



DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Réseaux et Télécommunications

THEME

Analyse des performances d'une liaison FSO (optique en espace libre)

Présenté par le binôme :

- NECIB Marouane
- TOUALBIA Abdessamed

Devant le jury :

- | | | |
|-------------------|-----|------------------|
| - SAIGAA Mohammed | MCB | Président |
| - DJELLAB Hanane | MCA | Encadreur |
| - CHERIET Leyla | MCB | Examineur |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element with several small flowers and leaves is positioned at the top left of the calligraphic text.

Dédicace



A mes chers parents,
A mes frères,
A mes soeurs,
A toute ma famille,
Et à tous mes amis
Je dédie ce modeste travail.

[NECIB Marouane]

Dédicace



A mes chers parents,
A ma femme,
A mon fils Ahmed Cherif,
A mes soeurs,
A toute ma famille,
Je dédie ce modeste travail.

[TOUALBIA Abdessamed]

Remerciements



Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de master.

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre reconnaissance envers notre Encadreur de mémoire, Dr. DJELLAB Hanane, pour sa guidance, ses précieux conseils et son soutien tout au long de ce projet. Votre expertise et votre disponibilité ont été d'une aide inestimable.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, Dr. SAIGAA Mohammed et Dr. CHERIET Leyla, pour avoir accepté de lire et d'évaluer ce mémoire. Vos suggestions et vos commentaires constructifs ont grandement contribué à son amélioration.

Nos remerciements vont également à nos enseignants et nos encadrants, qui ont partagé leurs connaissances et leur expertise tout au long de ce parcours académique.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers nos familles pour leur soutien indéfectible, leur amour et leur encouragement tout au long de nos études. Leur présence et leur soutien ont été essentiels dans la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont accepté de participer à cette recherche en fournissant des informations, des entretiens ou en partageant leur expertise. Leur contribution a été précieuse pour la réalisation de ce travail.

Nous sommes conscients que cette liste de remerciements ne serait pas complète sans mentionner toutes les autres personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ce mémoire. Merci à vous tous pour votre soutien, vos encouragements et votre présence tout au long de cette expérience.

[NECIB Marouane] [TOUALBIA Abdessamed]

Listes abrégées

- 5G** 5ème génération (5G)
- CW** ContinuousWave
- DSS** Dynamic Spectrum Sharing
- EASNS** Enhanced Access to and Support of Network Slice
- EPC** Evolved Packet Core
- eMBB** enhanced Mobile Broadband
- eURLLC** enhanced Ultra Reliable Low Latency Communications
- EVM** error vector magnitude
- FR** Frequency Range
- FSO** Free space optics
- FTTH** Fiber to the Home
- HD** haute définition
- IM** Intensity Modulation
- IMS** IP Multimedia Subsystem
- IoT** Internet of Things
- IAB** Integrated Access and Backhaul
- IMT** l'International Mobile Telecommunications
- IrDA** Infrared Data Association
- LAN** Local Area Network
- LED** Light-Emitting Diodes
- LOA** liaisons optiques atmosphériques
- LTE** Long-Term Evolution

MEA modulateur électro-absorbant

MIMO Multiple-Input Multiple-Output

mMTC massive Machine Type Communications

MOD Modulation

MSD Mobile Subscriber Data

MZ Mach-Zehnder

NFV Network Functions Virtualization

NR New Radio

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OWHN Optical Wireless Home Network

OWSN Optical Wireless Satellite Network

OWTN Optical Wireless Terrestrial Network

PAT Pointing and Tracking

PIN Photodetector with Intrinsic Semiconductor

PRBS Pseudo Random Binary Sequence

PSK Phase Shift Keying

QAM Quadrature Amplitude Modulation

RA réalité augmentée

RF Radio Fréquence

SA Standalone

TSN Time-Sensitive Networking

UIT l'Union Internationale des Télécommunications

VR réalité virtuelle

WOC Wireless Optical Communications

Table des matières

Remerciements	iii
Listes abrégées	iv
Table des figures	x
Liste des tableaux	xi
Introduction générale	1
1 La Liaison Optique En Espace Libre FSO	3
1.1 Introduction	4
1.2 Présentation de la technologie FSO	4
1.2.1 L'émetteur	5
1.2.1.1 La modulation d'intensité (IM: Intensity Modulation)	6
1.2.1.2 La modulation externe	6
1.2.1.3 Les diodes électroluminescentes	7
1.2.1.4 Les diodes Laser	8
1.2.2 Canal de transmission	8
1.2.3 Le Récepteur	9
1.2.3.1 Techniques de photodétection	9
1.3 Classification des réseaux FSO	11
1.3.1 Réseau satellitaire optique sans fil (OWSN)	11
1.3.2 Réseaux sans fil optiques terrestres (OWTN)	11
1.3.3 Réseau domestique optique sans fil (OWHN)	12
1.4 Les conditions atmosphériques sur les liaisons FSO	14
1.4.1 Atténuation par le brouillard	14

1.4.2	Atténuation par la neige	15
1.4.3	Atténuation par la pluie	16
1.4.4	Les effets de scintillations	16
1.5	Les avantages et les inconvénients d'une liaison FSO	17
1.6	Conclusion	18
2	5^{ème} Génération mobile	20
2.1	Introduction	21
2.2	L'évolution de la 5G (releases de la 5G)	21
2.3	Qu'est-ce que la 5G?	22
2.4	Les technologies clés de la 5G	23
2.4.1	Les ondes millimétriques (mmWaves)	23
2.4.2	La formation du faisceaux (Beamforming)	23
2.4.3	le DSS (Dynamic spectrum sharing)	24
2.4.4	MIMO massif	25
2.4.5	Bandes de fréquences de fonctionnement	25
2.5	Déploiement de la 5g	26
2.5.1	Mode autonome de la 5G (5G Standalone (SA))	26
2.5.1.1	New Generation Radio Acces Network (NG-RAN)	27
2.5.1.2	5G Core Network (5GC)	28
2.5.2	Mode non autonome de la 5G (5G Non Standalone (NSA))	29
2.6	Les usages de la 5G	29
2.7	Conclusion	31
3	Étude des performances du liaison FSO	32
3.1	Introduction	33
3.2	Critère d'évaluation	33
3.3	Analyse des performances du système	34
3.3.1	Conception du système	34
3.3.2	Paramètres de simulation	35
3.3.3	Analyse et interprétation	35
3.3.3.1	la Distance	37
3.3.3.2	Puissance de source optique	39

3.3.3.3 Débit	41
3.3.3.4 Conditions météorologiques	42
3.3.4 Conclusion	44
Conclusion générale	45
Résumé	48
Abstract	49

Table des figures

1.1	Schéma bloc du système FSO	5
1.2	Schéma de l'émetteur	5
1.3	Principe de base d'une modulation d'intensité	6
1.4	Principe de base d'une émission à modulation externe utilisant un Mach-Zehnder.	6
1.5	Schéma d'une LED.	8
1.6	Effets environnementaux sur un système FSO.	9
1.7	Schéma d'un récepteur de détection optique directe.	10
1.8	Schéma d'un récepteur de détection optique non directe (Cohérente).	11
1.9	La topologie conceptuelle des réseaux intégrés optiques sans fil satellite, terrestre et domestique.	13
1.10	Cellules d'air avec différents indices de réfraction dans le trajet d'une liaison FSO.	16
2.1	Principe de formation de faisceau	24
2.2	DSS vs. utilisation de bandes dédiées pour NR et LTE[16].	24
2.3	Illustration de MIMO massif	25
2.4	Options 2 et 5 de SA	27
2.5	Architecture générale du système 5G.	28
2.6	Architecture du réseau cœur 5G.	29
2.7	Utilisation de la 5G.	30
3.1	Amplitude du vecteur d'erreur.	33
3.2	Schéma bloc de système simulé.	35
3.3	Constellation dans la partie d'émission.	36
3.4	Spectre de source Optique émise.	37

3.5	Spectre de signal après modulation.	37
3.6	EVM en fonction de la distance.	38
3.7	Constellation entre le début de variation de distance et la fin	38
3.8	Puissance de réception en fonction de la puissance d'émission.	39
3.9	EVM en fonction de la puissance de source optique.	40
3.10	Constellations pour les puissances -15dBm et 10dBm	40
3.11	EVM en fonction de débit.	41
3.12	Constellations pour différents débits	42
3.13	EVM en fonction de la distance pour différentes conditions météorologiques.	43
3.14	Constellations pour différentes conditions climatologiques et différentes dis- tances	44

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les différents types de modulation.	7
1.2	Caractéristiques des réseaux optiques sans fil par satellite, terrestres et domestiques.	13
1.3	Rayons des différents constituants de l'atmosphère	14
2.1	Les différentes releases du 5G.	22
3.1	Paramètres de simulations	35
3.2	Atténuation des différents phénomènes météorologiques	42

Introduction générale

Les communications sans fil ont été largement étudiées pour exploiter leurs avantages par rapport aux communications filaires, tels que la mobilité et la flexibilité. Avec la croissance rapide des technologies sans fil, le nombre et la diversité des appareils mobiles ont augmenté de manière significative. La demande croissante de services de données multimédias a conduit à la nécessité de réseaux offrant une plus grande capacité et une vitesse accrue. Ces évolutions ont incité les chercheurs à proposer des architectures de communication sans fil à large bande pour la prochaine génération.

La communication optique en espace libre (**FSO**), également connue sous le nom de liaisons optiques atmosphériques (**LOA**) ou de communications optiques sans fil (**WOC**), représente une solution innovante pour la transmission de données sur de longues distances sans l'utilisation de câbles ou de fibres optiques. Le **FSO**, ou réseaux sans fil optiques, est un système de télécommunication sans fil qui utilise l'espace libre comme support de transmission pour fournir des signaux de données optiques à des débits élevés. Contrairement aux infrastructures traditionnelles de communication telles que les câbles ou les fibres optiques, le **FSO** permet de transmettre des données sur de longues distances en utilisant l'air ou le vide comme support de transmission. Cette approche présente des avantages significatifs en termes de flexibilité et de rapidité de déploiement, en contournant les contraintes liées à l'installation de câbles ou de fibres optiques.

La cinquième génération (**5G**) des réseaux de télécommunication marque une avancée majeure dans le domaine des communications sans fil. La **5G** va au-delà de l'évolution des technologies de réseau existantes et représente une transformation complète de la façon dont nous nous connectons et interagissons avec le monde numérique qui nous entoure. Conçue pour répondre aux besoins croissants de connectivité de notre société moderne, caractérisée par une demande croissante en matière de données et de services à haut débit,

la **5G** promet des vitesses de transmission des données allant jusqu'à plusieurs gigabits par seconde, offrant ainsi une expérience utilisateur exceptionnelle avec des temps de réponse ultra-rapides. Elle a également la capacité de connecter simultanément un grand nombre d'appareils et d'objets intelligents.

La **5G** ouvre la voie à la création de villes intelligentes, de maisons connectées, de voitures autonomes, d'usines intelligentes et à de nombreuses autres applications innovantes. Cette connectivité étendue offre de nouvelles opportunités commerciales et favorise les avancées dans des domaines tels que la santé, l'agriculture, l'énergie et bien d'autres.

Pour soutenir la révolution de la **5G** dans le domaine des télécommunications, les fournisseurs d'accès Internet et les opérateurs de réseaux mobiles ont besoin d'une nouvelle infrastructure capable de répondre à la demande croissante de connectivité et de débit des utilisateurs. Les liaisons optiques sans fil se présentent comme une solution attrayante, car elles sont économiques, ne nécessitent pas d'infrastructure terrestre, sont faciles à installer et ne sont pas soumises à des réglementations strictes, tout en offrant des débits élevés. Ce mémoire a pour objectif d'étudier les performances d'une liaison **FSO** en utilisant les techniques avancées d'**OFDM**, à l'aide du logiciel Optisystem. L'objectif principal est d'assurer une communication optimale sur de longues distances, tout en examinant l'influence de différentes conditions météorologiques et de la puissance laser sur la fiabilité de la communication optique sans fil.

Le mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente en détail la technologie **FSO**, en décrivant son principe de fonctionnement, sa classification, les effets atmosphériques, ainsi que ses avantages et inconvénients. Le deuxième chapitre se concentre sur la technologie de la **5G**, mettant l'accent sur les principaux concepts, les caractéristiques, l'évolution et le déploiement de cette nouvelle génération de réseau sans fil. Enfin, le troisième chapitre présente les résultats des simulations réalisées, en approfondissant plusieurs aspects techniques clés tels que l'ajustement de la puissance des diodes laser, le débit de transmission, la distance de communication et l'impact des conditions météorologiques sur les performances du système. L'évaluation de la précision et de la qualité de la transmission se fait à l'aide de la métrique de performance **EVM** (Erreur Vectorielle Magnitude).

Chapitre 1

La Liaison Optique En Espace Libre FSO

1.1 Introduction

La Liaison Optiques en Espace Libre (en anglais : **Free Space Optical FSO**), également connues sous le nom de Les Liaisons Optiques Atmosphériques (en anglais : **LOA**), ou de Communications Optiques Sans Fil (en anglais : **WOC**), est une technologie de communication optique qui exploite la propagation de la lumière dans l'espace libre, plus précisément dans le domaine spectral visible et/ou proche infrarouge[1], pour transmettre des données entre deux points distants. Cette approche présente de nombreux avantages lorsqu'il est peu pratique d'utiliser des connexions physiques telles que des câbles ou des fibres optiques, en particulier en raison de contraintes budgétaires.

Ce chapitre présente la technologie **FSO** en décrivant son principe de fonctionnement de base, sa classification ainsi que ses avantages et inconvénients.

1.2 Présentation de la technologie FSO

La liaison optique en espace libre utilise le rayonnement optique comme moyen de transmission pour établir une communication entre deux points, en traversant l'espace. Le canal de propagation optique peut être le milieu spatial lointain, l'atmosphère. Les systèmes **FSO** (Free Space Optical) sont spécialement conçus pour établir des connexions hautement performantes en termes de débit entre différentes zones géographiques, en exploitant une ligne de visée directe (Line Of Sight, **LOS**) sans obstructions comme illustre la figure 1.1.

La technologie **FSO** permet de transmettre des données de divers types à des vitesses similaires à celles des réseaux à fibre optique, tout en bénéficiant de la flexibilité et des avantages inhérents aux réseaux radiofréquences. Elle offre ainsi une alternative précieuse lorsque les câbles ou les infrastructures traditionnelles sont impraticables ou coûteuses, en offrant des débits élevés et une connectivité robuste.

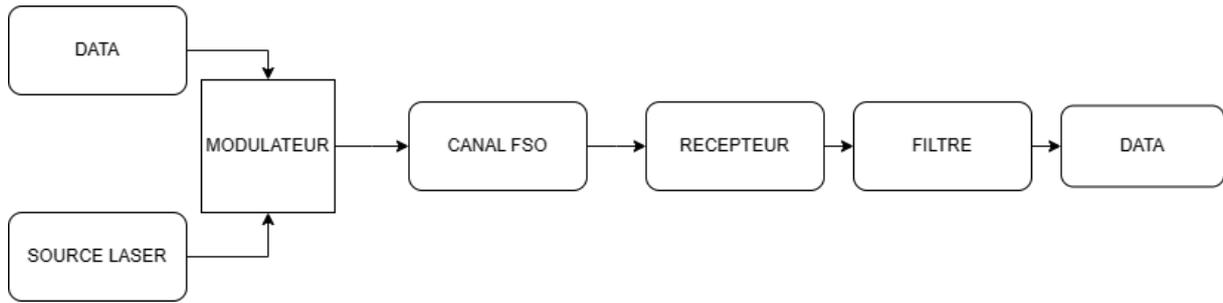


Figure. 1.1 – Schéma bloc du système FSO .

Sur le plan théorique, l'établissement d'une liaison **FSO** requiert impérativement la présence de trois éléments essentiels : un émetteur (source optique), un canal de propagation adapté et un récepteur (photodétecteur).

1.2.1 L'émetteur

L'émetteur effectue la modulation de la source de données sur la porteuse optique en convertissant le signal électrique modulé en un signal optique comme indique la figure 1.2. Ce signal est ensuite transmis à travers l'atmosphère jusqu'au récepteur. Le récepteur détecte l'onde modulée et récupère les données transmises. La plupart des systèmes **FSO** sont conçus pour fonctionner dans les plages de longueurs d'onde de 780 - 850 nm et 1520 - 1600 nm[2].

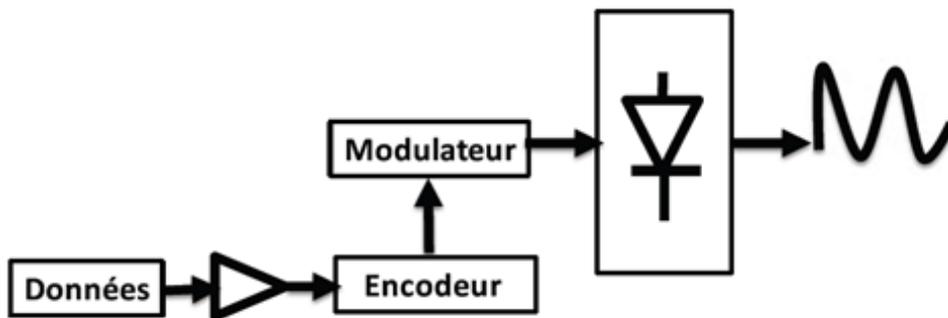


Figure. 1.2 – Schéma de l'émetteur .

1.2.1.1 La modulation d'intensité (IM : Intensity Modulation)

Est une technique de transmission qui consiste à moduler la puissance instantanée du signal porteur pour transmettre les informations comme illustre la figure 1.3. Cela est réalisé en variant directement le courant de la source optique en fonction des données à transmettre. Ainsi, les variations de la puissance lumineuse sont utilisées pour encoder et transmettre les données.



Figure. 1.3 – Principe de base d’une modulation d’intensité .

1.2.1.2 La modulation externe

Dans ce type de modulation illustré dans la figure 1.4, la diode laser n’est plus directement modulée, mais elle reçoit une puissance électrique continue. La modulation de l’intensité optique est ensuite réalisée par un dispositif externe. Parmi ces dispositifs, on peut mentionner l’interféromètre de Mach-Zehnder ou un modulateur électro-absorbant **MEA**. Ces composants sont utilisés pour moduler l’intensité de la lumière émise par la diode laser, permettant ainsi de transmettre les informations sous forme de variations d’intensité optique.[3].

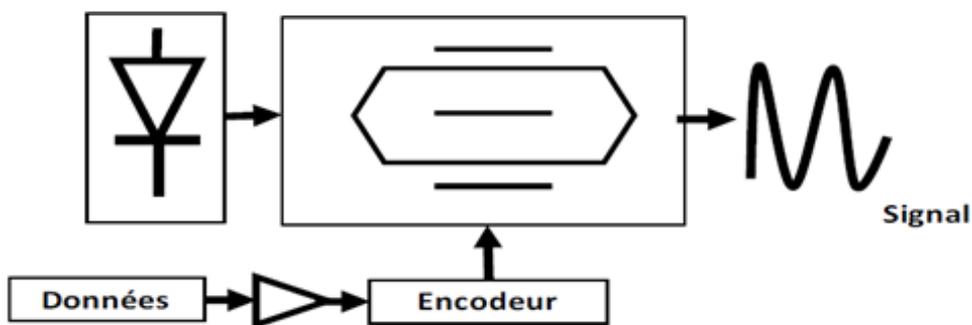


Figure. 1.4 – Principe de base d’une émission à modulation externe utilisant un Mach-Zehnder.

Voici le tableau 1.1 comparatif des différents types de modulation optique :

Tableau. 1.1 – Comparaison entre les différents types de modulation.

Type	Avantages	Inconvénients
Modulation directe	<ul style="list-style-type: none"> – Moins de composants mis en œuvre – Bonne linéarité avec certains composants – Coût plus abordable 	<ul style="list-style-type: none"> – Pertes typiques -35 dB – Facteurs de bruit typiques 50 dB – Grande probabilité de panne
Modulation externe	<ul style="list-style-type: none"> – Bande passante jusqu'à 50 GHz – Liaison avec gain, bien adaptée aux transmissions longue distance – Bon comportement en bruit – Plus longue durée de vie du laser – Moins de dérangement lié au laser 	<ul style="list-style-type: none"> – Coût très élevé – Intégration plus difficile – Maintien de la polarisation entre laser et modulateur – Puissance micro-onde à fournir

1.2.1.3 Les diodes électroluminescentes

également connues sous le nom de Light-Emitting Diodes en anglais, comme montre la figure 1.5 sont des dispositifs optoélectroniques qui convertissent l'énergie électrique en lumière. Elles se distinguent par leur efficacité lumineuse, offrant un rendement élevé en termes de conversion énergétique. Les LED sont largement utilisées dans divers domaines, allant de l'éclairage à l'affichage, en passant par les télécommunications optiques. Leur longue durée de vie, leur résistance aux chocs et leur faible consommation d'énergie en font une solution privilégiée pour de nombreuses applications industrielles et commerciales.

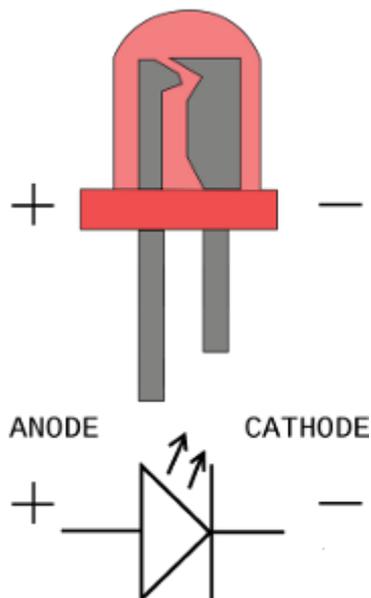


Figure. 1.5 – Schéma d’une LED.

1.2.1.4 Les diodes Laser

Les lasers à semi-conducteurs sont largement utilisés dans les communications optiques en raison de leur petite taille, de leur efficacité énergétique élevée et de leur puissance de sortie. Elles offrent une grande polyvalence avec une large gamme de longueurs d’onde et peuvent être modulés rapidement pour des transmissions à haut débit sur de longues distances. Leur fiabilité, leur faible coût et leur disponibilité sur le marché font des LED la norme de facto dans de nombreuses industries[4].

1.2.2 Canal de transmission

Le canal de transmission désigne l’espace libre entre le transmetteur et le récepteur par lequel la lumière optique se propage. Cependant, ce canal peut être affecté par divers facteurs tels que la pluie, le brouillard et la poussière, pouvant entraîner une atténuation du signal optique. illustré dans la figure 1.6

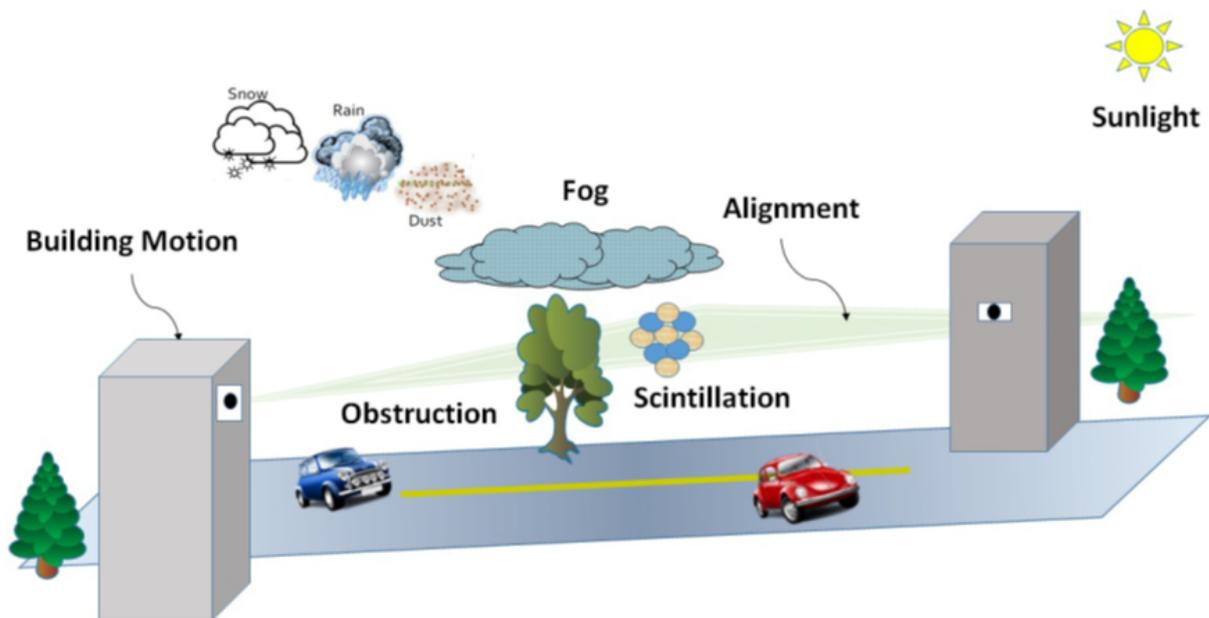


Figure. 1.6 – Effets environnementaux sur un système FSO.

1.2.3 Le Récepteur

Cette partie est responsable de récupérer et d'extraire les données transmises du champ optique incident, C'est le photodétecteur qui assume cette fonction en agissant à la fois comme un compteur de photons et un générateur de courant. Pour répondre aux exigences du système, le photodétecteur doit présenter certaines propriétés essentielles. La première de ces propriétés est la sensibilité à la longueur d'onde utilisée, suivie de la rapidité de réponse, et enfin la capacité à fournir un signal sans bruit parasite. le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser.

1.2.3.1 Techniques de photodétection

1.2.3.1.1 La détection directe

également appelée détection d'enveloppe, est une méthode de détection optique qui ne nécessite pas l'utilisation d'un oscillateur local. Dans ce type de détection, les informations transmises sont directement liées aux variations d'intensité du champ optique, ce qui permet de les récupérer sans la nécessité d'une conversion supplémentaire. L'un des avantages de la détection directe est sa simplicité, car elle élimine l'étape de mé-

lange avec un oscillateur local. Cela réduit la complexité du système et les coûts associés. Cependant, il convient de noter que la détection directe présente certaines limites en termes de sensibilité et de performance, comparée à d'autres techniques de détection. L'utilisation de modulations multi-niveaux est souvent associée à la détection directe, car elle permet d'améliorer l'efficacité spectrale. Les modulations multi-niveaux permettent de transmettre plusieurs bits d'information par symbole, ce qui augmente le débit de transmission sans nécessiter une augmentation proportionnelle de la bande passante. Cela conduit à une meilleure utilisation de la bande passante disponible et à une augmentation de l'efficacité du système.

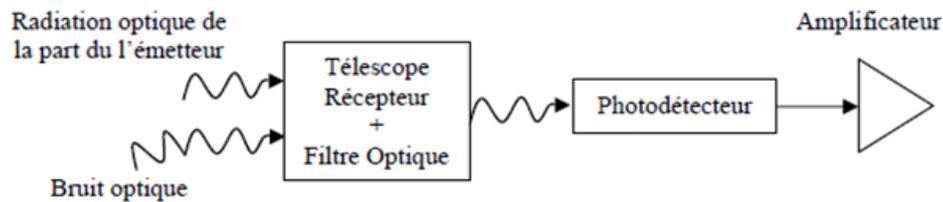


Figure. 1.7 – Schéma d'un récepteur de détection optique directe.

1.2.3.1.2 La détection cohérente

également connue sous le nom de détection hétérodyne, est couramment utilisée dans les domaines du radar et de la radio. Elle implique le mélange d'un rayonnement à détecter avec une onde de référence générée localement. Cependant, dans le domaine de l'optique, cette méthode est moins répandue en raison de la nécessité d'adapter les rayonnements cohérents et de la complexité des montages interférométriques optiques.

Dans la détection cohérente, un oscillateur local est utilisé pour générer un rayonnement optique à une fréquence différente de celle du rayonnement reçu, permettant ainsi un mélange cohérent. Cette technique offre une meilleure sensibilité et précision par rapport à d'autres méthodes de détection, mais sa mise en œuvre en optique est plus complexe en raison des contraintes liées aux petites longueurs d'onde.

Il convient de noter que la détection cohérente est principalement adaptée aux rayonnements optiques cohérents, ce qui limite son utilisation en optronique. Les montages interférométriques optiques nécessaires à cette méthode augmentent la complexité du système[4].

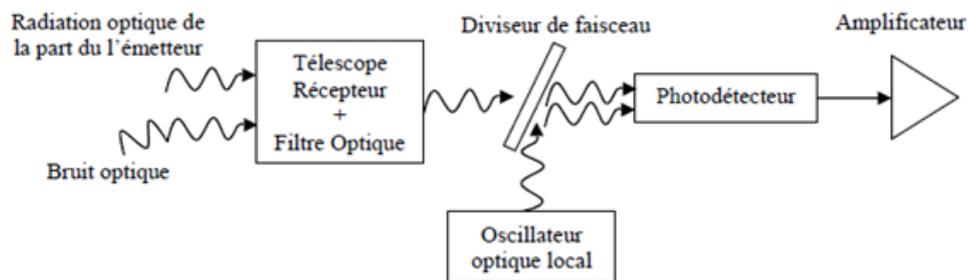


Figure. 1.8 – Schéma d'un récepteur de détection optique non directe (Cohérente).

1.3 Classification des réseaux FSO

En raison de leur fort potentiel d'application à grande échelle, les réseaux de communication optique sans fil **FSO** peuvent être grossièrement divisés en trois catégories principales :

- Réseau satellitaire optique sans fil (**OWSN**),
- Réseaux sans fil optiques terrestres (**OWTN**),
- Réseau domestique optique sans fil (**OWHN**),

Ces réseaux permettent la communication sans fil à l'intérieur des maisons, des bureaux ou des environnements similaires, éliminant ainsi le besoin de câblage physique.

1.3.1 Réseau satellitaire optique sans fil (OWSN)

Ce type de réseau utilise des satellites pour établir des liaisons optiques sans fil entre différentes régions géographiques. Les communications sont effectuées en utilisant des faisceaux optiques dirigés vers des satellites en orbite, qui transmettent ensuite les signaux vers d'autres points sur Terre. Les réseaux satellitaires optiques sans fil offrent une connectivité à large bande passante sur de longues distances, ce qui en fait une solution attractive pour les communications intercontinentales et les zones rurales difficiles à atteindre par d'autres moyens de communication[5].

1.3.2 Réseaux sans fil optiques terrestres (OWTN)

OWTN établit une connexion optique sans fil point à point en visibilité directe entre deux émetteurs-récepteurs via la turbulence atmosphérique externe [6]. En raison de la caractéristique de la ligne de visée, la distance de propagation de la lumière dans l'espace

atmosphérique libre varie de centaines de mètres à des dizaines de kilomètres. Ce modèle de télécommunication a un grand potentiel dans la communication sans fil et devient un important moyen d'accès Internet à large bande. Voici quelques scénarios d'application :

- Les OWTNs peuvent être utilisés pour relier des réseaux existants à haut débit. Par exemple, des liaisons FSO pour les communications de navire à navire, de bâtiment à bâtiment ou de communauté à communauté peuvent être établies sans avoir à creuser et à poser des fibres optiques, tout en permettant la prise en charge facile des terminaux mobiles.
- Les OWTNs sont des solutions efficaces pour le problème du “dernier” ou 1^{er} kilomètre[7]. Même si les câbles à fibres optiques sont largement utilisés, de nombreux utilisateurs finaux n'ont toujours pas leur propre connexion fibre optique pour le service de la fibre optique jusqu'au domicile (FTTH). Les OWTNs peuvent fournir une connexion à haut débit sur de longues distances pour les utilisateurs finaux éloignés.

1.3.3 Réseau domestique optique sans fil (OWHN)

Les OWHNs sont souhaitables pour les communications sans fil à large bande à l'intérieur des maisons et des bureaux. Les OWHNs peuvent être utilisés pour construire un réseau local (LAN) composé de cellules, où chaque cellule représente un espace divisé dans le bâtiment. Les liaisons FSO domestique peuvent être classées en deux types : les liaisons LOS (Line of Sight) et les liaisons non-LOS. Les liaisons LOS nécessitent un chemin direct entre l'émetteur et le récepteur, mais un obstacle inattendu peut facilement rompre la connexion. Dans les liaisons non-LOS, un faisceau lumineux diffusé est utilisé pour profiter des propagations à trajets multiples causées par les réflexions sur les surfaces dans un espace confiné. Les liaisons non-LOS sont plus résistantes aux obstacles, mais elles ont une capacité de données inférieure aux liaisons LOS [8].

La figure 1.9 représente la topologie des réseaux FSO et le tableau 1.2 présentent les différentes caractéristiques des réseaux optiques sans fil:

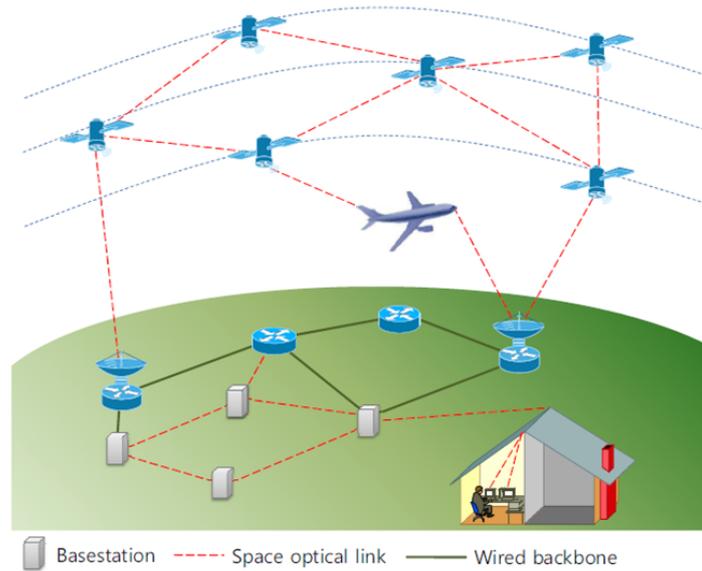


Figure. 1.9 – La topologie conceptuelle des réseaux intégrés optiques sans fil satellite, terrestre et domestique.

Tableau. 1.2 – Caractéristiques des réseaux optiques sans fil par satellite, terrestres et domestiques.

	OWSNs	OWTNs	OWhNs (IrDA)	OWhNs (MSD, White LED)
Emplacement	Orbite	Endroit élevé/ouvert	Intérieur	Intérieur
Distance de liaison	~ 84 000 kilomètres	~ 10 kilomètres	~ quelques mètres	~ dizaines de mètres
Canal	Canal du vide	Canal d'air turbulent	Canal faiblement turbulent	Canal faiblement turbulent
FOV TX/RX	Très étroit	Étroit	Environ 30°	Large
Facteurs d'altération des performances	Beam pointing/tracking errors on long path	Turbulence atmosphérique (brouillard, neige et poussière)	- Limite de puissance pour la sécurité oculaire. - Blocage du chemin	- Limite de puissance pour la sécurité oculaire. - Dispersion multipath
Exigence matérielle	Technologie PAT précise (Ex: cardans/orientation automatique du faisceau)	Amélioration de la fiabilité (Ex: diversité spatiale, hybride RF/FSO)	Composant léger, portable et peu coûteux	Réseau intercellulaire backbone, Diffuseur optique holographique
Divers	Couverture sur de longues distances. Difficulté de maintenance	De nombreux facteurs de dégradation	Liaison point à point très courte portée	Exploitation de la réflexion pour une communication 1-vers-n.

1.4 Les conditions atmosphériques sur les liaisons FSO

La disponibilité et la fiabilité d'une liaison optique sans fil sont influencées par différents facteurs tels que le système utilisé, les conditions climatiques et les paramètres atmosphériques tels que la pluie, la neige, les scintillations et principalement le brouillard, qui représente le plus grand défi dans le déploiement des réseaux optiques sans fil. Ces effets météorologiques, tant en termes d'intensité que de durée, ont un impact critique sur la fiabilité et la disponibilité de la liaison.

1.4.1 Atténuation par le brouillard

Parmi tous les facteurs d'atténuation, le brouillard se révèle être le plus critique, en particulier dans la gamme infrarouge où la vapeur d'eau présente une bande d'absorption significative. Cela s'explique par le fait que les particules constituant le brouillard ont une taille comparable aux longueurs d'onde optiques utilisées dans les systèmes de transmission FSO comme montre le tableau 1.3[9]. L'atténuation spécifique du brouillard donnée

Tableau. 1.3 – Rayons des différents constituants de l'atmosphère

Type	Rayon (m)
Molécules d'air	0,0001
Brouillard	1 à 20
Pluie	100 à 10000
Neige	1000 à 5000
Grêle	5000 à 50000

par un modèle empirique commun pour la diffusion de Mie :

$$\alpha = \frac{3.912}{v} \left(\frac{\lambda \mu m}{0.55 \mu m} \right)^{-q} \quad (1.1)$$

Où:

- v est la visibilité,
- λ est la longueur d'onde,
- q est le paramètre lié à la distribution de la taille des gouttelettes.

Selon le modèle de Kruse:

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{si } v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{si } 6 \text{ km} < v < 50 \text{ km} \\ 0.585v^{1/3} & \text{si } v < 6 \text{ km} \end{cases}$$

Selon le modèle de Kim:

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{si } v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{si } 6 \text{ km} < v < 50 \text{ km} \\ 0.16v + 0.34 & \text{si } 1 \text{ km} < v < 6 \text{ km} \\ v - 0.5 & \text{si } 0.5 \text{ km} < v < 1 \text{ km} \\ 0 & \text{si } v < 0.5 \text{ km} \end{cases}$$

1.4.2 Atténuation par la neige

L'atténuation causée par la neige peut varier en fonction de la taille des flocons de neige et de la vitesse de chute de la neige. Étant donné que les flocons de neige sont de plus grande taille que les gouttes de pluie, ils provoquent des affaiblissements plus importants dans le signal. Les flocons de neige peuvent atteindre jusqu'à 20 mm de taille, ce qui peut entraîner un blocage complet du chemin du signal optique en fonction de la largeur du faisceau. L'atténuation spécifique pour la neige est donnée par l'équation suivante[10]:

$$\alpha = aS^b \tag{1.2}$$

Où:

– S représente le taux de neige en (mm/h).

Pour la neige sèche:

$$a = 5.42 \times 10^{-5} + 5.4958776$$

$$b = 1.38$$

Pour la neige humide:

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

$$b = 0.72$$

1.4.3 Atténuation par la pluie

Les gouttelettes de pluie de grande taille peuvent entraîner une diffusion indépendante de la longueur d'onde, et l'atténuation causée par la pluie augmente de manière linéaire avec le taux de précipitation. L'atténuation par la pluie est exprimée par [10]:

$$\alpha = 1.076R^{0.67} \tag{1.3}$$

Où: R représente le taux de pluie en (mm/h).

1.4.4 Les effets de scintillations

Les déserts peuvent sembler propices au déploiement des systèmes FSO en raison de leur faible atténuation atmosphérique. Cependant, les climats chauds et secs présentent des problèmes de turbulence qui affectent la transmission. Le réchauffement de l'air crée des cellules de différentes tailles et températures, entraînant des variations de l'indice de réfraction. Ces variations provoquent des scintillements dont l'amplitude et la fréquence dépendent de la taille des cellules par rapport au faisceau. Si les hétérogénéités sont importantes, le faisceau est dévié, tandis que s'ils sont petites, le faisceau se dilate [11].

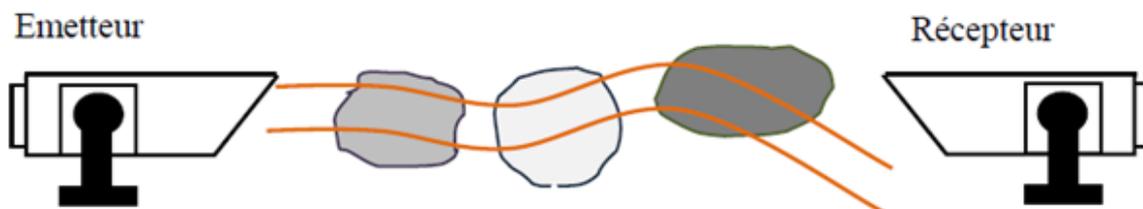


Figure. 1.10 – Cellules d'air avec différents indices de réfraction dans le trajet d'une liaison FSO.

L'atténuation par la scintillation est exprimée par :

$$\alpha = \sqrt{23.17 \times \left(\frac{2\pi}{\lambda} \times 10^9\right)^{\frac{7}{6}} C_n^2 \cdot l^2} \quad (1.4)$$

Où :

- λ représente la longueur d'onde [nm],
- l représente la longueur de la liaison [m],
- C_n^2 représente le paramètre de structure de l'indice de réfraction en [m^{-2/3}].

Les valeurs de C_n^2 sont prises comme suit :

$$C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3} \quad \text{pour forte turbulence,}$$

$$C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3} \quad \text{pour turbulence modérée,}$$

$$C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3} \quad \text{pour faible turbulence.}$$

1.5 Les avantages et les inconvénients d'une liaison FSO

a. Les avantages de FSO Les avantages de la technologie de liaison optique en espace libre (FSO) dans le domaine des télécommunications sont les suivants[12]:

1. Large bande passante : La FSO offre une bande passante supérieure à celle des faisceaux hertziens et des micro-ondes, ce qui permet une transmission rapide des données.
2. Coût avantageux : Comparé à d'autres systèmes de communication optique, la FSO présente un avantage économique en termes de coût d'installation et de maintenance.
3. Flexibilité et déploiement rapide : La FSO permet une installation et un déploiement rapides grâce à sa simplicité et à l'absence de câblage physique.
4. Protocoles transparents : Les protocoles de communication utilisés dans les systèmes FSO sont transparents, ce qui facilite l'intégration avec d'autres infrastructures de réseau.
5. Pas besoin de licence : Contrairement à certaines technologies de communication, la FSO n'exige pas l'obtention d'une licence spécifique, ce qui simplifie sa mise en œuvre.

6. Niveau de sécurité élevé : Les communications FSO offrent un niveau élevé de sécurité, car les signaux optiques sont difficiles à intercepter et à pirater.
7. Immunité aux interférences électromagnétiques : Contrairement aux communications RF, qui peuvent être affectées par les interférences électromagnétiques, la FSO est immunisée contre ces perturbations.
8. Respectueuse de l'environnement : Étant donné que la FSO utilise la lumière visible ou infrarouge pour transmettre des données, elle n'émet pas d'émissions électromagnétiques nocives pour l'environnement.

b. Les inconvénients de FSO Cependant, la FSO présente également certains inconvénients, notamment :

1. Nécessité de visée directe : Pour une communication efficace, il est nécessaire d'avoir une visée directe entre l'émetteur et le récepteur, ce qui peut limiter la flexibilité de déploiement.
2. Dépendance à la distance : Les performances de la FSO peuvent varier en fonction de la distance entre les points de communication, ce qui peut limiter sa portée dans certains cas.
3. Problèmes de propagation : Des problèmes tels que l'atténuation du signal à la réception peuvent survenir en raison de la distance et des obstacles sur la ligne de visée.
4. Dépendance aux conditions climatiques : Les conditions météorologiques telles que le brouillard, la pluie ou la neige peuvent affecter la qualité du signal dans les liaisons FSO.

Malgré ces inconvénients, la technologie FSO continue d'être explorée et développée en raison de ses nombreux avantages et de son potentiel pour des applications spécifiques où les solutions traditionnelles ne sont pas optimales.

1.6 Conclusion

Lorsqu'il s'agit de réaliser des communications à travers l'espace libre, il est essentiel de prendre en compte différentes conditions telles que la présence de particules dans l'air et les diverses conditions météorologiques qui peuvent influencer la propagation optique.

Dans ce chapitre, nous avons obtenu un aperçu global des systèmes de liaison optique en espace libre, de leur fonctionnement, de leur classification, des conditions atmosphériques et de leurs avantages et inconvénients. Nous pouvons conclure que la liaison optique en espace libre représente une solution future prometteuse pour répondre à la demande croissante en matière de communications et aux besoins du marché. Elle ouvre la voie à de nouveaux développements dans le domaine des communications à l'avenir.

Le chapitre suivant se concentrera sur la présentation de la 5^e génération des réseaux mobiles et son application dans le contexte d'une liaison FSO (optique en espace libre).

Chapitre 2

5ème Génération mobile

2.1 Introduction

Le secteur des communications mobiles a connu une évolution majeure au cours des dernières décennies, et la 5G est une révolution technologique qui va transformer cette industrie en offrant une connectivité répondant aux exigences croissantes des utilisateurs. Avec la 5G, chaque objet physique pourra être connecté dans le cadre de l'Internet des objets, ce qui aura un impact significatif sur notre manière d'interagir avec notre environnement. Des voitures autonomes aux robots chirurgicaux en passant par la réalité virtuelle augmentée, les drones et les communications mobiles, tous ces domaines bénéficieront de nouvelles et larges bandes passantes. Cette évolution ouvrira de nouvelles perspectives pour les applications et services qui nécessitent une connectivité rapide et fiable[13].

2.2 L'évolution de la 5G (releases de la 5G)

La 5G est une technologie en constante évolution, avec plusieurs versions de spécifications établies par le 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Chaque version de spécifications est appelée "Release". Jusqu'à présent, la 5G a connu trois releases majeures : la Release 15, la Release 16 et la Release 17, tandis que la recherche se poursuit pour lancer la Release 18 en 2024. Ces releases successives témoignent de l'engagement continu de l'industrie des télécommunications à améliorer et à étendre les fonctionnalités de la 5G. Chaque release de la 5G apporte des améliorations et des fonctionnalités supplémentaires à la technologie, permettant ainsi d'élargir les cas d'utilisation et d'offrir de meilleures performances aux utilisateurs. La recherche et le développement continus visent à garantir que la 5G reste à la pointe de l'innovation technologique et qu'elle réponde aux besoins en constante évolution des communications sans fil. Le tableau 2.1 ci-dessous présente les différentes versions de la 5G ainsi que les caractéristiques spécifiques de chaque version et leur date de sortie.

Tableau. 2.1 – Les différentes releases du 5G.

Release	Date de sortie	Détails
15	Juin 2018	Sortie de NR (New Radio), Prise en charge du service 5G Vehicle-to-X, du sous-système de réseau central multimédia IP (IMS), du futur système de communication mobile ferroviaire.
16	Juillet 2020	Spectre de fréquences supplémentaire, Améliorations MIMO massives, Communication améliorée ultra-fiable et à faible latence (eURLLC), Découpage du réseau, Accès intégré et liaison terrestre (IAB), Caractéristiques d'économie d'énergie, Mise en réseau sensible au temps (TSN), Cellulaire-véhicule-tout (C-V2X)
17	Mars 2022	Dispositifs Reduced Capability (RedCap), Améliorations des Sidelink des new radio (NR), Améliorations des UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Améliorations du RAN 5G, Amélioration de la 5G IIoT
18	Mars 2024	Positionnement à faible consommation et haute précision pour industriel de l'IoT, Système de résilience du timing 5G, Amélioration de l'accès et de la prise en charge des tranches de réseau (EASNS), Avancées sur le RedCap NR de la version 17, Améliorations pour la 5G résidentielle

2.3 Qu'est-ce que la 5G?

La nouvelle génération de communication mobile, la 5G, a été lancée vers la fin de l'année 2010. Contrairement aux générations précédentes qui se concentraient principalement sur l'augmentation du débit, la 5G est une technologie révolutionnaire. Son objectif est de faire face à l'explosion de notre consommation de données. D'ici 2025, il est prévu qu'un utilisateur sur cinq consommera environ 200 Go de données chaque mois. C'est là que la 5G intervient en tant que solution pour éviter la saturation du réseau, notamment dans des zones densément peuplées comme les gares et les aéroports[14].

La 5G, cinquième génération des réseaux de communication mobile, représente une avancée majeure dans le domaine des télécommunications. Elle est conçue pour répondre aux besoins croissants de connectivité et de performances dans notre société de plus

en plus connectée. La 5G promet des débits ultra-rapides atteignant plusieurs gigabits par seconde, une latence extrêmement faible de l'ordre de la milliseconde, une capacité accrue pour prendre en charge un grand nombre d'appareils connectés simultanément, et une fiabilité améliorée. Elle permettra également de prendre en charge de nouvelles applications critiques nécessitant une connectivité ultra-fiable et à faible latence, telles que les voitures autonomes, les systèmes de santé à distance et l'Internet des objets industriel.

La 5G repose sur des technologies avancées telles que la virtualisation du réseau, le découpage de réseau (network slicing) et les antennes intelligentes (beamforming), offrant ainsi des performances exceptionnelles et une expérience utilisateur optimale. Cette technologie révolutionnaire ouvre la voie à de nouvelles possibilités et transforme notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec le monde qui nous entoure.

2.4 Les technologies clés de la 5G

2.4.1 Les ondes millimétriques (mmWaves)

Les ondes millimétriques constituent une nouvelle gamme de fréquences prometteuse pour la technologie 5G. Elles se situent entre 30 et 300 GHz, offrant des vitesses de transfert de données plus élevées, mais avec une portée et une pénétration plus limitées. Pour comprendre le concept d'“onde millimétrique”, il est important de se rappeler que la longueur d'onde est la caractéristique fondamentale des ondes électromagnétiques, déterminant leur fréquence. Les ondes radio peuvent avoir des longueurs d'onde allant de femtomètres à des kilomètres, tandis que les micro-ondes vont de 1 millimètre à 1 mètre. Les ondes millimétriques utilisées dans la 5G ont des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre, ce qui est plus court que les ondes radio traditionnelles mesurées en mètres ou en kilomètres.

2.4.2 La formation du faisceaux (Beamforming)

La formation du faisceaux (beamforming), est une méthode de transmission de signaux à partir d'une station de base vers un récepteur en utilisant un faisceau de forme plus étroite, afin de permettre à l'utilisateur prévu de récupérer les informations tout en rejetant les interférences provenant d'autres directions comme montrent la figure 2.1 .

Cette technique est extrêmement importante dans les systèmes 5G, car elle permet une utilisation plus efficace du spectre radioélectrique, tout en garantissant une qualité de service optimale pour l'utilisateur final.

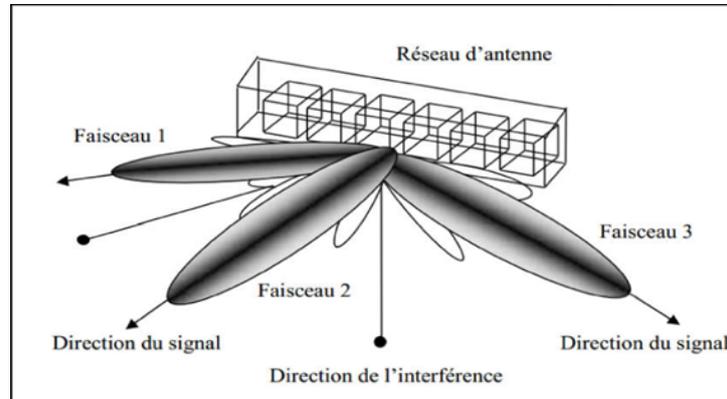


Figure. 2.1 – Principe de formation de faisceau

2.4.3 le DSS (Dynamic spectrum sharing)

Le Dynamic Spectrum Sharing (DSS) est une technologie utilisée dans les réseaux de communication sans fil pour optimiser l'utilisation du spectre radioélectrique. Elle permet à un canal radio de prendre en charge à la fois la 4G LTE et la 5G, et permet au signal 5G de partager le spectre sous-utilisé. En prenant en compte les caractéristiques du trafic des communications actuelles dans les réseaux cellulaires ainsi que le défi de la pénurie de spectre, le DSS offre une solution rentable. Il permet ainsi à la 5G NR (Nouvelle Radio) et à la 4G LTE de coexister, facilitant une transition en douceur des opérateurs de réseau de la LTE à la 5G NR. Grâce au DSS, la 5G peut partager les bandes de fréquences utilisées par la 4G comme nous pouvons voir dans la figure 2.2, ce qui permet aux opérateurs d'étendre rapidement la couverture 5G tout en éliminant le besoin de nouvelles allocations de spectre pour la 5G[15].

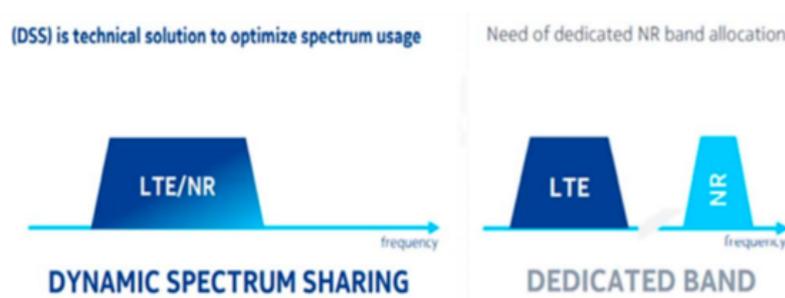


Figure. 2.2 – DSS vs. utilisation de bandes dédiées pour NR et LTE[16].

2.4.4 MIMO massif

Le MIMO massif est une technique consistant à utiliser un grand nombre de micro-antennes, également appelées « antennes intelligentes », sur un seul dispositif. Actuellement, le nombre d'antennes utilisées varie de 8 à 128 comme montre la figure 2.3. Les avantages clés du massive MIMO peuvent être résumés comme suit[17]:

- Augmentation significative de la capacité du réseau et amélioration de l'efficacité énergétique rayonnée ;
- Possibilité de construire le système avec des composants matériels peu coûteux et à faible puissance, notamment des amplificateurs de puissance bon marché, car le signal de sortie par antenne est faible.
- Réduction de la latence sur l'interface aérienne, car les variations à petite échelle disparaissent.
- Simplification de l'accès multiple grâce au durcissement du canal dans le domaine fréquentiel et à l'allocation de la totalité de la bande passante à chaque terminal.
- Amélioration de la robustesse contre les interférences grâce à de nombreux degrés de liberté excédentaires.

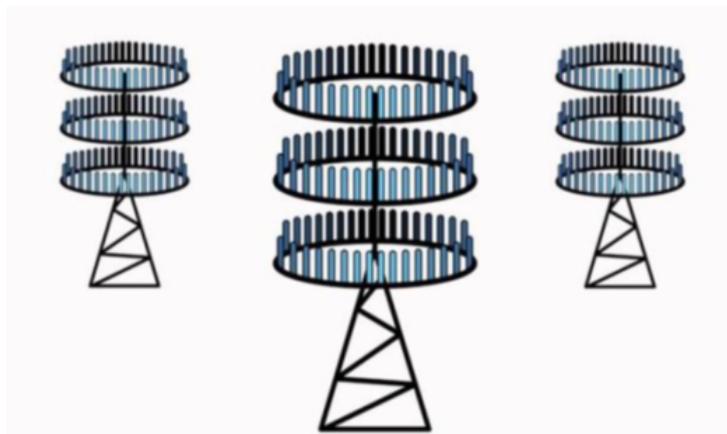


Figure. 2.3 – Illustration de MIMO massif

2.4.5 Bandes de fréquences de fonctionnement

Les technologies 5G utilisent des bandes de fréquences réparties sur différentes parties du spectre. Par exemple, les fréquences mmWave (ondes millimétriques) sont utilisées pour les communications à courte portée dans la 5G, offrant des débits de données plus élevés et

une largeur de bande plus importante. Cela permet de surmonter les pertes de propagation grâce à la fonction d'agrégation de porteuses. Les bandes de fréquences pour la 5G sont classées en deux plages : FR1 et FR2. La plage FR1, qui s'étend de 4,1 GHz à 7,125 GHz, est utilisée pour le trafic principal des communications mobiles cellulaires traditionnelles. La plage FR2, quant à elle, s'étend de 24,25 GHz à 52,6 GHz et est principalement axée sur des capacités à courte portée et haut débit[17].

2.5 Déploiement de la 5g

3GPP a publié les normes 5G dans la version (Release) 15 pour fournir des directives aux réseaux 5G, visant à offrir des débits massifs et une faible latence aux utilisateurs. Le déploiement de la 5G NR se fera en deux phases, avec la première phase gelée en juin 2018 et la deuxième phase gelée en décembre 2019. Il existe cinq options de déploiement pour la 5G, avec des options autonomes (SA) utilisant uniquement la technologie d'accès radio 5G, et des options non autonomes (NSA) combinant les technologies d'accès radio 4G LTE et 5G[20].

2.5.1 Mode autonome de la 5G (5G Standalone (SA))

La 5G autonome (SA) est le modèle de déploiement dans lequel la 5G offre un réseau 5G de bout en bout ; dans cette architecture, nous avons un réseau indépendant comprenant la nouvelle radio 5G (NR) et le réseau central 5G (CN). Les caractéristiques du déploiement SA sont une architecture 5G pure, où l'utilisation de la 5G est basée à la fois sur le plan de commande (Control Plane) et le plan utilisateur (User Plane)[14].

- Option SA 1 : L'option 1 représente une architecture de réseau purement 4G, appelée LTE autonome ou système connecté à l'EPC (Evolved Packet Core).
- Option SA 2 : Dans le scénario de déploiement, la station de base 5G est connectée au réseau central 5G. Cette option est bénéfique lorsque les opérateurs souhaitent mettre en œuvre la 5G NR sans réseau 4G. Cette architecture nécessite la mise en place de nouvelles stations de base et d'un réseau central, ce qui est très coûteux. Dans cette option, nous pouvons déployer tous les types de cas d'utilisation de la 5G tels que eMBB, mMTC et URLLC. (Release-15 juin 2018)

- Option SA 5 : Dans cette option, l'eNodeB (evolved NodeB) sera mis à niveau vers une station de base de nouvelle génération afin de se connecter au réseau central 5G. Ainsi, les nœuds LT continueront de prendre en charge les appareils hérités tout en se connectant au réseau central 5G, ce qui permet aux opérateurs d'éliminer les EPC 4G. Selon une comparaison entre les stations de base 5G et les stations de base 4G améliorées, il existe des différences indéniables en termes de débit maximal, de délai et de capacité. Par conséquent, une station de base 4G améliorée pourrait ne pas être en mesure de prendre en charge les caractéristiques de la 5G (débit maximal, délai et capacité). Par conséquent, les perspectives pour l'architecture de l'option 5 ne sont pas bonnes non plus. (Release-15 juin 2018)
- Option SA 6 : Cette option n'est pas prise en compte par la normalisation de 3GPP, car dans cette architecture, les stations de base 5G seront connectées au réseau central 4G. De plus, cette option considère la station de base 5G plus importante que le réseau central, ce qui est déraisonnable.



Figure. 2.4 – Options 2 et 5 de SA

2.5.1.1 New Generation Radio Acces Network (NG-RAN)

NG-RAN est une collection de stations de base, composées de gNB (gNodeB) et de ng-eNB (next-generation enhanced NodeB), interconnectées par l'interface Xn et connectées au 5GC via l'interface NG comme montrent la figure 2.5 . NG-RAN termine l'interface aérienne Uu vers un équipement utilisateur (UE) et prend donc en charge les couches physiques (PHY) et les piles de protocoles NR. Les ng-eNB et les gNB font tous deux parties de NG-RAN, car ils terminent les interfaces réseau NG-RAN (par exemple, Xn et

NG7), mais ils offrent différents accès à l'interface aérienne - Long-Term Evolution (LTE) et NR, respectivement. Cela diffère de toutes les autres technologies précédemment définies par 3GPP (par exemple, LTE), où un RAN ne prend en charge qu'une seule interface aérienne et l'interopérabilité avec d'autres technologies n'est possible qu'en utilisant des transferts via le réseau central ou des technologies de double connectivité spécifiques (par exemple, l'interopérabilité LTE-Wi-Fi en utilisant l'intégration de niveau radio LTE-WLAN avec un tunnel IPsec [LWIP]). La 5G prend en charge non seulement les transferts vers LTE, mais également une interopérabilité étroite NR-LTE via une double connectivité (E-UTRA-NR Dual Connectivity [EN-DC])[18].

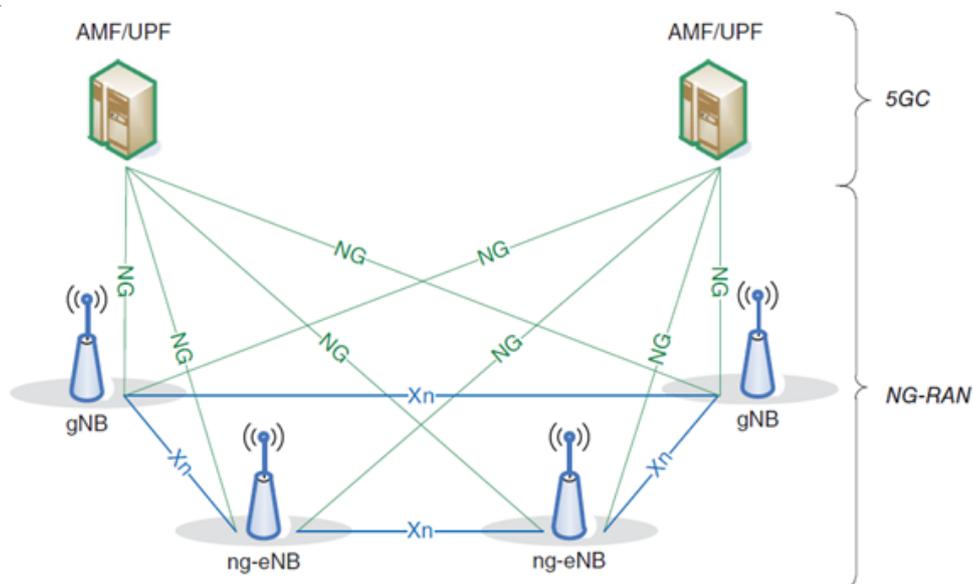


Figure. 2.5 – Architecture générale du système 5G.

2.5.1.2 5G Core Network (5GC)

L'architecture du réseau central 5G standardisée par 3GPP permet de prendre en charge une demande croissante de débit, une latence réduite et une fiabilité accrue, conformément aux exigences des différentes applications et services que la 5G doit prendre en charge. Le nouveau cœur de réseau 5G, tel que défini par 3GPP, utilise une architecture basée sur les services alignée sur le cloud (SBA) qui englobe toutes les fonctions et interactions 5G, y compris l'authentification, la sécurité, la gestion de session et l'agrégation du trafic provenant des appareils finaux. Le cœur de réseau 5G met également l'accent sur la virtualisation des fonctions réseau (NFV) en tant que concept de conception intégré, avec des fonctions logicielles virtualisées pouvant être déployées dans le réseau. La figure

2.6 montre l'architecture du réseau central 5G basée sur des bus. L'architecture du réseau central 5G est spécifiée dans la spécification technique 23.501 de 3GPP.

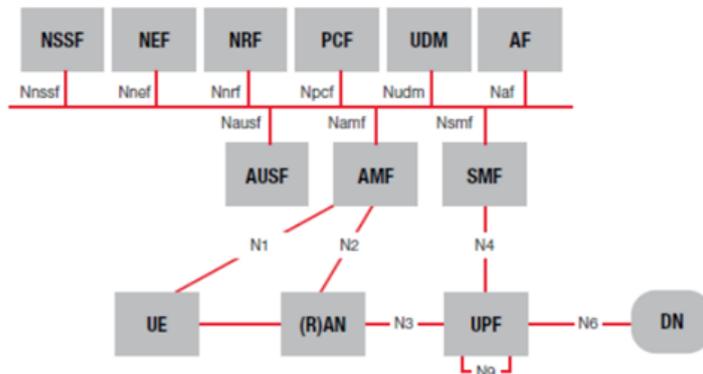


Figure. 2.6 – Architecture du réseau cœur 5G.

2.5.2 Mode non autonome de la 5G (5G Non Standalone (NSA))

La 5G non autonome est une stratégie qui utilise le réseau LTE existant comme base pour déployer rapidement et de manière rentable les services 5G. Elle se fonde sur une double connectivité entre les réseaux LTE et 5G, permettant une couverture hotspot et une utilisation optimale des fréquences disponibles. Dans ce déploiement, le réseau LTE est principalement responsable de la gestion du plan de contrôle, tandis que la 5G se concentre sur le plan utilisateur. Cette approche facilite une transition en douceur vers la 5G en capitalisant sur les investissements existants et en tirant parti des améliorations technologiques de la 5G[19].

2.6 Les usages de la 5G

Dans le contexte de l'International Mobile Telecommunications (IMT)-2020, une initiative de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) visant à définir les fondements de la 5G, trois principaux scénarios d'utilisation sont associés à ces exigences, comme illustré dans la figure 2.8 : les communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC), l'amélioration du haut débit mobile (eMBB) et les communications massives de type machine (mMTC). Ces scénarios représentent les différentes applications et capacités que la 5G vise à offrir, allant des communications critiques avec une fiabilité et une

latence minimales, à l'amélioration de la connectivité haut débit pour les utilisateurs mobiles, ainsi qu'à la prise en charge de la communication massive entre les objets connectés.

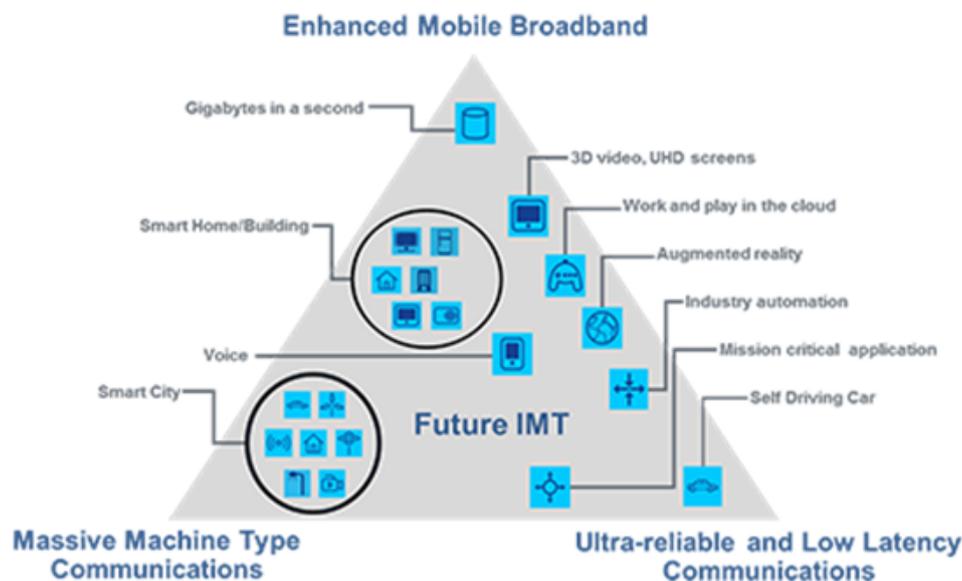


Figure. 2.7 – Utilisation de la 5G.

- L'eMBB (Enhanced Mobile Broadband) est conçu pour répondre à la demande croissante de la population en matière de mode de vie numérique. Il se concentre sur la fourniture de services nécessitant une bande passante élevée, tels que la diffusion de vidéos en haute définition (HD), l'utilisation de la réalité virtuelle (VR) et de la réalité augmentée (RA).
- Le mMTC (Massive Machine Type Communications) vise à répondre aux besoins d'une société numérique avancée. Il se concentre sur les services nécessitant une densité de connexion élevée, tels que les déploiements de villes intelligentes et l'agriculture intelligente.
- L'URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communications) se concentre sur les services qui nécessitent une fiabilité extrême et une très faible latence. Cela inclut des applications critiques telles que les voitures autonomes, la chirurgie médicale à distance et la fabrication industrielle contrôlée à distance. Ces objectifs de performance élevés ont été développés pour garantir une expérience utilisateur améliorée et répondre aux besoins variés des utilisateurs dans l'ère de la 5G.

2.7 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, il est clair que la 5G va bien au-delà d'une simple augmentation de la vitesse dans les réseaux mobiles. Elle est considérée comme une véritable révolution industrielle en raison de ses implications majeures dans divers secteurs tels que le transport, la fabrication et l'agriculture. Nous avons présenté les technologies clés de la 5G, examiné les différentes architectures et exploré les diverses applications de cette nouvelle génération de réseaux. Dans le prochain chapitre, nous mettrons en pratique les connaissances théoriques que nous avons acquises jusqu'à présent en simulant une liaison large bande pour des applications 5G. Nous utiliserons la transmission en espace libre dans le cadre d'un système utilisant le multiplexage orthogonal, afin d'explorer les performances de cette technologie dans des conditions réelles. En réalisant cette simulation, nous pourrions mieux comprendre les avantages et les défis associés à la mise en œuvre de la 5G et évaluer son potentiel pour répondre aux exigences de la communication sans fil à haut débit et à faible latence.

Chapitre 3

Étude des performances du liaison FSO

3.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur la présentation détaillée de notre système de communication optique en espace libre (**FSO**), qui utilise les techniques avancées d'**OFDM** et de **QAM**. Nous avons utilisé l'environnement de simulation **Optisystem** pour réaliser des simulations et évaluer les performances de notre système. Nous avons étudié en profondeur plusieurs aspects techniques clés, tels que l'ajustement de la puissance des diodes laser, le débit de transmission, la distance de communication et l'impact des conditions météorologiques. L'**EVM** a été utilisé comme métrique de performance pour évaluer la précision et la qualité de la transmission.

3.2 Critère d'évaluation

L'**EVM** (**Error Vector Magnitude**) est une mesure de précision de la modulation. Il permet de mesurer et d'évaluer des méthodes de modulation multi-niveaux et multi-phases telles que **M-QAM** et **M-PSK**. L'**EVM** prend en compte toutes les distorsions potentielles de phase et d'amplitude ainsi que le bruit.

L'**EVM** représente la distance euclidienne entre les coordonnées idéales du symbole et le symbole réel enregistré comme montre la figure **3.1**. En général, l'**EVM** est calculé en faisant la moyenne sur un ensemble de trajectoires de symboles et peut être défini numériquement comme suit:

$$\mathbf{EVM} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M |z(k) - R(k)|^2}{\sum_{k=1}^M |R(k)|^2}}$$

Où : $Z(k)$ représente le vecteur mesuré et $R(k)$ représente le vecteur de référence.

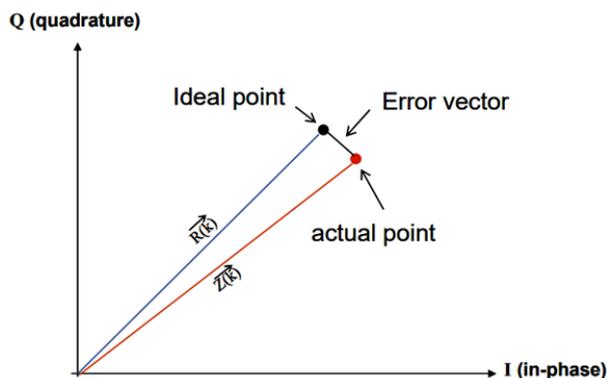


Figure. 3.1 – Amplitude du vecteur d'erreur.

3.3 Analyse des performances du système

3.3.1 Conception du système

Le système est constitué de plusieurs composants interconnectés qui permettent la transmission et la réception des signaux optiques. Tout d'abord, nous utilisons un générateur **PRBS** (**Pseudo Random Binary Sequence**) pour générer un signal **QAM** (**Quadrature Amplitude Modulation**) à 16 niveaux. Ce signal est ensuite transmis à un modulateur **OFDM** (**Orthogonal Frequency Division Multiplexing**) qui convertit les données sérielles en données parallèles en utilisant une technique de multiplexage orthogonale. Pour optimiser la bande passante des sous-porteuses du signal **OFDM** dans le domaine temporel, nous utilisons un filtre **LP Cosine Roll Off**. Ce filtre est appliqué séparément aux composantes en phase (**I**) et en quadrature (**Q**) du signal **OFDM** avec une fréquence radio de l'ordre de 6GHz, afin de réduire la largeur de bande et d'atténuer les interférences entre les sous-porteuses. Ensuite, les données modulées sont acheminées vers un modulateur quadrature qui effectue la modulation finale avant la transmission. Le signal modulé est ensuite utilisé pour moduler un laser **CW** (**Continuous Wave**) à l'aide d'un modulateur **MZ** (**Mach-Zehnder**). Le signal optique modulé est transmis à travers l'espace libre, avec des amplificateurs pour renforcer la puissance du signal **FSO**. À l'extrémité réceptrice, un photodétecteur **PIN** (**Photodetector**) est utilisé pour recevoir le signal optique et le convertir en un signal électrique. Pour extraire les données d'origine, nous utilisons un démodulateur **OFDM** et un démodulateur **QAM**. Ces composants décodent le signal reçu en inversant les étapes de modulation et de multiplexage effectuées à l'émetteur. Enfin, un visualiseur de constellation est utilisé pour analyser et visualiser la sortie du système, permettant d'évaluer la qualité et la précision de la transmission.

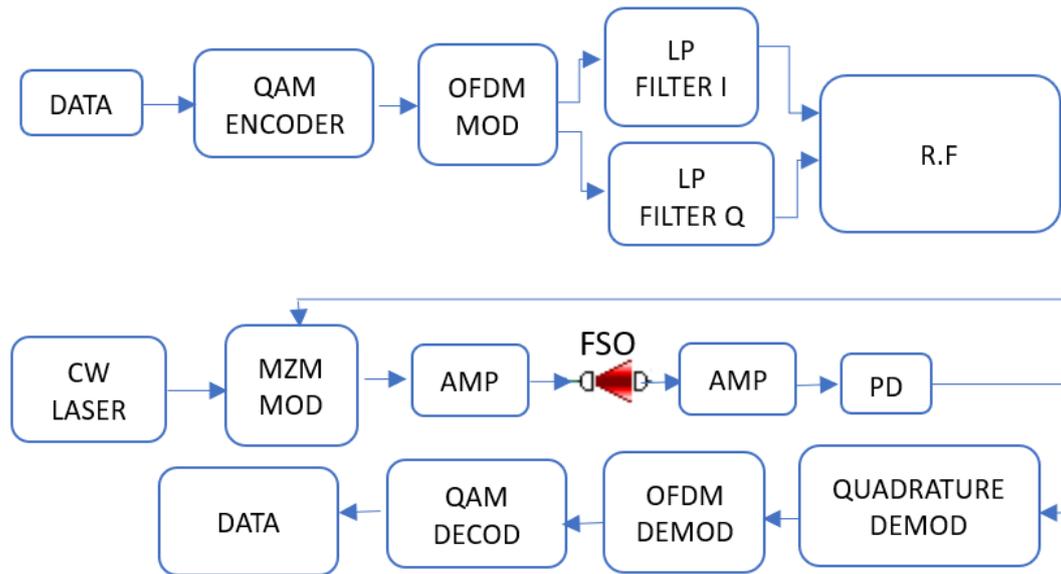


Figure. 3.2 – Schéma bloc de système simulé.

3.3.2 Paramètres de simulation

Pour mener à bien notre analyse des performances, nous avons établi les paramètres fondamentaux suivants, qui seront maintenus constants lors de chaque modification des autres paramètres :

Tableau. 3.1 – Paramètres de simulations

Paramètre	Valeur
Longueur de séquence	262144 Bits
Longueur d'onde	193.1 THz
Nombre de sous-porteuses	1024
Tableau de position	512
Nombre de points FFT	2048
Nombre de points de préfixe	64
Fréquence Radio	6 GHz
Angle de divergence du faisceau	2 mrad
Diamètre de l'ouverture du transmetteur	5 cm
Diamètre de l'ouverture du récepteur	20 cm

3.3.3 Analyse et interprétation

Dans cette section nous examinons les résultats des simulations obtenus pour notre système et nous analysons la qualité du signal et de la constellation en fonction des facteurs suivants :

- **Distance.**
- **Puissance de source optique.**
- **Débit.**
- **Conditions météorologiques.**

Dans la partie d'émission et à l'aide de visualiseur de constellation pour observer la constellation du signal généré (voir figure 3.3), **l'objectif est d'obtenir une constellation idéale, où les points sont bien définis et espacés de manière régulière.** Cette constellation idéale sert de référence pour calculer la métrique d'**Amplitude du Vecteur d'Erreur (EVM)**.

L'analyse de la constellation et le calcul de l'**EVM** sont des outils essentiels pour évaluer la qualité de la transmission dans notre système de communication optique en espace libre. Ils nous permettent de mesurer l'écart entre les positions réelles et idéales des points de la constellation, ce qui nous aide à quantifier la précision et la fidélité du signal transmis. Cela nous permet également de détecter d'éventuelles distorsions ou perturbations qui pourraient affecter les performances du système.

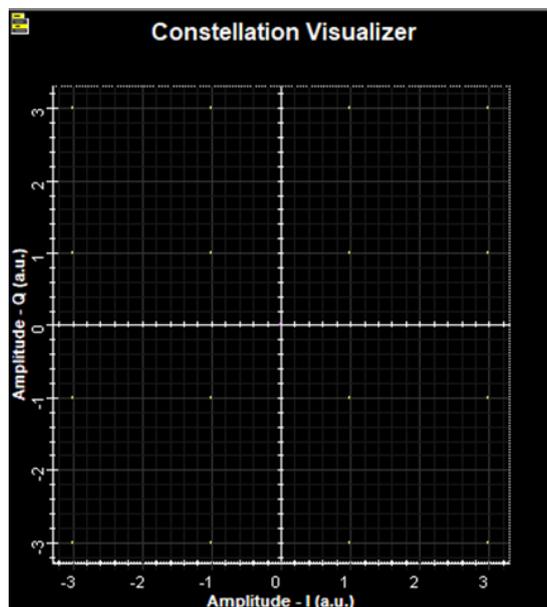


Figure. 3.3 – Constellation dans la partie d'émission.

La source optique **CW laser** émet un faisceau laser d'une puissance de 10dBm et d'une longueur d'onde de 193.1Thz (1552.5 nm) :

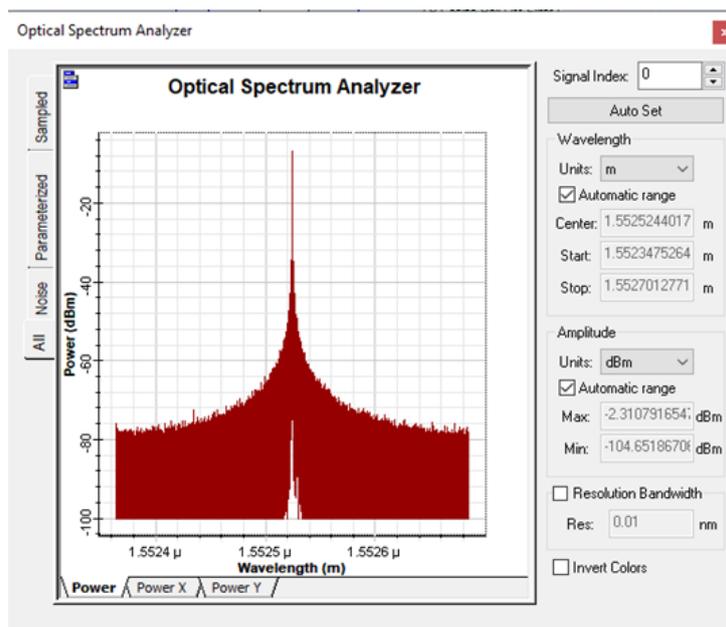


Figure. 3.4 – Spectre de source Optique émise.

Le spectre obtenu après la modulation quadratique est un spectre de fréquence de 6Ghz avec puissance de 0dBm (1mW) :

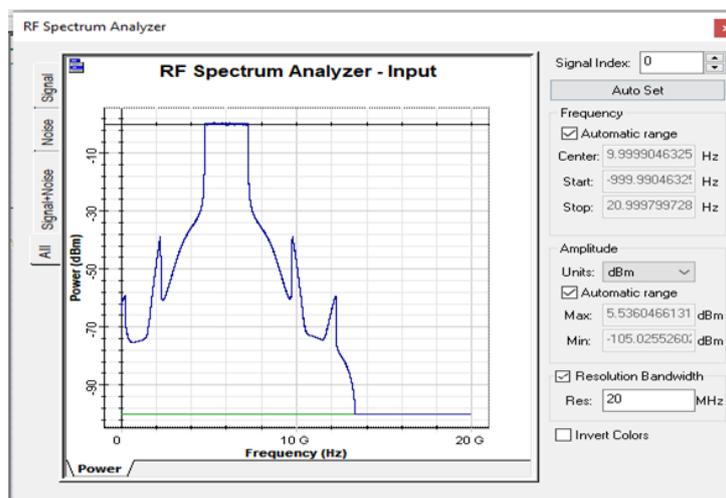


Figure. 3.5 – Spectre de signal après modulation.

3.3.3.1 la Distance

Pour évaluer les performances de notre système en fonction de la distance, nous avons fixé le débit à **10 Gbits** et la puissance de source optique à **10 dBm** avec un climat clair, puis nous avons fait varier la distance dans la plage de **200 m** à **10 km**. Nous utilisons le métrique **EVM** pour évaluer la qualité de transmission et choisir la distance qui offre la meilleure qualité. La figure **3.6** présente les valeurs d'**EVM** correspondantes à chaque

variation de distance dans la liaison FSO.

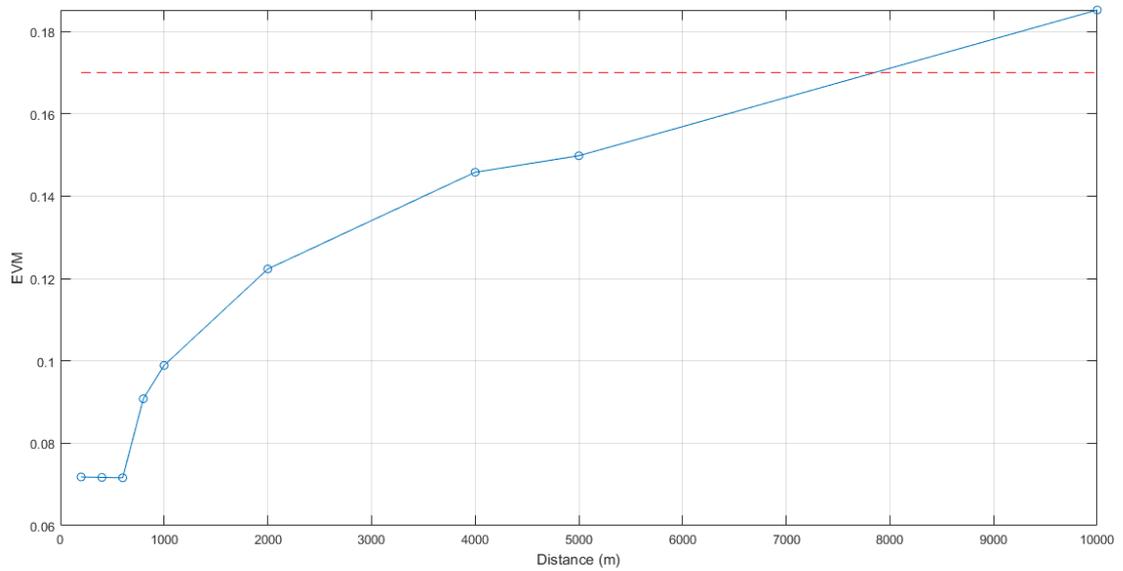
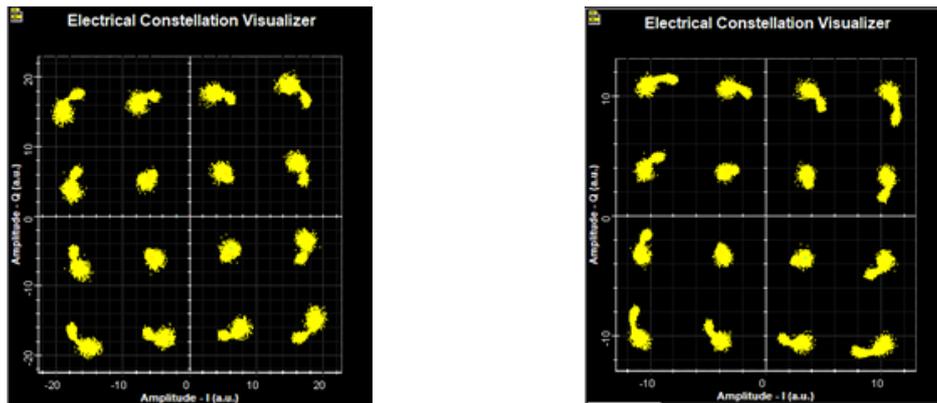


Figure. 3.6 – EVM en fonction de la distance.

Il est observé que l’EVM (Error Vector Magnitude) augmente à mesure que la distance augmente, atteignant une dégradation de la liaison au-delà de 0.17.

la figure 3.7 présente les constellations résultantes pour les distances de 200m et 10000m. nous pouvons observer les effets de la L’augmentation de la distance sur la fidélité du signal transmis et détecter d’éventuelles distorsions



A : constellation pour distance de 200m B : constellation pour distance de 10Km

Figure. 3.7 – Constellation entre le début de variation de distance et la fin

3.3.3.2 Puissance de source optique

La source optique joue un rôle crucial dans notre système car elle est responsable de la conversion des signaux électriques en signaux optiques, qui sont ensuite transmis à travers l'espace libre. Une sélection attentive de la source optique est essentielle pour assurer des performances optimales dans une liaison **FSO**.

Dans cette partie, nous avons étudié l'impact de la variation de la puissance de la source laser sur la qualité de transmission, en mesurant la puissance émise et reçue à l'aide d'un appareil de mesure (**Optical Power Meter**) ainsi que l'**EVM (Error Vector Magnitude)**. Cela a été réalisé en fonction des résultats obtenus lors de l'étude de la distance.

En prenant une distance fixe de 600 mètres, un débit de 10 Gbit/s et une atténuation de 0,2 dB/km, nous faisons varier la puissance de la source optique entre **-15 dBm** et **10 dBm**.

D'après la **figure 3.8**, il est observé que l'augmentation de la puissance d'entrée entraîne une augmentation de la puissance de réception.

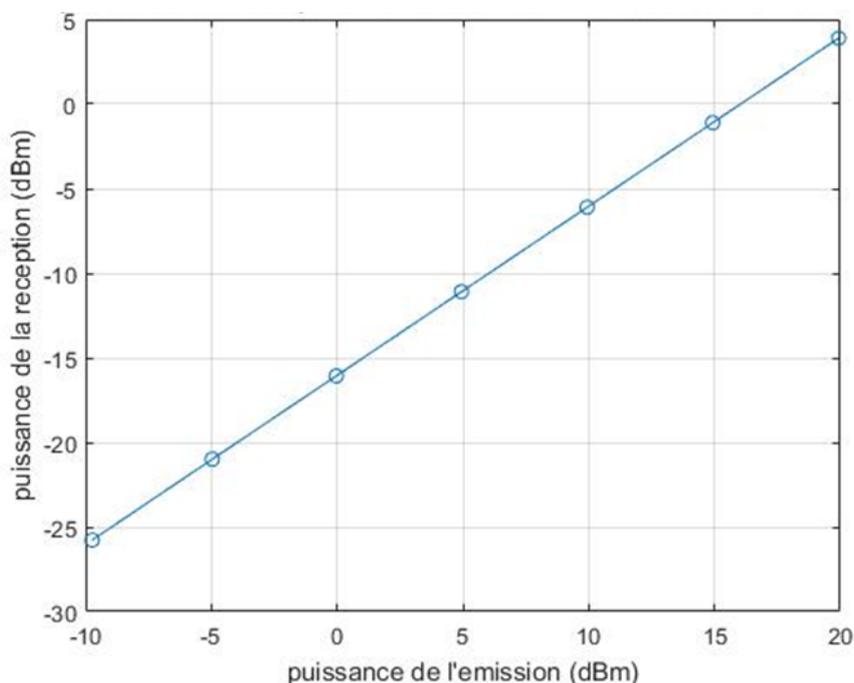


Figure. 3.8 – Puissance de réception en fonction de la puissance d'émission.

D'après la **figure 3.9**, la puissance optimale pour obtenir un **EVM** inférieur à 0.17 se situe entre -15 dBm et 10 dBm.

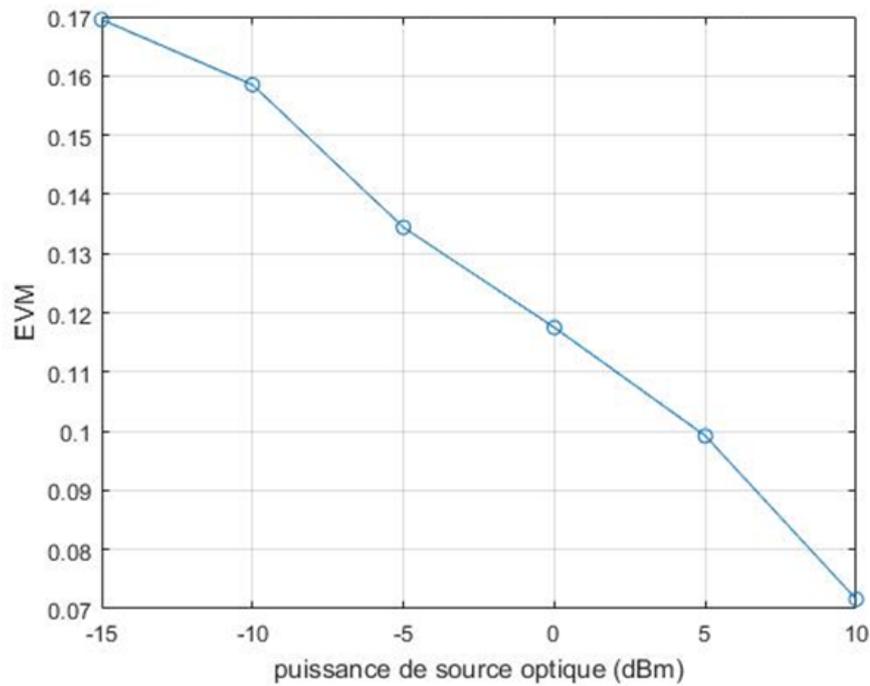
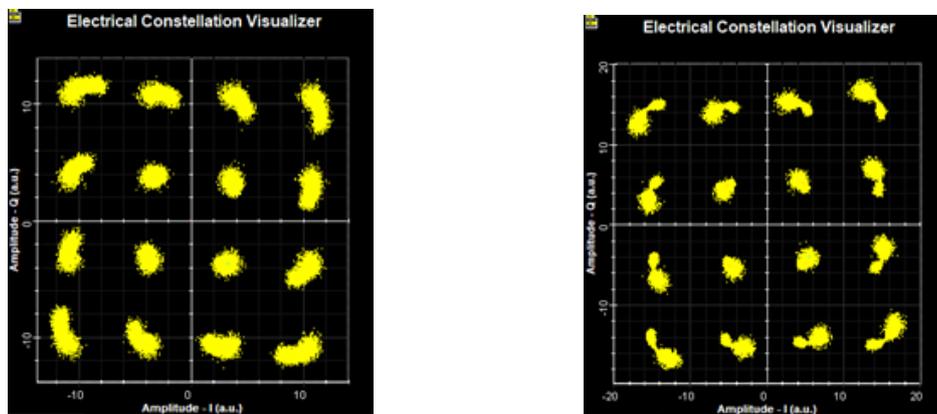


Figure. 3.9 – EVM en fonction de la puissance de source optique.



A: constellation pour puissance -15dBm B: constellation pour puissance 10dBm

Figure. 3.10 – Constellations pour les puissances -15dBm et 10dBm

On constate qu'une puissance plus élevée du laser **CW** permet de réduire les erreurs de transmission et d'optimiser la stabilité du signal. Les valeurs d'**EVM** diminuent de manière significative avec l'augmentation de la puissance.

3.3.3.3 Débit

Dans cette section, nous examinerons l'impact de la modification du débit généré par le **PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence)** sur notre système, en nous basant sur les résultats obtenus précédemment lors de l'analyse en fonction de la distance. Nous fixerons la distance de la liaison à 600 m et ferons varier le débit dans une plage allant de 1 **Gbit/s** à 40 **Gbit/s**. On peut relever avec l'augmentation de débit la qualité de transmission se dégrade comme le montrent les constellations suivantes : **6G**, **10G**, **20G**, **40G**. Selon les résultats de la figure **3.11**, on constate que lorsque le débit dépasse 30 **Gbps**, la qualité de la liaison se détériore, ce qui se traduit par une augmentation de plus de 0.17 de l'**EVM**.

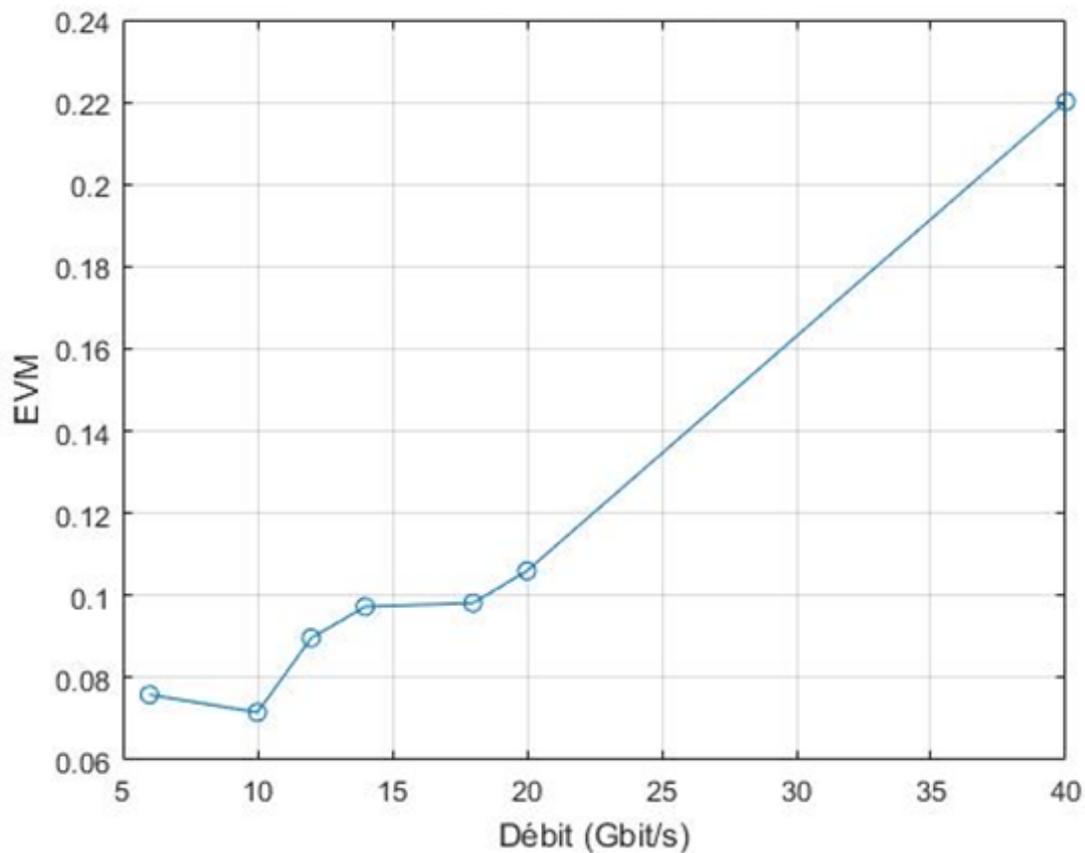
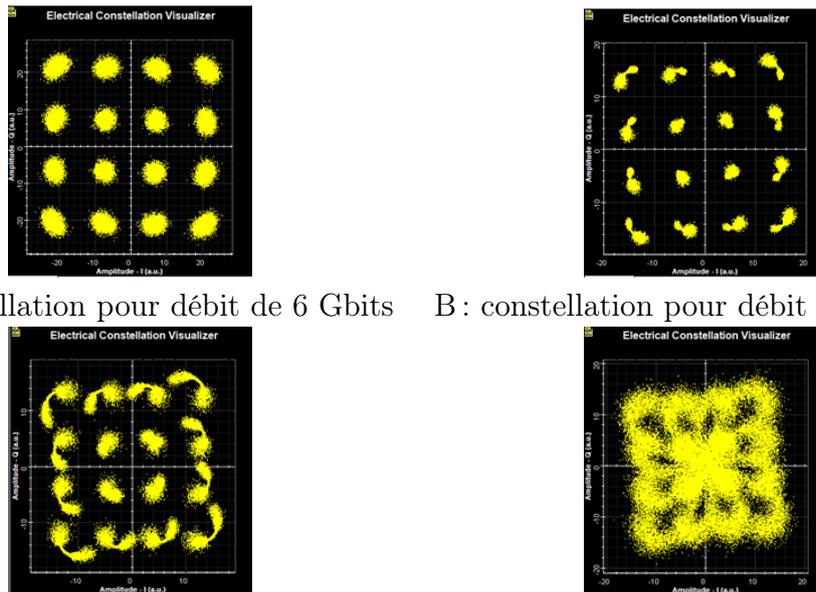


Figure. 3.11 – EVM en fonction de débit.



A : constellation pour débit de 6 Gbits B : constellation pour débit de 10 Gbits

C : constellation pour débit de 20 Gbits D : constellation pour débit de 40 Gbits

Figure. 3.12 – Constellations pour différents débits

3.3.3.4 Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques représentent le premier et le plus grand défi pour les liaisons optiques en espace libre en raison de leur caractère imprévisible et incontrôlable. Elles agissent comme des obstacles sur le chemin du signal optique et ont un impact négatif sur la qualité de la liaison. Les chercheurs considèrent les conditions météorologiques comme le défi principal auquel sont confrontées les liaisons optiques en espace libre.

Le **Tableau 3.2** présente les différentes atténuations associées à différentes conditions météorologiques.

Tableau. 3.2 – Atténuation des différents phénomènes météorologiques

Phénomènes météorologiques	Atténuation (dB/km)
Climat claire	0.2429
Forte pluie	9.2989
Neige sèche	65.0760

Nous avons étudié l'effet des conditions météorologiques sur notre système de communication optique en utilisant le métrique EVM. En fixant un débit de **10 Gbits**, nous avons évalué la valeur d'**EVM** pour différents phénomènes météorologiques et distances de la liaison. Les résultats, présentés dans la **figure 3.13**, nous permettent de comprendre l'impact des conditions météorologiques sur la qualité de la transmission optique en espace

libre. Cette analyse nous aide à évaluer la fiabilité de notre système dans des conditions réelles et à prendre en compte les défis liés aux phénomènes météorologiques.

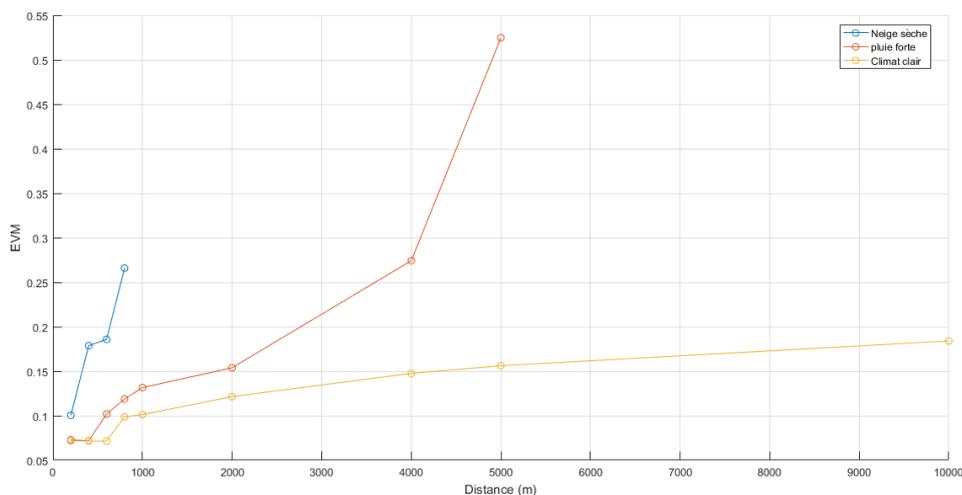
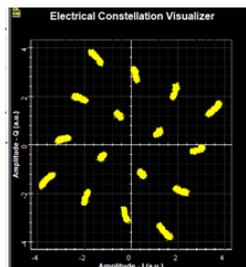


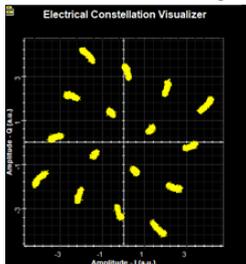
Figure. 3.13 – EVM en fonction de la distance pour différentes conditions météorologiques.

- D’après la **figure 3.13**, pour maintenir un **EVM** inférieur à 0,17 et une qualité de transmission sans distorsion dans différentes conditions météorologiques, les résultats sont les suivants :
 1. Dans des **conditions climatiques claires**, la liaison peut atteindre une distance allant jusqu’à 9 km tout en maintenant un **EVM** inférieur à 0,17.
 2. Pour des conditions météorologiques avec une **forte pluie**, la distance maximale de la liaison est limitée à 2,5 km afin de garantir une qualité de transmission adéquate sans distorsion.
 3. En ce qui concerne les conditions de **neige sèche**, la portée de la liaison est encore plus limitée, ne dépassant pas 600 mètres.

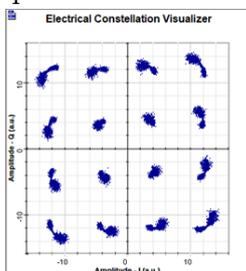
Ces résultats soulignent l’importance de prendre en compte les conditions météorologiques lors de la planification et du déploiement des liaisons sans fil afin de garantir une qualité de transmission optimale.



A : constellation pour climat neige sèche pour 800m



B : constellation pour climat forte pluie pour 4Km



C : constellation pour distance 600m pour climat clair

Figure. 3.14 – Constellations pour différentes conditions climatologiques et différentes distances

3.3.4 Conclusion

Nos résultats d'étude reposent sur l'utilisation d'une modulation **OFDM** avec une liaison optique en espace libre, utilisant une large bande de **6 GHz**, adaptée aux applications des nouvelles générations de réseaux mobiles, et une puissance laser de **10 dBm**. Dans des conditions météorologiques claires, nous avons obtenu un débit d'environ **10 Gbits** sur une distance de **9 km**, avec un faible **EVM** inférieur à **0.17**. Cependant, lors de conditions météorologiques défavorables telles qu'une **forte pluie** ou de la **neige sèche**, nous avons observé une diminution significative de la distance de transmission. En cas de forte pluie, la distance de transmission était limitée à **2,5 km**, voire moins pour la neige sèche. Ces résultats soulignent l'importance des conditions météorologiques dans les performances des communications optiques en espace libre.

Conclusion générale

En conclusion, notre étude s'est focalisée sur l'analyse et la performance d'un système de communication optique en espace libre utilisant la technologie **FSO** avec les techniques avancées d'**OFDM**. Nous avons approfondi différents aspects clés liés à cette technologie.

Dans le premier chapitre, nous avons examiné en détail les systèmes de liaison optique en espace libre, comprenant leur fonctionnement, leur classification, les effets atmosphériques, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons conclu que la liaison optique en espace libre représente une solution prometteuse pour répondre aux besoins croissants en communications et aux exigences du marché.

Le deuxième chapitre s'est concentré sur la **5e** génération (**5G**) des réseaux mobiles et son application dans le contexte d'une liaison **FSO**. Nous avons exploré les technologies clés de la **5G**, examiné les architectures possibles, et étudié les nombreuses applications de cette nouvelle génération de réseaux.

Dans le troisième chapitre, nous avons réalisé une simulation pour évaluer les performances de notre système de communication optique en espace libre. En utilisant une modulation **OFDM** et une puissance laser de **10 dBm** pour avoir une liaison large bande de **6 GHz**, et une capacité élevée de **10 Gbits** sur une distance de **9 km**, avec un faible **EVM** (Erreur du Vecteur de Magnitude) inférieur à **0.17** dans des conditions météorologiques claires. Cependant, nous avons également constaté que les conditions météorologiques défavorables, telles qu'une forte pluie ou de la neige sèche, peuvent entraîner une diminution significative de la distance de transmission.

En fin de compte, notre étude contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine des communications optiques en espace libre et fournit des informations précieuses pour la mise en œuvre de solutions efficaces dans le contexte des réseaux mobiles de nouvelle génération **5G**. Elle ouvre également la voie à de futures recherches et développements visant à améliorer les performances et la fiabilité des systèmes de communication optique en espace libre pour les nouvelles générations de communication mobile.

Bibliographie

1. M. Al Naboulsi, « Fog attenuation prediction for optical and infrared waves », *Opt. Eng.*, vol. 43, no 2, p. 319, févr. 2004, doi: 10.1117/1.1637611.
2. A. K. Majumdar, *Advanced Free Space Optics (FSO): A Systems Approach*, vol. 186. in *Springer Series in Optical Sciences*, vol. 186. New York, NY: Springer New York, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-0918-6.
3. R. Octave, « Utilisation des techniques avancées d'Émission/Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande. », THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITÉ CHEICK ANTA DIOP, Dakar-Senegal, 2015.
4. M. ROUISSAT, « Etude et Modélisation d'une Liaison Optique Sans Fil », Thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2013.
5. V. W. S. Chan, « Optical satellite networks », *J. Light. Technol.*, vol. 21, no 11, p. 2811-2827, nov. 2003, doi: 10.1109/JLT.2003.819534.
6. A. Mahdy et J. S. Deogun, « Wireless optical communications: a survey », in 2004 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat. No.04TH8733)*, Atlanta, GA, USA: IEEE, 2004, p. 2399-2404. doi: 10.1109/WCNC.2004.1311464.
7. C. C. Davis, I. I. Smolyaninov, et S. D. Milner, « Flexible optical wireless links and networks », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no 3, p. 51-57, mars 2003, doi: 10.1109/MCOM.2003.1186545.
8. I. Son, « Design and Optimization of Free Space Optical Networks », A dissertation submitted to the Graduate, Auburn University, 2010.
9. « Propagation of Light in Unguided Media », in *Free Space Optical Networks for Ultra-Broad Band Services*, John Wiley Sons, Ltd, 2011, p. 11-50. doi: 10.1002/9781118104231.ch1
10. H. Kaushal, V. K. Jain, et S. Kar, *Free Space Optical Communication*. in *Optical Networks*. New Delhi: Springer India, 2017. doi: 10.1007/978-81-322-3691-7.

11. O. Bouchet, Éd., Free-space optics: propagation and communication. London ; Newport Beach, CA: ISTE, 2006.
12. L. MESRI, « Etude et analyse des performances du système FSO-SAC-OCDMA sous l'effet de mauvaises conditions météorologiques », THESE DE DOCTORAT, Université DJILLALI LIABES de Sidi- Bel-Abbes, Sidi- Bel-Abbes, 2019.
13. F. Al-Ogaili et R. M. Shubair, « Millimeter-wave mobile communications for 5G: Challenges and opportunities », in 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, PR, USA: IEEE, juin 2016, p. 1003-1004. doi: 10.1109/APS.2016.7696210.
14. H. Fehmi, M. F. Amr, A. Bahnasse, et M. Talea, « 5G Network: Analysis and Compare 5G NSA /5G SA », Procedia Comput. Sci., vol. 203, p. 594-598, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.07.085.
15. H. A. Kholidy et Z. Akhtar, « Secure Spectrum and Resource Sharing for 5G Networks using a Blockchain- based Decentralized Trusted Computing Platform. ».
16. G. Barb, F. Alexa, et M. Otesteanu, « Dynamic Spectrum Sharing for Future LTE-NR Networks », Sensors, vol. 21, no 12, p. 4215, juin 2021, doi: 10.3390/s21124215.
17. X. JIANG, « MIMO Massif: transformer le concept en réalité en exploitant la reciprocite du canal », THESE DE DOCTORAT, COTE D'AZUR, NICE,FRANCE, 2017.
18. R. Dilli, « Analysis of 5G Wireless Systems in FR1 and FR2 Frequency Bands », in 2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), Bangalore, India: IEEE, mars 2020, p. 767-772. doi: 10.1109/ICIMIA 48430.2020.9074973.
19. I. Zaame, T. Mazri, et A. Elrhayour, « 5G: ARCHITECTURE OVERVIEW AND DEPLOYMENTS SCENARIOS », Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., vol. XLIV-4/W3-2020, p. 435-440, nov. 2020, doi: 10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W3-2020-435-2020.
20. S. Sasha, 5G Radio Access Network Architecture: The Dark Side of 5G, Wiley-IEEE Press. 2020.

Résumé

La communication optique en espace libre (**FSO, Free Space Optics**) est une technologie émergente offrant un débit élevé, une large bande passante, une licence gratuite et une sécurité solide. Elle constitue une solution attractive pour répondre aux besoins de connectivité de la **5G** qui a provoqué une révolution dans notre vie. La gêne la plus importante de la communication optique en espace libre vient des conditions météorologiques. Dans le cadre de ce mémoire, notre objectif est de présenter et d'analyser les performances des liaisons **FSO** basées sur l'**OFDM** en utilisant une modulation **QAM (Quadrature Amplitude Modulation)** à 4 niveaux. Notre étude vise à évaluer l'efficacité de cette technologie en termes de plusieurs facteurs clés, L'évaluation été faite par **L'EVM (Error Vector Magnitude)** et **les constellations**. Les résultats obtenus démontrent qu'avec un débit de 10 Gbit/s et une puissance laser de 10 dBm, une large bande de 6 GHz utilisée dans les applications de la 5G a été obtenue avec succès. De plus, une portée maximale de 9 km a été atteinte dans des conditions météorologiques claires. Toutefois, il est essentiel de souligner que les conditions météorologiques telles que la neige et la pluie ont un impact significatif sur les performances du système.

Mots clés: 5G, FSO, Simulation, LOA, WOC, Optisystem, Fiber, Liaison, Optique, EVM, Constellation, Espace, Libre

Abstract

Free Space Optics (**FSO**), is an emerging technology in optical communication that offers high data rates, wide bandwidth, free licensing, and strong security. It provides an attractive solution to meet the connectivity needs of the **5G**, which has revolutionized our lives. The most significant challenge in **FSO** communication arises from weather conditions. In the scope of this thesis, our objective is to present and analyze the performance of **FSO** links based on **OFDM** using 4-level **QAM**. Our study aims to evaluate the effectiveness of this technology in terms of various key factors, with the evaluation being conducted through **EVM** and **constellations**. The obtained results demonstrate that with a data rate of 10 Gbit/s and a laser power of 10 dBm, we have successfully achieved a wide bandwidth of 6 GHz, which is used in 5G applications. Additionally, we have achieved a maximum range of 9 km under clear weather conditions. However, it is essential to highlight that adverse weather conditions such as snow and rain have a significant impact on the system's performance.

keywords: 5G, FSO, Simulation, LOA, WOC, Optisystem, Fiber, Link, Optical, EVM, Constellation, Space, Free

ملخص:

الاتصال البصري في الفضاء الحر (FSO) هو تكنولوجيا ناشئة في الاتصالات البصرية توفر معدلات بيانات عالية ونطاق ترددي واسع وترخيص مجاني وأمان قوي. تعتبر هذه التقنية حلاً جذاباً لتلبية احتياجات الاتصال للجيل الخامس من الاتصالات الذي شكل ثورة في نمط حياة البشرية. التحدي الأكثر أهمية في الاتصال البصري في الفضاء الحر ينشأ من ظروف الطقس. في إطار هذه الأطروحة ، هدفنا هو تقديم وتحليل أداء روابط FSO المستندة إلى OFDM باستخدام تعديل الترميز بالكم (QAM) بأربعة مستويات. تهدف دراستنا إلى تقييم فعالية هذه التكنولوجيا من حيث عدة عوامل رئيسية، حيث تم إجراء التقييم من خلال EVM (Error Vector Magnitude) والكوكبة. تُظهر النتائج المُستخلصة أنه بفضل سرعة نقل بيانات تبلغ 10 جيجابت في الثانية وقوة ليزر تبلغ 10 ديسيبل ميلي واط، تمكنا من تحقيق نطاق تردد واسع يبلغ 6 جيجاهرتز يستخدم في تطبيقات الجيل الخامس (5G). بالإضافة إلى ذلك، تم تحقيق نطاق أقصى للتغطية يبلغ 9 كيلومترات في ظروف جوية صافية. ومع ذلك، يجب التأكيد على أن ظروف الطقس مثل الثلوج والأمطار لها تأثير كبير على أداء النظام.

الكلمات المفتاحية: 5G، FSO، محاكاة، LOA، WOC، Optisystem، الألياف، الرابط، البصريات، EVM، الكوكبة، الفضاء، حر