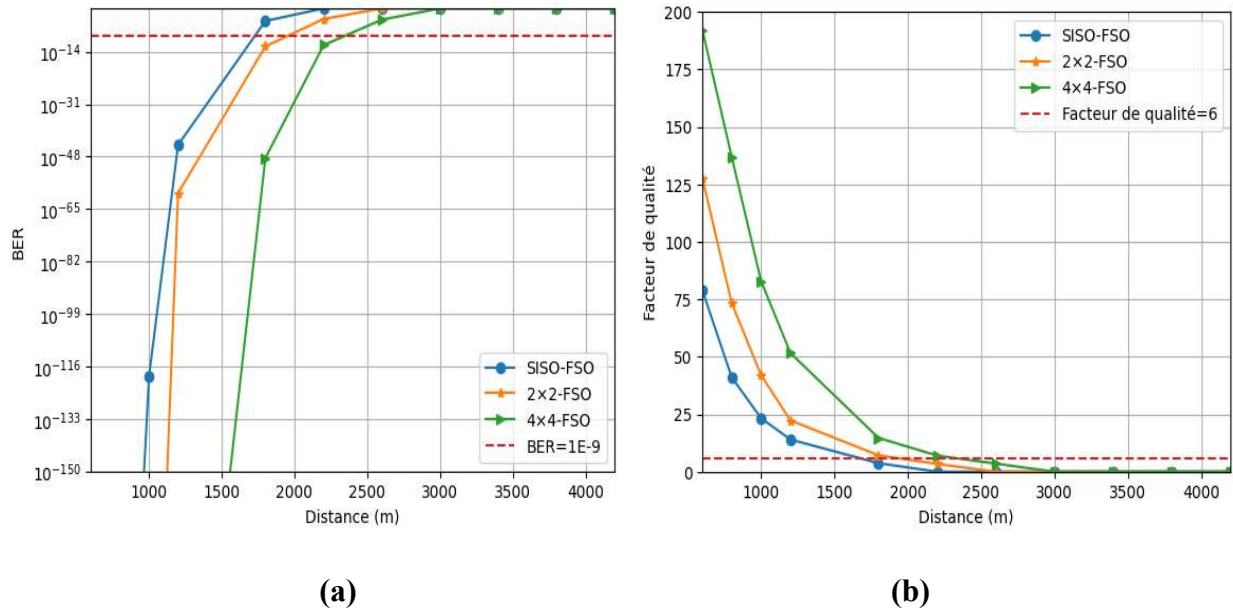


Figure V-8. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la longueur du lien FSO sous des conditions de brume pour trois scénarios : SISO-FSO, 2x2-FSOs et 4x4-FSOs.

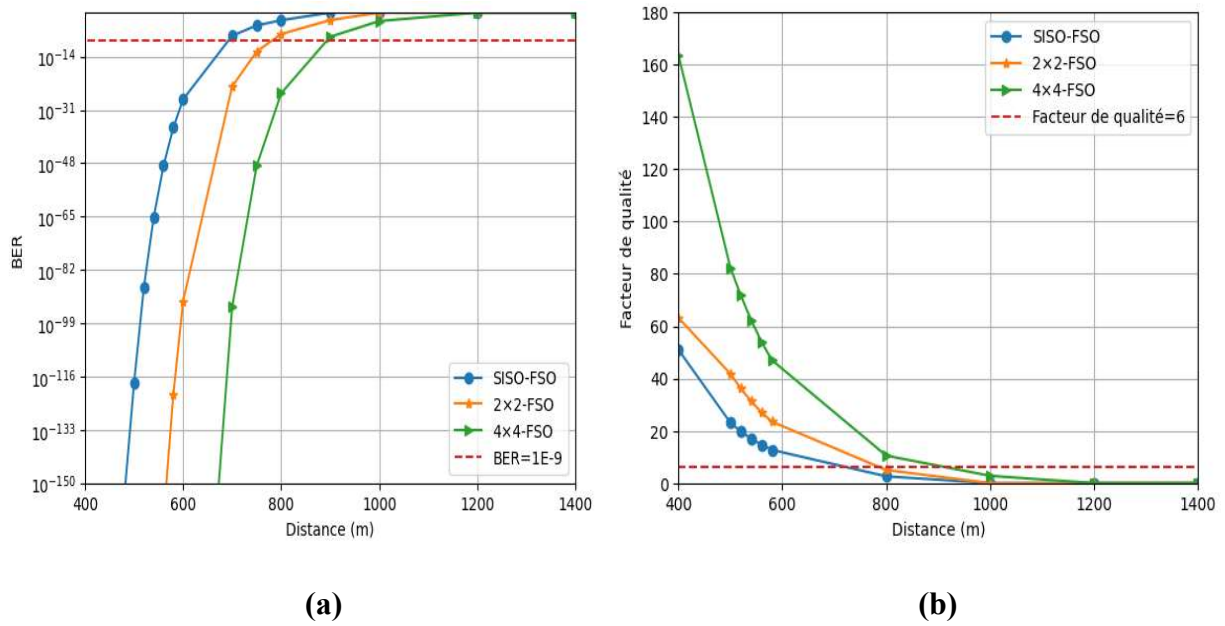


Figure V-9. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la longueur du lien FSO sous des conditions de fortes pluies pour trois scénarios : SISO-FSO, 2x2-FSOs et 4x4-FSOs.

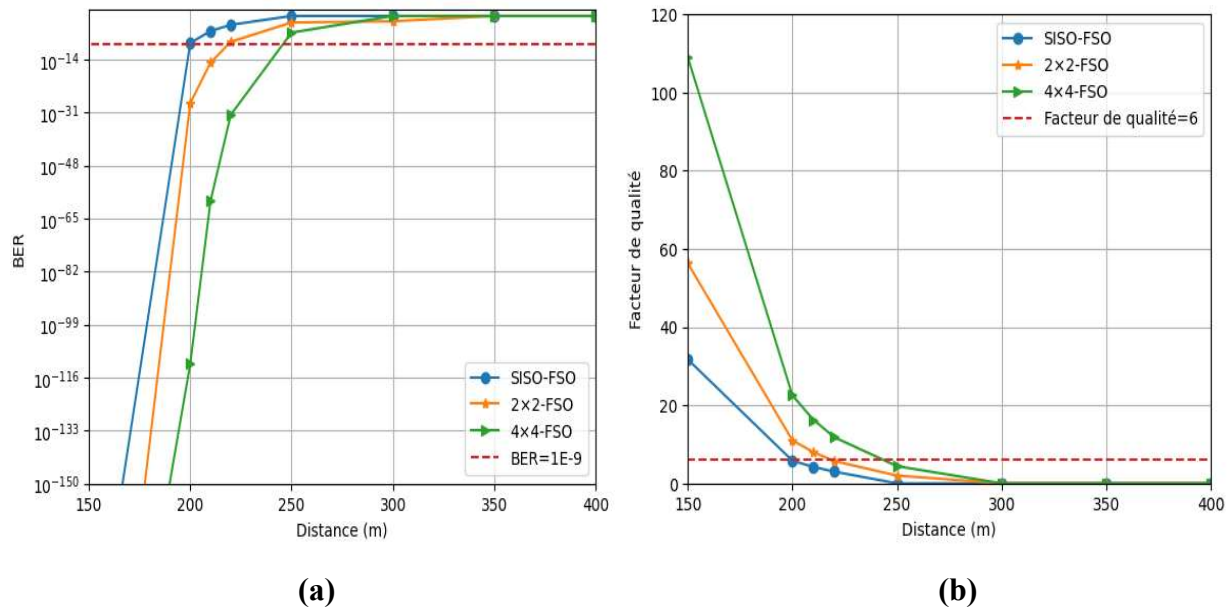


Figure V-10. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la longueur du lien FSO sous des conditions de brouillard dense pour trois scénarios : SISO-FSO, 2x2-FSOs et 4x4-FSOs.

V.4 Amélioration de la sécurité dans les systèmes RoFSO à l'aide du chaos optique

Avec le besoin croissant de communications à haut débit, les systèmes RoFSO présentent un potentiel très prometteur en raison de leurs avantages uniques. Ils restent néanmoins vulnérables aux interceptions et aux attaques malveillantes. L'intégration du chaos optique améliore sa sécurité en exploitant des phénomènes non linéaires complexes et imprévisibles pour masquer et crypter les données. Les signaux chaotiques générés par les lasers ou les oscillateurs optiques rendent le décryptage très difficile [24].

Cette section étudie les mécanismes par lesquels le chaos optique peut améliorer la sécurité des systèmes RoFSO, en se concentrant sur le chaos optique, la synchronisation chaotique, les techniques de cryptage de messages basées sur des signaux chaotiques et leur impact sur la robustesse des transmissions.

V.4.1 Chaos optique pulsé et non pulsé

Le chaos optique, élément clé pour sécuriser les transmissions d'informations, se décline en deux catégories principales : le chaos pulsé et le chaos non pulsé. Le chaos pulsé est privilégié pour sa sécurité renforcée, due à ses exposants de Lyapunov élevés, qui augmentent l'instabilité et l'imprévisibilité du système. Ce niveau de chaos complique grandement toute tentative d'interception ou de décryptage, en faisant un choix idéal pour les communications sensibles [25].

Généralement, le chaos pulsé est produit par la modulation directe d'un laser semi-conducteur, décrite par les équations de taux du laser. Ces équations modélisent les variations dynamiques du nombre de porteurs $N(t)$, de l'intensité optique $S(t)$ et de la phase $\phi(t)$, fournissant une compréhension approfondie du comportement chaotique de ces lasers [26,27] :

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{q.V} - \frac{N(t)}{\tau_n} - g_o \cdot (N(t) - N_t) \cdot \frac{1}{1+\varepsilon.S(t)} \cdot S(t) \quad (\text{III-5})$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \Gamma \cdot g_o \cdot (N(t) - N_t) \cdot \frac{1}{1+\varepsilon.S(t)} \cdot S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + \frac{\Gamma.B.N(t)}{\tau_n} \quad (\text{III-6})$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \cdot \left[\Gamma \cdot g_o \cdot (N(t) - N_t) - \frac{1}{\tau_p} \right] \quad (\text{III-7})$$

Où, g_o est la constante de pente du gain et $I(t)$ est le courant interne, et ils sont définis par :

$$g_o = v_g a_o \quad (\text{V-8})$$

$$I(t) = I_{DC} + I_{in} I_{Pk} \quad (\text{V-9})$$

Où N_t , τ_n , τ_p , Γ , B , ε , v_g , a_o et α représentent respectivement la densité de porteurs, la durée de vie des électrons, la durée de vie des photons, le facteur de confinement modal, le facteur d'émission spontanée, le facteur de compression du gain, la vitesse de groupe, le facteur de la couche active et le coefficient d'atténuation. I_{in} est le courant du signal d'entrée, I_{DC} est le paramètre du courant de polarisation, et I_{Pk} est le paramètre du courant de crête de modulation. Si les courants de polarisation et de modulation sont tous deux égaux à zéro, le courant interne est uniquement déterminé par I_{in} [26, 27].

V.4.2 Synchronisation chaotique

Christiaan Huygens, au XVII^{ème} siècle, a été le premier à désigner la synchronisation des oscillateurs périodiques comme un phénomène qui observe que deux mots se rapprochent les uns des autres et s'unissent par un système de couplage vibratoire [28]. Tandis qu'on connaît très bien cette synchronisation dans les systèmes périodiques, il a d'abord été admis que les systèmes chaotiques ne peuvent pas se synchroniser du tout à cause de la très forte dépendance de ces systèmes vis-à-vis des conditions initiales. Pourtant, ces arguments ont été renversés par les travaux de Fujisaka et Yamada [29], suivis par ceux de Pecora et Carroll [30,31], qui ont montré que des systèmes chaotiques, unidirectionnellement couplés, peuvent se synchroniser.

La synchronisation entre deux systèmes peut avoir lieu lorsque deux oscillateurs chaotiques identiques ou similaires sont couplés unidirectionnellement ou bidirectionnellement. La figure (V-11) illustre deux oscillateurs couplés unidirectionnellement par un signal de couplage $s(t)$.

Dans ce contexte, l'un des systèmes agit comme émetteur et l'autre comme récepteur, avec des vecteurs d'états dynamiques respectifs $x_e(t)$ et $x_r(t)$ [32]. Trois formes principales de synchronisation chaotique existent : la synchronisation identique, où les états deviennent identiques après une période transitoire $x_e(t) \approx x_r(t)$, la synchronisation généralisée, où une relation fonctionnelle lie les états $x_e(t) \approx F(x_r(t))$, et la synchronisation de phase, où les oscillateurs partagent la même fréquence avec des phases verrouillées, malgré des amplitudes différentes $\varphi_e(t) = \varphi_r(t)$ [33].

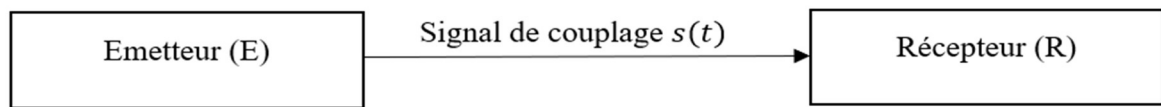


Figure V-11. Deux oscillateurs couplés unidirectionnellement.

V.4.3 Techniques de cryptage par chaos

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. Voici quelques-unes des principales techniques de cryptage par chaos :

V.4.3.1 Masquage chaotique

Le masquage chaotique (Chaotic Masking) est une technique de cryptage qui mélange le signal d'information $m(t)$ avec la sortie chaotique de l'émetteur $x_e(t)$. Selon la méthode de combinaison, on distingue deux variantes : le masquage chaotique additif, où le signal transmis est $s(t) = x_e(t) + m(t)$, et le masquage chaotique multiplicatif, où $s(t) = x_e(t) \times m(t)$. Dans le cas additif, le signal chiffré $s(t)$ est transmis via un canal de communication au récepteur. Le récepteur est constitué d'un système chaotique identique à celui de l'émetteur, ainsi que d'un soustracteur simple. Une fois la synchronisation entre les systèmes chaotiques de l'émetteur et du récepteur établie, le message peut être récupéré en soustrayant le signal chaotique généré par le récepteur du signal reçu, selon la relation $m_r(t) = s(t) - x_r(t)$ [32,33].

V.4.3.2 Cryptage par commutation

Le cryptage par commutation chaotique (Chaotic Shift Keying) est une technique cryptographique qui utilise des systèmes chaotiques pour transmettre des messages binaires. L'émetteur contient deux systèmes chaotiques distincts, associés respectivement aux valeurs binaires "0" et "1". Lorsqu'un "0" doit être transmis, le signal du système chaotique 1 est envoyé, tandis qu'un "1" entraîne la transmission du signal du système chaotique 2. Le récepteur dispose de deux systèmes chaotiques identiques à ceux de l'émetteur. Lorsque le signal reçu correspond à un "0", le système chaotique 1 du récepteur se synchronise avec celui de l'émetteur. De même, pour un "1", c'est le système chaotique 2 qui cherche à se synchroniser. La présence ou l'absence de synchronisation permet alors de reconstituer le message binaire.

Un élément fondamental de cette méthode réside dans la difficulté à distinguer les orbites chaotiques des deux sous-systèmes. Cette complexité renforce la sécurité du système et est principalement utilisée pour transmettre des messages binaires de manière sécurisée [32,33].

V.4.3.3 Modulation chaotique

La modulation chaotique est une méthode de chiffrement dans laquelle le signal portant l'information $m(t)$ affecte directement la dynamique de l'émetteur chaotique. Un contrôleur adaptatif au niveau du récepteur est essentiel pour maintenir la synchronisation avec l'émetteur et s'ajuster aux variations du paramètre modulé. En intégrant le message dans les équations dynamiques du système, cette méthode rend le signal transmis plus imprévisible et complexe. Cela renforce l'efficacité du chiffrement, car l'interaction entre le message et la dynamique chaotique accroît la résistance du système face aux tentatives d'interception ou de décryptage [23,33].

V.5 Sécurisation du système MIMO-RoFSO à 60 GHz par chaos optique

Cette étude présente la conception et la simulation d'un système de communication MIMO-RoFSO opérant à 60 GHz, sécurisé par chaos. Le système combine des signaux optiques chaotiques avec des techniques d'amplification avancées pour garantir une transmission de données sécurisée et performante.

Pour surmonter les défis liés aux turbulences et atténuer les risques de sécurité, des innovations avancées sont mises en œuvre. La bande millimétrique de 60 GHz a été choisie pour sa grande capacité de transmission et sa faible sensibilité aux interférences, garantissant ainsi des communications fiables. Les signaux optiques chaotiques, qui offrent une meilleure résistance aux

interceptions, sont considérés comme un canal sécurisé, contournant les méthodes de cryptage classiques.

L'incorporation d'amplificateurs optiques et la technologie MIMO améliore la portée et la fiabilité du système tout en compensant la dégradation du signal sous des conditions météorologiques extrêmes telles que le brouillard, la pluie et la brume. Les principales contributions de cette étude sont résumées dans la figure (V-12).

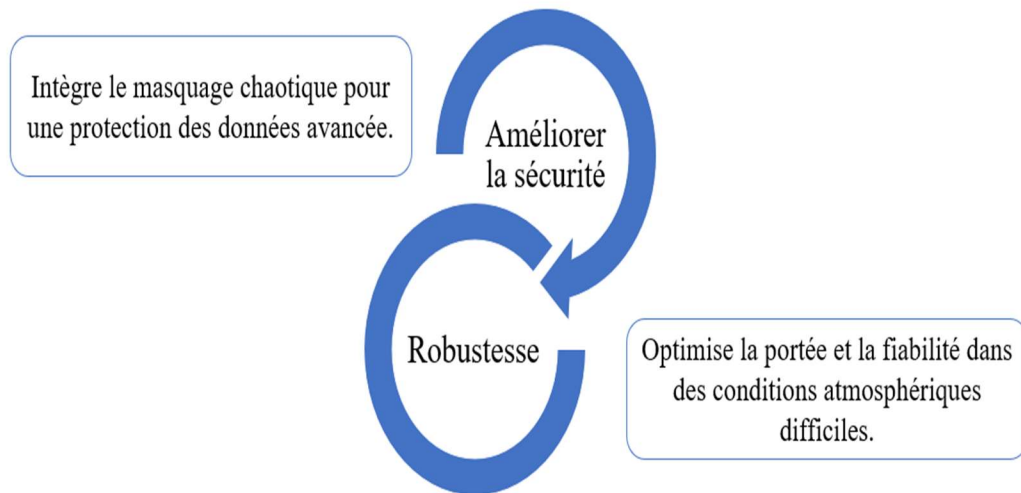


Figure V-12. Résumé des principales contributions clés de l'étude.

V.5.1 Conception et simulation du système MIMO-RoFSO sécurisé à 60 GHz

Le système sécurisé 2x2 MIMO-RoFSO proposé est conçu pour améliorer la sécurité, la fiabilité et la capacité des transmissions de données à haut débit, avec un débit de 10 Gbps dans la bande des 60 GHz. Ce système exploite les techniques optiques chaotiques et la technologie MIMO pour optimiser les performances. Son architecture est composée de trois éléments principaux : l'émetteur, le canal et le récepteur, comme illustré dans la figure (V-13).

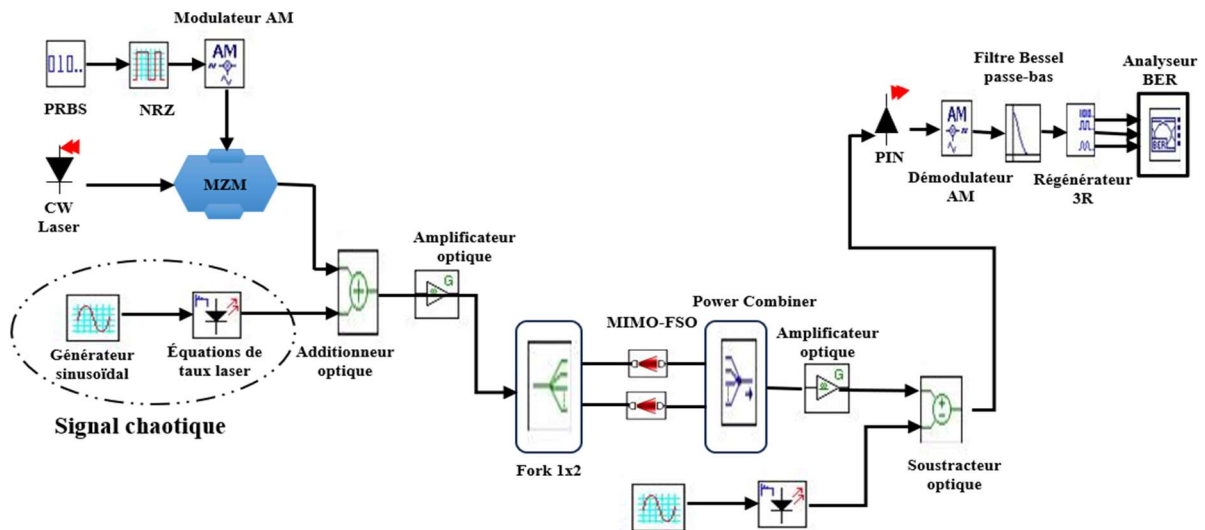


Figure V-13. Représentation schématique du système MIMO-RoFSO proposé.

V.5.2 Résultats et discussions

L'évaluation des performances du système repose sur une analyse approfondie des données reçues en les comparant aux signaux transmis à l'origine. Ce processus inclut la quantification, l'analyse et la comparaison de plusieurs paramètres, afin de déterminer l'efficacité du canal de communication. Des mesures essentielles telles que le facteur de qualité Q , le BER et l'analyse du diagramme de l'œil jouent un rôle clé dans cette évaluation, fournissant une indication claire de la fiabilité et de la performance globale du système. Les principaux paramètres de conception sont détaillés dans les tableaux (V-1) et (V-2).

Paramètre physique	Valeur
Volume de la couche active (V)	$1.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3$
Coefficient de gain de la couche active (a_o)	$2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
Concentration d'électrons à la transparence (N_t)	10^{18} cm^{-3}
Vitesse de groupe (v_g)	$8.5 \times 10^9 \text{ cm/s}$
Facteur de confinement de mode (Γ)	0.4
Durée de vie des électrons (τ_n)	10^{-9} s
Durée de vie des photons (τ_p)	$3 \times 10^{-12} \text{ s}$
Facteur d'émission spontanée (B)	3×10^{-5}
Facteur de compression du gain (ϵ)	$1 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$
Facteur d'élargissement de la largeur de bande (α)	5
Charge électronique (q)	$1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ C}$

Tableau V-2. Paramètres physiques clés du laser à semi-conducteurs [24,27].

Les figures (V-14(a)), (V-14(b)), (V-14(c)) et (V-14(d)) illustrent l'évolution du signal à travers le système : le signal d'entrée, le signal chaotique généré par le sous-système du chaos optique, le signal sécurisé transmis et le signal sécurisé reçu après une distance de 3,9 km, sous des conditions de brume. Comme le montrent les figures (V-14(a)) et (V-14(d)), le message reste fortement crypté et l'extraction d'informations du signal transmis devient pratiquement impossible sans l'application du chaos optique du côté récepteur.

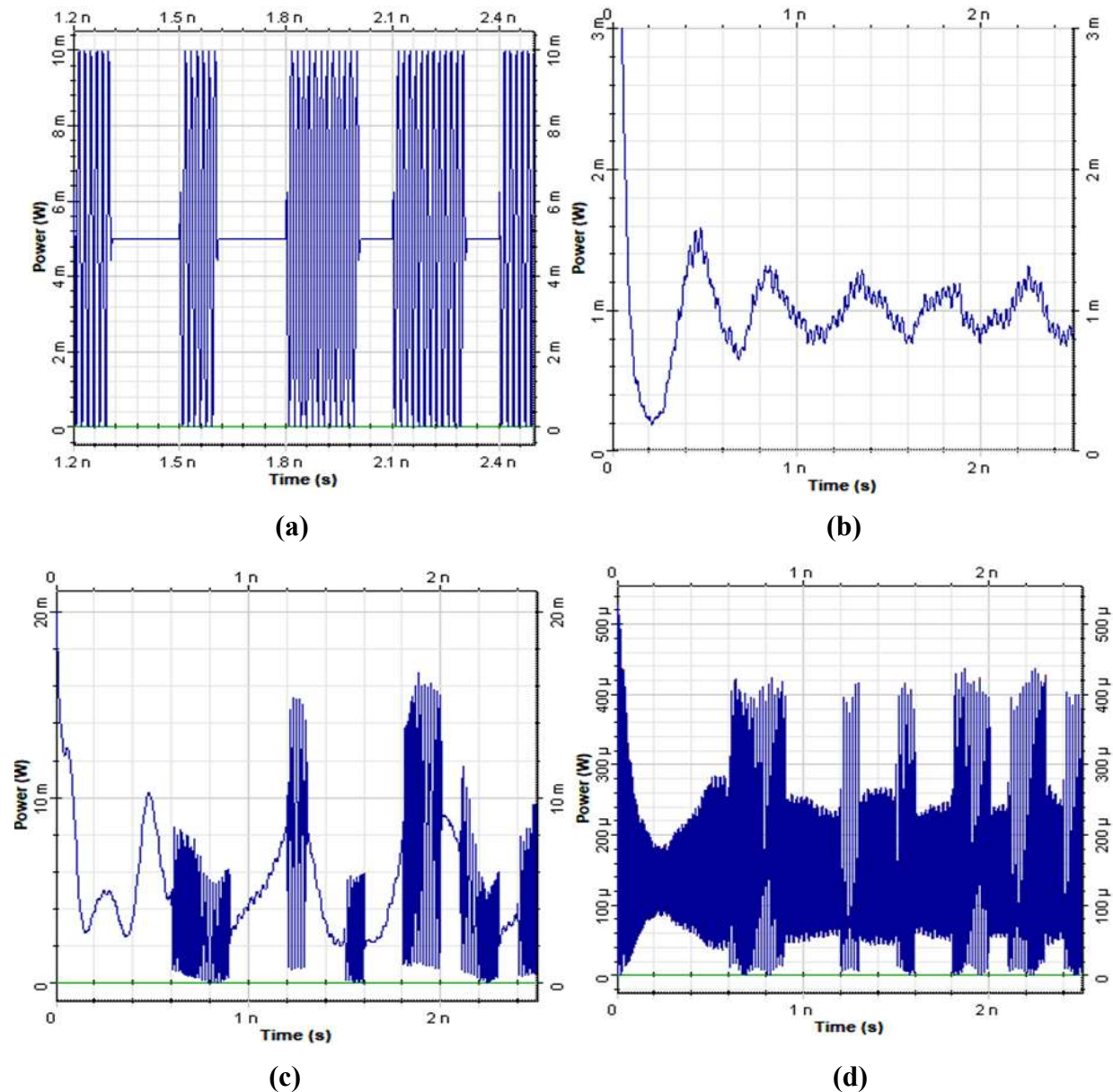


Figure V-14. Forme d'onde du signal dans le domaine temporel avant et après la transmission basée sur le chaos : (a) Signal original du message d'entrée ; (b) Signal chaotique généré ; (c) Signal transmis de manière sécurisée ; (d) Signal reçu de manière sécurisée.

La performance du modèle proposé a été évaluée sous trois scénarios : sans chaos, avec chaos, et avec chaos plus un amplificateur optique avant et après la transmission 2x2 MIMO-FSOs.

Les résultats obtenus pour les conditions de brume dans ces scénarios sont montrés dans la figure (V-15), tandis que la figure (V-16) présente les résultats pour la pluie forte et la figure (V-17) illustre la performance sous un brouillard dense. Dans chaque cas, les graphiques affichent le BER en fonction de la distance de liaison en (a) et le Q en fonction de la distance de liaison en (b).

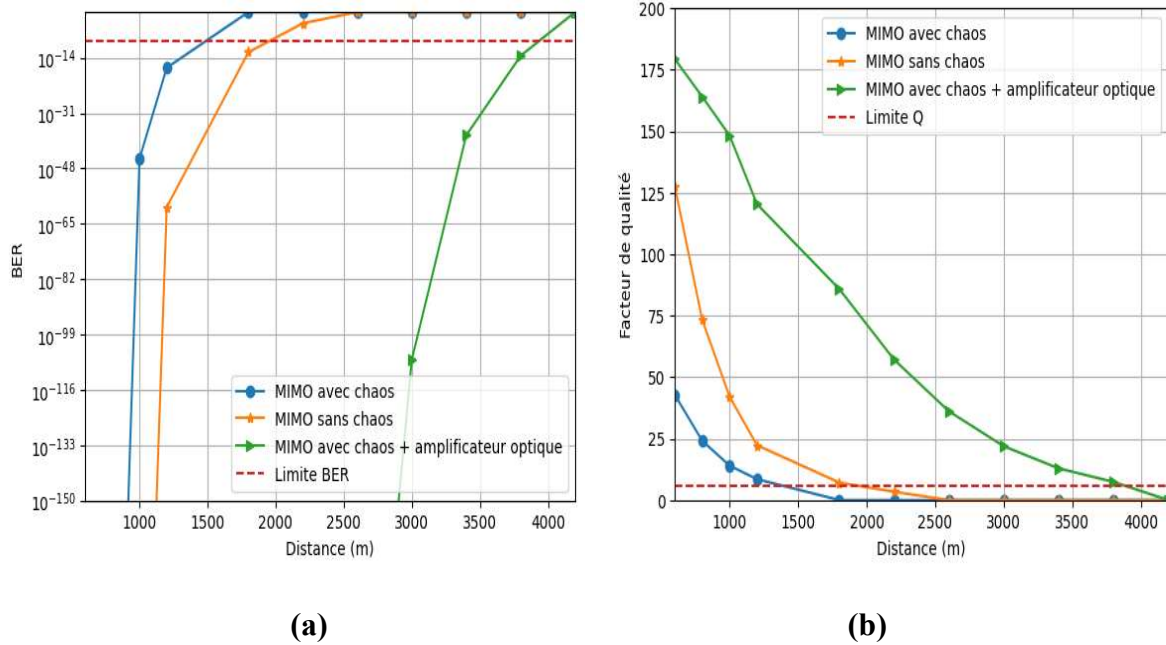


Figure V-15. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la longueur du lien FSO sous des conditions de brume pour trois scénarios : sans chaos, avec chaos et avec chaos + amplificateur optique.

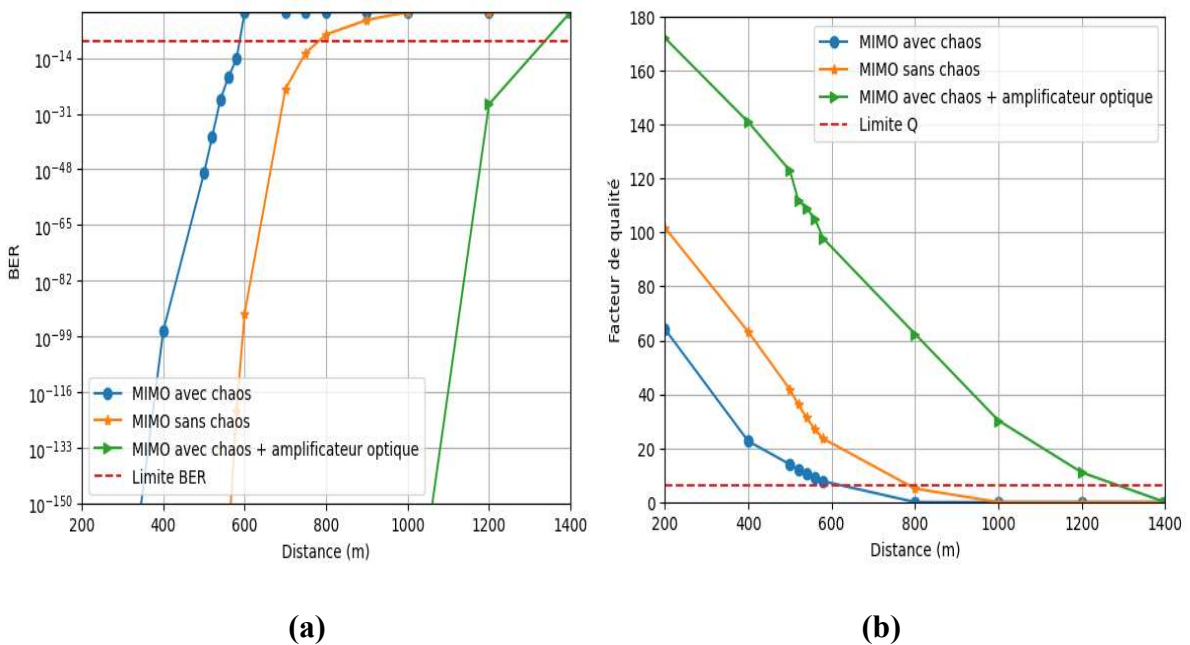


Figure V-16. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la liaison FSO sous des conditions de fortes pluies pour trois scénarios : sans chaos, avec chaos et avec chaos + amplificateur optique.

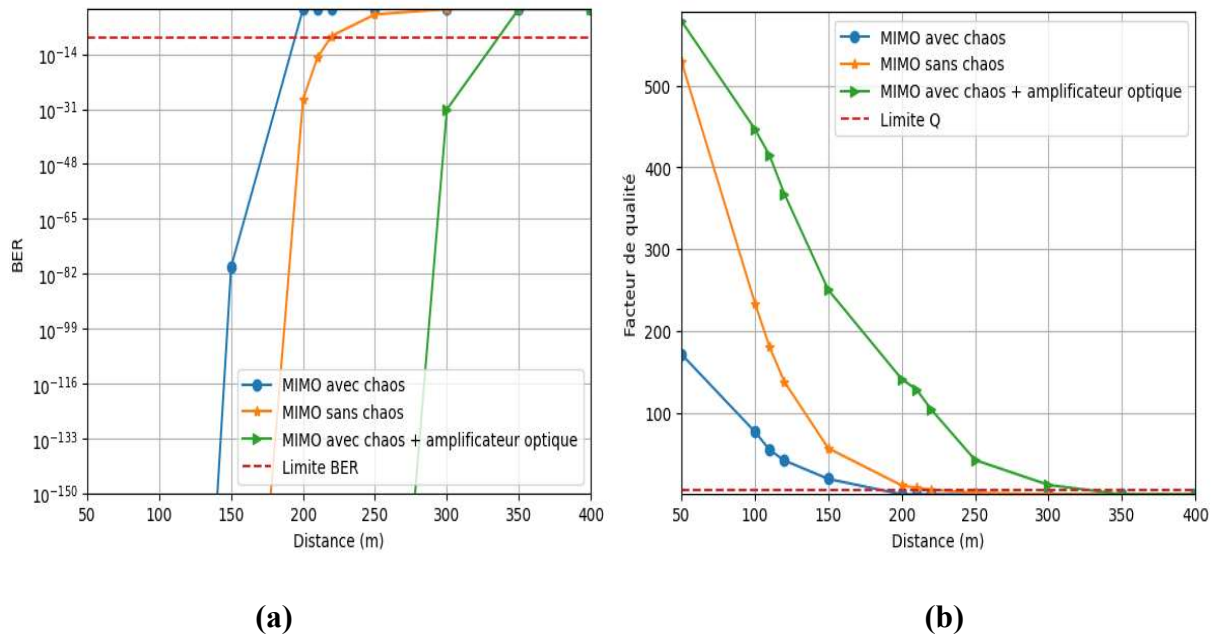


Figure V-17. (a) BER et (b) Facteur de qualité en fonction de la longueur du lien FSO sous des conditions de brouillard dense pour trois scénarios : sans chaos, avec chaos et avec chaos avec amplificateur optique.

D'après les résultats, la distance maximale de liaison possible sans tenir compte du chaos optique est d'environ 1,87 km en brume, 0,77 km en pluie forte et 0,22 km en brouillard dense. Lors de l'application du chaos optique au signal d'entrée, ces distances sont réduites à 1,4 km (brume), 0,59 km (pluie forte) et 0,18 km (brouillard dense), comme montré dans les figures (V-15), (V-16) et (V-17), respectivement. Cela est dû à l'augmentation du bruit global et de la distorsion dans le système, ce qui rend plus difficile pour le récepteur de récupérer le signal original. La présence de chaos optique diminue les performances de 25,14 %, 23,37 % et 18,18 % pour la brume, la pluie forte et le brouillard dense, respectivement, par rapport au système sans chaos.

Pour améliorer la distance de liaison, un amplificateur optique a été introduit, ce qui a permis une amélioration d'environ 45 à 63 % dans toutes les conditions météorologiques lors de l'utilisation de l'amplificateur optique.

La qualité du système de communication est évaluée à l'aide du diagramme de l'œil. Comme illustré dans les figures (V-18), (V-19) et (V-20), le diagramme de l'œil pour le système proposé, basé sur le laser chaotique, est comparé entre les cas avec et sans amplificateur optique, sous différentes conditions météorologiques.

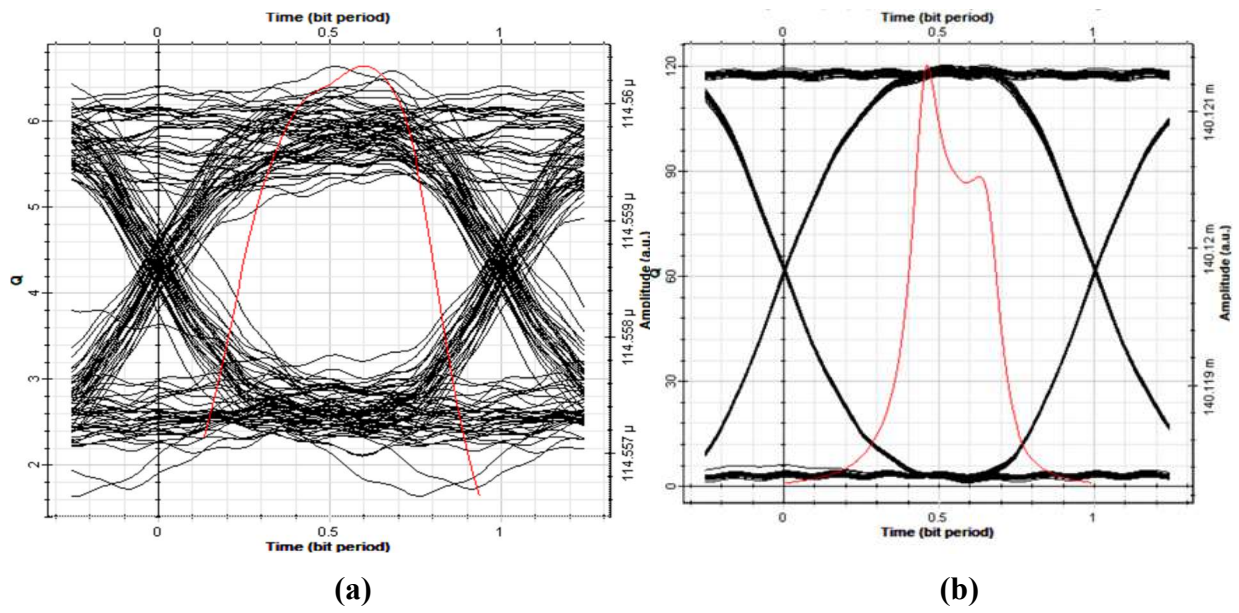


Figure V-18. Diagramme de l'œil pour le système proposé à 1,4 km sous des conditions de brume : (a) Sans amplificateur optique, (b) Avec amplificateur optique.

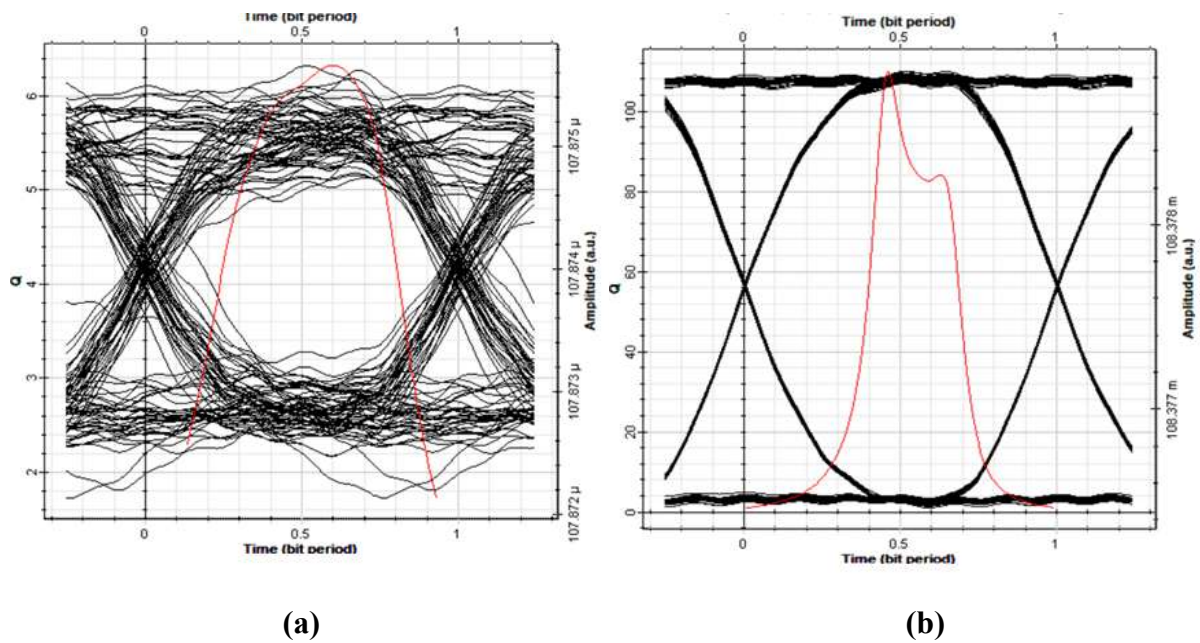


Figure V-19. Diagramme de l'œil pour le système proposé à 0,59 km sous des conditions de fortes pluies : (a) Sans amplificateur optique, (b) Avec amplificateur optique.

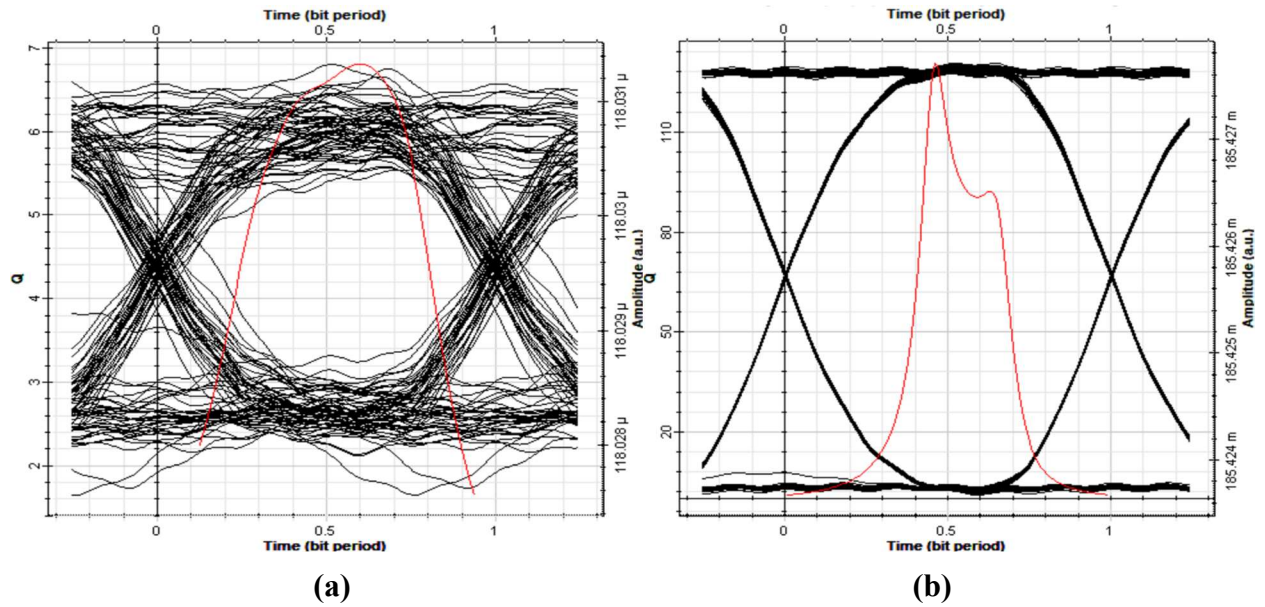


Figure V-20. Diagramme de l'œil pour le système proposé à 0,18 km sous des conditions de brouillard dense : **(a)** Sans amplificateur optique, **(b)** Avec amplificateur optique.

V.5.3 Évaluation des performances et comparaison avec les études récentes

Notre approche propose plusieurs avancées par rapport aux études chaotiques antérieures [9] et [34], comme le montre le tableau (V-3). En ciblant des conditions météorologiques extrêmes telles que le brouillard dense et les fortes pluies, elle démontre une résilience accrue dans des environnements difficiles. L'utilisation du signal MMW à 60 GHz améliore l'efficacité spectrale par rapport à la technologie de 28 GHz de l'étude de 2023, permettant des débits de données plus élevés. De plus, la combinaison du canal 2x2-FSOs avec amplification optique offre un équilibre idéal entre sécurité et performances, faisant de cette conception une solution efficace pour les systèmes de communication modernes à haut débit.

Paramètre	[34]	[9]	Notre travail
Technologie RoFSO	Non	28 GHz	60 GHz
Type de lien	Canal FSO unique	Lien 1 (Canal 4x4-FSOs) Lien 2 (Fibre optique CWDM) Lien 3 (Canal 4x4-FSOs-SMF)	2x2-FSOs avec amplificateurs optiques
Conditions météorologiques	Peu de brouillard, pluie légère, Brouillard modéré, Pluie forte, Brume	Non	Brume, pluie forte, brouillard dense
Distance (Km)	1.3~0.6	3~1	4~0.33

Tableau V-3. Analyse des résultats en comparaison avec les travaux publiés.

V.6 Conclusion

Dans le cinquième chapitre de cette thèse, l'intégration de technologies avancées dans la conception des systèmes RoFSO est mise en évidence, en particulier l'utilisation des signaux MMW 60 GHz et de la technologie MIMO, qui améliorent la fiabilité et les performances des transmissions dans des environnements complexes. L'approche de sécurité fondée sur le chaos optique, exploitant les propriétés de la dynamique non linéaire, constitue une solution innovante pour la protection des données sensibles contre les écoutes clandestines, dépassant ainsi les limites des méthodes de cryptage classiques. Cependant, bien que l'utilisation du chaos optique ait apporté plus de sécurité, elle a entraîné une certaine dégradation de la qualité de transmission. Pour surmonter cette limitation, des amplificateurs optiques qui s'adaptent aux conditions météorologiques difficiles ont été intégrés, améliorant ainsi la robustesse globale du système.

Ce chapitre met ainsi en évidence le potentiel des systèmes RoFSO dans les réseaux sans fil de nouvelle génération, en termes de performances élevées et de sécurité renforcée.

Références bibliographiques du chapitre V

- [1] Derouiche, S., Kameche, S., & Adardour, H. E. (2024, May). Investigation and design of a MIMO ROFSO system using WDM for the purpose of 5G applications. In *2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC)* (pp. 1-4). IEEE
- [2] Dembele, H. (2021). *5G scenarios and evolutions in the new millimeter-wave bands* (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique).
- [3] Chebra, A. F., Borsali, A. R., & Rouissat, M. (2024). Enhancing Fronthaul Network Connectivity by utilizing a RoF-WDM Structure with MM Wave Transmission. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, 22(1).
- [4] Manjushree, K., & Roy, U. M. (2019, December). Simulation studies on the generation of 110 GHz mm-wave for 5G applications. In *2019 Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP)* (pp. 1-3). IEEE.
- [5] Dashti Ardakani, M. (2022). *New implementation of 5G millimeter-wave receivers based on multi-port technology for wireless communications* (Doctoral dissertation, Doctorat en télécommunications).
- [6] MURUGAN, K. S., & VIJITHRA, A. J. (2020). A 40 Gbps Ro-FSO transmission system for 5 G applications. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 14(July-August 2020), 306-309.
- [7] Mohammed, T. J., & Ali, M. A. A. (2024). 40 Gb/s RoFSO communication system under turbulent channel link for 5G applications. *Journal of Optical Communications*, (0).
- [8] Kaur, S., Kaur, J., & Sharma, A. (2023). Predicting the performance of radio over free space optics system using machine learning techniques. *Optik*, 281, 170798.
- [9] Al-Khaffaf, D. A. J. (2023). Integrated photonic secured reliable DWDM for 5G Xhaul at Ka band frequency. *Results in Optics*, 13, 100558.
- [10] Jose, T., Du John, V., & Pandiaraj, S. (2022). Performance analysis of WDM MIMO RoFSO links for 5G applications. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 20(2), 260-267.
- [11] Saleh, M. A., Abass, A. K., & Ali, M. H. (2022). Enhancing performance of WDM-RoFSO communication system utilizing dual channel technique for 5G applications. *Optical and Quantum Electronics*, 54(8), 497
- [12] Kaur, K., & Nain, A. (2023). Range augmentation of 16× 60 GHz WDM RoFSO system in foggy & rainy weather. *Journal of Optical Communications*, (0).

- [13] Kaur, S., & Sharma, A. (2023). Impairment analysis of WDM Ro-FSO system under different weather conditions employing machine learning. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 25(9-10), 444-452.
- [14] Tripathi, A., Gupta, S., & Mandloi, A. (2024). Performance of orthogonal frequency division multiplexing based 60-GHz transmission over turbulent free-space optical link. *Journal of Optical Communications*, 44(s1), s1515-s1520.
- [15] Asha, Dahiya S. (2021) A comprehensive review of Millimeterwave based radio over fiber for 5G front haul transmissions. *Indian Journal of Science and Technology*.14(1): 86-100. <https://doi.org/10.17485/IJST/v14i1.2177>
- [16] Nain, A., Kumar, S., & Singla, S. (2017). Impact of XPM crosstalk on SCM-based RoF systems. *Journal of Optical Communications*, 38(3), 319-324. Available from: <https://dx.doi.org/10.1515/joc-2016-0045>.
- [17] O'reilly, J. J., Lane, P. M., Heidemann, R., & Hofstetter, R. (1992). Optical generation of very narrow linewidth millimetre wave signals. *Electronics Letters*, 28(25), 2309-2311. Available from: <https://dx.doi.org/10.1049/el:19921486>.
- [18] Qi, G., Yao, J., Seregelyi, J., Paquet, S., & B elisle, C. (2005). Optical generation and distribution of continuously tunable millimeter-wave signals using an optical phase modulator. *Journal of Lightwave technology*, 23(9), 2687. Available from: <https://dx.doi.org/10.1109/jlt.2005.854067>.
- [19] Prem, P. A., & Chakrapani, A. (2019). A novel scheme for optical millimeter wave generation using LiNbO₃ mach-zehnder modulator without amplifier. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 89(4), 699-704. Available from: <https://dx.doi.org/10.1007/s40010-018-0532-4>.
- [20] Nain A, Kumar S. Performance Investigation of Different Modulation Schemes in RoF Systems under the Influence of Self Phase Modulation. *Journal of Optical Communications*. 2018;39(3):343–347. Available from: <https://dx.doi.org/10.1515/joc-2016-0155>.
- [21] Jahid, A., Alsharif, M. H., & Hall, T. J. (2022). A contemporary survey on free space optical communication: Potentials, technical challenges, recent advances and research direction. *Journal of network and computer applications*, 200, 103311.
- [22] Chatti, I., Baklouti, F., Chekir, F., & Attia, R. (2019). Comparative analysis of MIMO-based FSO and MIMO-based MGDM communications. *Optical Review*, 26, 631-643.

- [23] Chebra, A. F., Borsali, A. R., & Rouissat, M. (2024). Photonic mmw generation using pm-dpmzm for full duplex 32× 10 gbps rof-wdm system. *Transport and Telecommunication*, 25(1), 66-76.
- [24] 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.
- [25] Ali, S. Z., Islam, M. K., & Zafrullah, M. (2012). Comparative analysis of chaotic properties of optical chaos generators. *Optik*, 123(11), 950-955.
- [26] Niaz, A., Qamar, F., Ali, M., Farhan, R., & Islam, M. K. (2019). Performance analysis of chaotic FSO communication system under different weather conditions. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 30(2), e3486.
- [27] Cartledge, J. C., & Burley, G. S. (1989). The effect of laser chirping on lightwave system performance. *Journal of lightwave technology*, 7(3), 568-573.
- [28] Hugenii, C., Oscilatorium, H., & Muquet, A. F. (1986). Parisiis, 1673, english translation: The pendulum clock.
- [29] Fujisaka, H. and Yamada, T. (1983) Stability Theory of Synchronized Motion in Coupled-Oscillator Systems. *Progress of Theoretical Physics*, 69, 32-47. <https://doi.org/10.1143/PTP.69.32>.
- [30] Pecora, L. M., & Carroll, T. L. (1990). Synchronization in chaotic systems. *Physical review letters*, 64(8), 821.
- [31] Pecora, L. M., Carroll, T. L., Johnson, G. A., Mar, D. J., & Heagy, J. F. (1997). Fundamentals of synchronization in chaotic systems, concepts, and applications. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 7(4), 520-543.
- [32] Locquet, A. (2010). Chaos-Based Secure Optical Communications Using Semiconductor Lasers. In: Stavroulakis, P., Stamp, M. (eds) *Handbook of Information and Communication Security*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-041174_24.
- [33] Bendaoud, M. (2024). *Conception et réalisation des briques de base d'une PLL chaotique pour les systèmes de communication sécurisée par chaos. Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen.*
- [34] Fadil, E. A., Abass, A. K., & Tahhan, S. R. (2022). Secure WDM-free space optical communication system based optical chaotic. *Optical and Quantum Electronics*, 54(8), 477.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux de cette thèse portent sur la conception et l'optimisation des systèmes hybrides combinant les communications FSO et les MMWs, en mettant en évidence leurs performances dans des environnements complexes. Ces systèmes représentent une solution avant-gardiste pour les réseaux de communication modernes, notamment dans des applications exigeantes telles que les réseaux 5G et les communications longue distance. En étudiant diverses architectures, qu'elles soient parallèles ou mixtes (en série), nous avons démontré que l'intégration de ces technologies permet non seulement de pallier leurs limitations respectives, mais également de réaliser des avancées significatives en termes de débit, de fiabilité et de robustesse.

Pour répondre à la problématique principale de ce travail, nous avons étudié et conçu une configuration optimisée en série de ces systèmes, en tenant compte des contraintes environnementales et des exigences de performance. Cette recherche a permis de mieux comprendre comment la combinaison de ces technologies peut surmonter les limites des systèmes de communication traditionnels. Le système FSO a été modélisé en utilisant une turbulence atmosphérique représentée par une distribution Gamma-Gamma, tout en tenant compte des erreurs de pointage, tandis que le lien MMW a été caractérisé par un modèle de fading de Rayleigh. L'association de ces technologies, combinée à MIMO, a permis d'exploiter la diversité spatiale et d'améliorer considérablement les performances globales.

Les résultats obtenus ont mis en évidence une réduction significative du BER, atteignant des valeurs aussi faibles que 2×10^{-14} , grâce à l'utilisation d'une modulation 64-PPM/BPSK-OFDM tout en tenant compte des perturbations atmosphériques. La transmission expérimentale d'images a validé l'efficacité du système dans des environnements perturbés. Par ailleurs, l'intégration de DNN pour la sélection adaptative de modulation dans les systèmes FSO/MIMO-MMW a permis d'ajuster dynamiquement les paramètres du système. Cette approche innovante optimise la fiabilité et la capacité du système face aux perturbations atmosphériques, représentant un progrès significatif dans le domaine des systèmes FSO.

Une nouvelle avancée de ce travail réside dans l'intégration de technologies avancées pour la conception des systèmes RoFSO, exploitant les signaux MMW à 60 GHz et la technologie MIMO. Ces innovations renforcent la fiabilité et les performances des transmissions dans des environnements complexes. Parallèlement, l'approche de sécurisation basée sur le chaos optique, exploitant les propriétés dynamiques non linéaires, offre une méthode novatrice pour protéger les données sensibles contre les interceptions, surpassant les techniques de cryptographie conventionnelles. Cependant, bien que l'utilisation du chaos optique assure une sécurité accrue, elle a entraîné une certaine dégradation de la qualité de transmission. Afin de pallier cette

limitation, des amplificateurs optiques adaptés aux conditions atmosphériques difficiles ont été intégrés, améliorant ainsi la robustesse globale du système.

Les contributions scientifiques apportées dans le cadre de cette thèse sont susceptibles d'être améliorées et développées à l'avenir. Nous présentons ci-dessous quelques-unes des perspectives envisagées :

- Une évolution naturelle consisterait à adapter les solutions hybrides proposées aux exigences des réseaux 6G, notamment en intégrant de nouvelles bandes de fréquence et des techniques avancées de traitement du signal. ;
- Le développement de prototypes physiques permettant de valider les performances dans des conditions réelles constitue une étape essentielle ;
- L'essor des techniques d'apprentissage automatique permet d'envisager une optimisation dynamique et intelligente des paramètres système, ouvrant la voie à une adaptabilité accrue face aux variations environnementales.
- Des recherches futures pourraient également explorer l'amélioration de la sécurité des transmissions grâce à des approches avancées de cryptographie chaotique.

En conclusion, cette thèse constitue une base solide pour l'intégration des technologies FSO et MMW dans des systèmes hybrides, offrant ainsi une solution robuste et performante pour relever les défis des réseaux sans fil actuels et futurs.