

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par :

SOUMANA BOUREIMA Adamou

Et

TRAORE Dounamba

Sujet

Techniques de transmission des ondes millimétriques par fibre optique/communication optique sans fil pour les réseaux 5G

Soutenu publiquement, le **15/ 06 / 2023**, devant le jury composé de :

M. FEHAM M	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. KAMECHE S	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. ADARDOUR H.E	MCA	Univ. Chlef	Co- Directeur de mémoire
Mme. DEROUCHE S	Doctorante	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M. BOUACHA A	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par :

SOUMANA BOUREIMA Adamou

Et

TRAORE Dounamba

Sujet

Techniques de transmission des ondes millimétriques par fibre optique/communication optique sans fil pour les réseaux 5G

Soutenu publiquement, le **15 / 06 / 2023**, devant le jury composé de :

M. FEHAM M	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. KAMECHE S	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. ADARDOUR H.E	MCA	Univ. Chlef	Co- Directeur de mémoire
Mme. DEROUICHE S	Doctorante	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M. BOUACHA A	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur

À mes parents

À toute la famille...

SOUMANA BOUREIMA ADAMOU

À mes parents,

pour votre amour, votre encouragement sans relâche et votre soutien constant

dans la poursuite des mes études. C'est à vous ce précieux travail.

À mes frères et sœurs,

merci pour votre amour et attention. J'espère que je suis à la hauteur du modèle

de grande sœur que vous aimeriez suivre. Je suis très heureuse de vous avoir.

À mes amis et collègues,

pour leur soutien moral et leur encouragement tout au long de ce processus.

À toute la famille,

*Je vous dédie ce travail et puisse Dieu nous garder ensemble et nous donner une
longue vie.*

TRAORE DOUNAMBA

Remerciements

Louange à notre Seigneur "ALLAH" qui nous a dotés de la faculté de raisonnement.

Allah qui nous a donné la force et le courage de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos familles et nos amis(es) pour leurs encouragements, leur aide et leur gentillesse.

Nous tenons tout particulièrement à remercier nos parents du fond du cœur pour leur aide, leur soutien et leurs sacrifices qui nous ont amenés là où nous sommes aujourd'hui.

*Nous exprimons nos sincères remerciements à Dr. **ADARDOUR** Haroun Errachid qui nous a fait l'honneur d'être notre Co-encadreur, pour son aide, son soutien et sa disponibilité ainsi que Pr. **KAMECHE** Samir et Mme. **DEROUICHE** Samra ; cela a été notre plaisir de travailler avec vous.*

*Nous remercions chaleureusement Pr. **FEHAM** Mohammed d'avoir accepté de présider ce mémoire et Pr. **BOUACHA** Abdelhafid de l'avoir examiné et corrigé.*

Merci à toutes les personnes qui nous ont aidés à réaliser ce projet de près ou de loin.

Résumé

À partir de 2020, les réseaux de communication de cinquième génération (5G) étaient prévus pour être déployés dans le monde entier. Cependant, en raison de la pandémie de coronavirus, leur mise en place a été partiellement restreinte aux réseaux de sixième génération (6G). Cette initiative est motivée par l'avantage d'appliquer des porteuses à haute fréquence aux ondes millimétriques (ondes mm), ce qui permettra d'augmenter considérablement la capacité des réseaux sans fil. Le présent travail propose un système de communication basé sur des technologies de transmission hybrides à ondes millimétriques sur une liaison Backhaul à fibre optique/communication optique sans fil. Les performances de mesure de la qualité de transmission sont jugées par, le BER, le facteur Q, la puissance du signal optique reçu et avec la représentation d'un digramme de l'œil. Enfin, la simulation de la liaison a été réalisée à l'aide du logiciel OptiSystem.

Mots clés : Fibre optique, Communication optique sans fil, 5G, Ondes millimétriques.

Remerciement.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Sigles et abréviations.....	vi
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Introduction générale.....	2

Chapitre 1 : Technologie FSO

I.1. Introduction.....	4
I.2. Technologie FSO.....	4
I.3. Fonctionnement de la technologie FSO.....	4
I.4. Topologie entre les nœuds FSO.....	6
I.4.1. Topologie point à point.....	6
I.4.2. Topologie point à multipoint.....	7
I.4.3. Topologie des anneaux.....	7
I.4.4. Topologie en maillage.....	7
I.5. Caractéristiques d'une liaison FSO.....	8
I.6. Applications de FSO.....	9
I.7. Avantages et inconvénients de FSO.....	9
I.7.1. Avantages FSO.....	10
I.7.2. Inconvénients FSO.....	10

I.8. Atténuation dans un canal FSO.....	10
I.8.1. Atténuation due au brouillard.....	10
I.8.2. Atténuation par la pluie	11
I.9. Paramètres d'une liaison FSO.....	12
I.9.1. Intensité rayonnante	12
I.9.2. Puissance optique reçue	13
I.9.3. Densité de puissance optique	13
I.9.4. Perte en espace libre (PEL)	13
I.9.5. Marge d'une liaison optique atmosphérique	14
I.9.6. Bilan de liaison.....	15
I.9.7. Débit de transmission	15
I.9.8. Capacité du canal de transmission	15
I.10. Conclusion	16

Chapitre 2 : Composants opto-électroniques

II.1. Introduction	18
II.2. Composants optoélectroniques	18
II.3. Émetteurs optoélectronique	19
II.3.1. Source optique	19
II.3.2. Modulateurs optiques.....	21
II.3.3. Types de modulation.....	22
II.4. Paramètres d'un émetteur optique	23
II.5. Amplificateur optique.....	23
II.5.1. Amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium.....	24
II.5.2. Amplificateur à effet Raman.....	25

II.5.3. Amplificateur optique à semi-conducteur.....	25
II.6. Récepteurs optoélectroniques	26
II.6.1. Photodiode PIN	26
II.6.2. Photodiode avalanche	27
II.7. Paramètres de récepteurs optiques.....	28
II.8. Conclusion	28

Chapitre 3 : Simulations et analyses des résultats

III.1. Introduction	30
III.2. Présentation du logiciel Optisystem.....	30
III.3. Critères d'évaluation des performances	31
III.3.1. Taux d'erreur binaire	32
III.3.2. Facteur de qualité Q.....	32
III.4. Diagramme d'œil.....	32
III.5. Systèmes de communication fibre optique/FSO pour les réseaux 5G	33
III.6. Résultats de simulation et interprétations.....	35
III.6.1. Effet de la variation de l'atténuation du canal FSO.....	35
III.6.2. Effet de la variation de la portée de canal FSO	38
III.6.3. Effet de la variation de la fréquence au niveau de l'émetteur	39
III.7. Conclusion.....	41
Conclusion générale	43
Références bibliographiques	45

A

APD	Avalanche P hoto D iode
ARPT	Autorité de R égulation des P ostes et de T élécommunications
ATM	Asynchronous T ransfer M ode
AWGN	Additive W hite G aussian N oise

B

BER	B it E rror R ate
------------	--

C

CATV	C ommunity A ntenna T elevision
-------------	--

D

DD	D irect D etection
DEL	D iodes E lectro- L uminescentes

E

EDFA	E rbium D oped F iber A mplifier
-------------	--

F

FSO	F ree S pace O ptical
------------	--

G

GSM **Global System for Mobile**

I

IM **Intensity Modulation**

IMZ **Interferometers Mach-Zehnder**

L

LOS **Line Of Sight**

LED **Light Emitting Diode**

LAN **Local Area Network**

M

MEA **Modulateur Electro-Absorbant**

MZM **Mach Zehnder Modulator**

MPPM **Multi Pulse PPM**

MAN **Metropolitan Area Network**

N

NRZ **Not Return to Zero**

O

OOK **On Off Keying**

P

PDH	P lesiochronous D igital H ierarchy
PEL	P erte en E space L ibre
PIN	P ositive I ntrinsic N egative P hotodiodes
PN	P ositive N egative P hotodiodes
PPM	P ulse P osition M odulation
PRBS	P seudo R andom B it S equence

R

RF	R adio F requency
-----------	---------------------------------

S

SOA	S emiconductor O ptical A mplifiers
SONET	S ynchronous O ptical N etwork

T

TEB	T aux d'Erreur B inaire
------------	---------------------------------------

W

WDM	W avelength D ivision M ultiplexing
WAN	W ide A rea N etwork

Chapitre1

Figure I.1. Schéma conceptuel de la communication optique en espace libre.....	4
Figure I.2. Illustration d'une liaison optique sans fil terrestre	5
Figure I.3. Visualisation d'un dispositif FSO (émetteur-récepteur).....	5
Figure I.4. Communication FSO entre deux sites	6
Figure I.5. Topologies entre les nœuds dans un réseau FSO	7

Chapitre2

Figure II.1. Architecture fondamentale d'une liaison optique en espace libre.....	18
Figure II.2. Schéma de module d'un émetteur FSO.....	19
Figure II.3. Exemple d'une diode électroluminescente.....	20
Figure II.4. Exemple de diode laser	20
Figure II.5. Représentation de la modulation directe dans une liaison FSO.....	22
Figure II.6. Emission à modulation externe utilisant IMZ/MEA	22
Figure II.7. Applications des amplificateurs optiques.....	24
Figure II.8. Amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium.....	24
Figure II.9. Amplificateur optique à effet Raman	25
Figure II.10. Schéma fonctionnel d'un récepteur optique.....	26
Figure II.11. Schéma d'une coupe transversale d'une diode PIN.....	27
Figure II.12. Photodiode APD.....	27

Chapitre 3

Figure III.1. Interface graphique d'OptiSystem	31
Figure III.2. Diagramme de l'œil	33
Figure III.3. Configuration du système proposé	34

Figure III.4. BER vs. Atténuation [dB/Km].....	36
Figure III.5. Facteur de Q vs. Atténuation [dB/km].....	36
Figure III.6. Puissance reçue vs. Atténuation [dB/km].....	37
Figure III.7. Diagrammes d’œil vs. Atténuation du canal FSO	37
Figure III.8. BER vs. Distance [km]	38
Figure III.9. Facteur de Q vs. Distance [km].....	38
Figure III.10. Puissance reçue [dBm] vs. Distance [km]	39
Figure III.11. Diagrammes d’œil vs. Portée du canal FSO	39
Figure III.12. BER vs. Fréquence [GHz]	40
Figure III.13. Diagrammes d’œil vs. Atténuation du canal FSO pour 31 GHz	40
Figure III.14. Facteur de Q vs. Fréquence [GHz]	41
Figure III.15. Puissance reçue [dBm] vs. Fréquence [GHz]	41

Liste des Tableaux

Chapitre 1

Tableau I.1. Evolution du débit chez ‘‘MRV’’, fabricant de matériel FSO.....	8
Tableau I.2. Atténuation [dB/km] vs. Visibilité [km]	11

Chapitre 3

Tableau III.1. Paramètres du canal FSO.....	35
---	----

Introduction générale

L'augmentation significative des quantités de données envoyées entre les utilisateurs de réseaux mobiles a été rendue possible par les progrès constants de la technologie des télécommunications. Face à cette situation, les technologies 5G offrent des transferts de données à grande vitesse ainsi qu'une diminution importante des temps de latence. Toutefois, pour parvenir à ces niveaux de performance, il faut une infrastructure de transport de données appropriée et efficace vers les courtes distances.

Pour répondre aux exigences de la 5G, une alternative prometteuse est apparue sous la forme de technologies de transmission hybrides à ondes millimétriques sur des connexions de liaison fibre optique/communication sans fil. En effet, cette technologie associe les avantages de la fibre optique, tels qu'un débit élevé et une faible atténuation, à ceux de la communication optique sans fil (FSO), qui offre une très grande souplesse dans le déploiement du réseau.

Dans le présent mémoire, le chapitre I porte sur la technologie de communication optique sans fil, connue également sous le nom de Free Space Optics (FSO), qui fait appel à des signaux optiques pour transmettre des données dans l'espace libre. Cette technologie est avantageuse par sa grande bande passante, son spectre sans licence, sans compter qu'elle est plus économique que les technologies filaires, car elle ne nécessite pas l'installation de câbles coûteux. Tout compte fait, il faut tenir compte de certains paramètres internes et externes comme la longueur d'onde du canal, la puissance à transmettre, la largeur de bande à transmettre, le diamètre du canal FSO et aussi les taux de transmission, pour avoir des niveaux élevés de performance.

Dans le chapitre II, les composants optoélectroniques nécessaires utilisés dans les systèmes FSO sont abordés. Ces composants sont présentés et listés dans l'ordre de leur utilisation, de la source lumineuse au récepteur FSO. La sélection de ces composants est essentielle pour garantir une performance optimale du système de communication FSO.

Enfin, au chapitre III, nous présentons les résultats obtenus lors de la simulation et les interprétations de notre système de communication hybride à ondes millimétriques sur une liaison optique sans fil/fibre optique. Les performances du système sont analysées suivant celles du taux d'erreur binaire (BER), du facteur de qualité (Q), de la puissance et du diagramme de l'œil.

CHAPITRE I

Technologie FSO

I.1 Introduction

Le système de communication en espace libre (FSO) est l'une des technologies les plus utilisées dans les systèmes de communication sans fils et à large bande passante. Souvent désignée sous le nom de "W.O.C Wireless Optical Communications" (communications optiques sans fil) [1]. La FSO est une méthode de communication optique offrant une connectivité en utilisant des faisceaux d'infrarouge modulé ou de la lumière visible pour transmettre des données sans fil. Par comparaison avec la fibre optique, cette technologie offre de large données de transmission, avec un grand taux de données tout en assurant une bonne sécurité de transmission que les transmissions par radio.

Durant ce premier chapitre, la technologie FSO, ses idées clés ainsi que ses avantages et ses inconvénients seront présentés.

I.2 Technologie FSO

La technologie connue sous le nom de communication optique en espace libre ou technologie FSO est nouvelle. Elle offre l'adaptabilité et les avantages de la communication radio sans fil tout en permettant le transfert de différents types de données avec un débit proche de celui de la fibre optique. Étant donné qu'elle nécessite une ligne de vue optique directe, à la différence de la fibre optique, elle est généralement installée au sommet des bâtiments [2]. Un exemple d'une liaison optique est illustré dans la figure I.1 suivante.

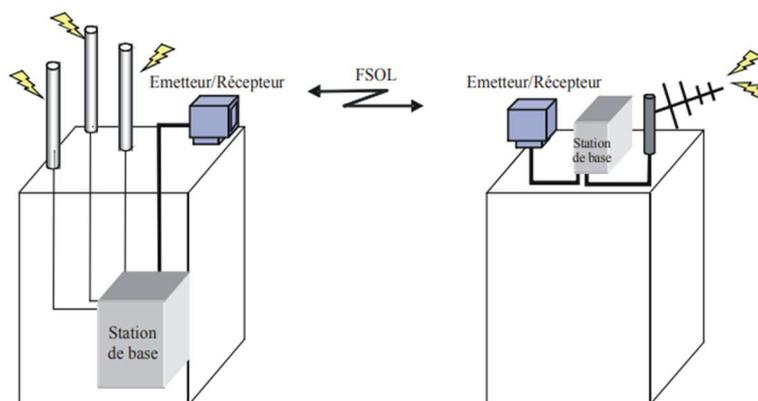


Figure I.1. Schéma conceptuel de la communication optique en espace libre

I.3 Fonctionnement de la technologie FSO

Cette technologie est basée sur une transmission laser infrarouge ou visible en espace libre. Les systèmes FSO permettent d'établir rapidement des connexions LOS (ou (line-of-sight)) entre deux endroits. La flexibilité et les avantages des réseaux radio sans fil sont combinés au débit

de la fibre optique pour permettre le transfert de tout type de données à l'aide de la technologie FSO [2].

Les trois principaux composants d'un système FSO sont l'émetteur, le canal de propagation plus le récepteur comme toute autre technologie de communication (voir la figure I.2).

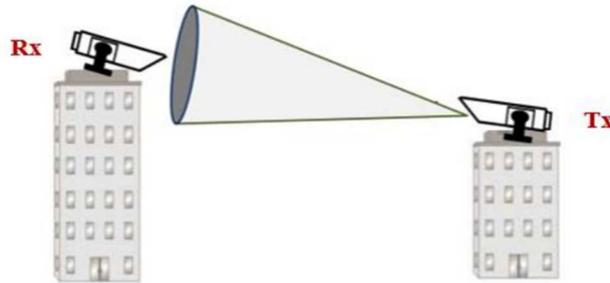


Figure I.2. Illustration d'une liaison optique sans fil terrestre.

Un émetteur et un récepteur sont généralement combinés dans un seul boîtier sur la plupart des équipements bidirectionnels (full duplex). Il est possible que certains systèmes prévoient la gestion de plusieurs canaux de communication. Les émetteurs (également connus sous le nom d'émetteurs-récepteurs) peuvent se trouver à l'intérieur d'un bâtiment, près d'une rue ou sur une toiture. La figure I.3 est l'image d'unité Light Point FSO qui peut envoyer et recevoir des données [3].

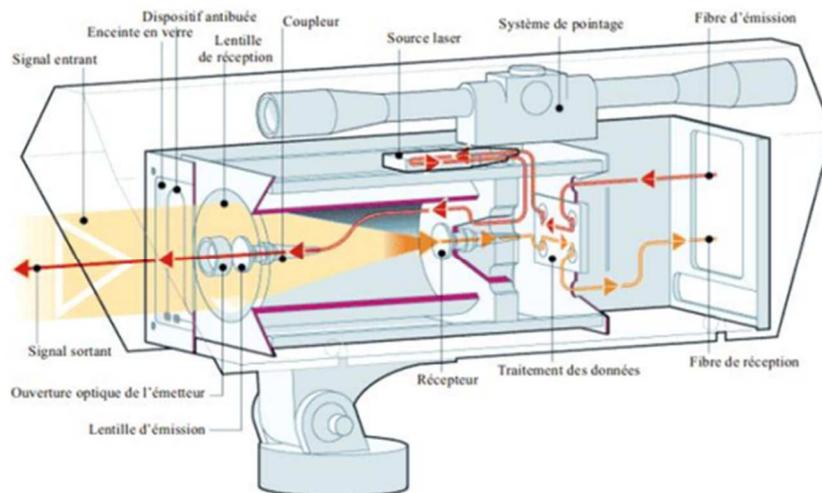


Figure I.3. Visualisation d'un dispositif FSO (émetteur-récepteur) [3].

Chaque équipement possède plusieurs modules :

Émission :

- Interface d'affluent : électrique ou optique pour la réception des données numériques ;

- Module de conversion Electrique/Optique (ou E/O);
- Filtrage et amplification des signaux numériques de nature électrique ;
- Module d'émission optique composé soit d'une diode laser, soit d'une diode électroluminescente.

Réception :

- Module de réception optique comprenant une photodiode ;
- Filtrage et amplification des signaux numériques de nature électrique ;
- Module de conversion Optique/ Electrique (ou O/E) (en cas d'interférence électrique) ;
- Interface d'affluent : électrique ou optique pour la transmission et la réception des données numériques [4,3].

Ce mode de communication (voir la figure I.4) autorise la création un réseau flexible avec multiples topologies comme : point-à-point, point-à-multipoint, d'anneau et en maillage (voir la figure I.5).

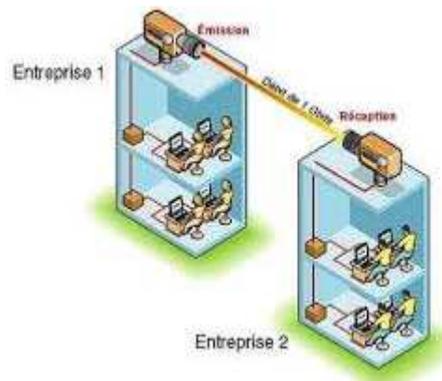


Figure I.4. Communication FSO entre deux sites [4].

I.4 Topologies entre les nœuds FSO

Il existe principalement dans les systèmes FSO quatre architectures de base : point-à-point, maillage, point-à-multipoint et topologie en anneau. Les avantages et les inconvénients de chaque topologie sont expliqués ci-après.

I.4.1 Topologie point-à-point

Le modèle point-à-point représenté sur la figure I.5(a) est le plus classique et le plus couramment adopté. Ce type de connexion spécialisée offre une bande passante plus élevée,

mais moins de souplesse d'évolution. La technologie FSO est rapide avec une rapidité qui est entre 155 [Mbps] et 10 [Gbps] sur une portée allant de 2 à 4 [km] en vue directe.

I.4.2 Topologie point-à-multipoint

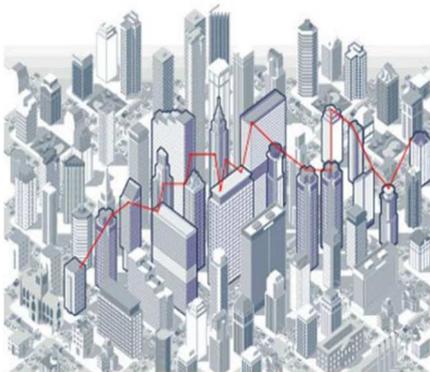
Le modèle point-à-multipoint (voir la figure I.5(b)) assure des liaisons moins coûteuses et facilite l'ajout de nœuds, mais la bande passante est moins élevée que pour le modèle point-à-point. En configuration point-à-multipoint, la FSO alloue les vitesses comme en configuration point-à-point, soit 155 [Mbps] à 10 [Gbps], sur une portée allant de 1 à 2[Km].

I.4.3 Topologie des anneaux

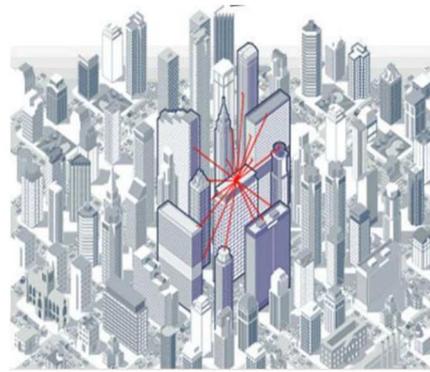
Le modèle en anneau (voir la figure I.5(c)) sert à installer des réseaux métropolitains. Ce type d'architecture assure une meilleure protection du réseau et du trafic.

I.4.4 Topologie en maillage

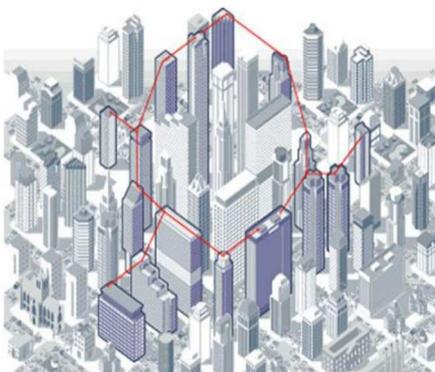
Ce type de réseau (voir figure I.5(d)) offre des possibilités de redondance et une plus grande fiabilité. Il est facile d'ajouter des nœuds à ce type d'architecture, mais la distance diminue davantage que pour les autres topologies.



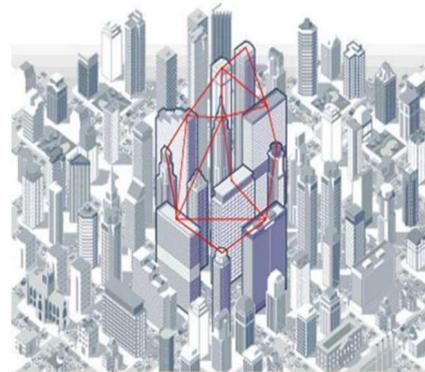
(a) Topologie point-à-point



(b) Topologie point-à-multipoint



(c) Topologie des anneaux



(d) Topologie en maillage

Figure I.5. Topologies entre les nœuds dans un réseau FSO.

I.5 Caractéristiques d'une liaison FSO

Les systèmes FSO présentent les grands avantages suivants : bas coût, souplesse, la mise en place et l'étalement et le redéploiement sont faciles et rapides par rapport à la FO tout en assurant une connectivité élevée ainsi qu'une flexibilité du sans fil. Les systèmes FSO permettent de réaliser plusieurs liaisons sur des distances allant des centaines de mètres à des kilomètres avec des débits qui vont de 155 Mbps jusqu'à des valeurs en Gbps.

La technologie FSO présente les caractéristiques suivantes :

- **Bande passante de modulation très large :** de données qui dépend directement de la bande passante de la porteuse modulée. Par conséquent, les systèmes FSO offrent une capacité d'information importante par rapport aux systèmes basés sur les communications par radiofréquence. Dans le tableau suivant, le progrès du débit au cours des années est représenté pour l'un des plus grands fabricants de matériel FSO MRV [5].

Années	Débit
1995	10 Mbps
2000	100 Mbps
2005	1 Gbps
2008 à ce jour	10 Gbps

Tableau I.1. Evolution du débit chez "MRV", fabricant de matériel FSO.

- **Faisceau étroit :** Un rayonnement optique se caractérise par un faisceau très étroit. En effet, la puissance transmise n'est concentrée que sur une zone très étroite. Grâce au confinement spatial des rayons optiques, les données transmises par ces rayons sont très difficiles à intercepter par d'autres consommateurs.
- **Prestations liées aux conditions atmosphériques :** Pour les liaisons terrestres FSO, les performances sont fonction des conditions météorologiques. Le principal défi est la propriété "non stable" du canal. Toutefois, s'il y a de grosses pluies ou d'orages, les liaisons RF et les liaisons de communication avec les satellites sont également susceptibles de tomber en panne.
- **Spectre sans licence :** En raison de l'encombrement du spectre radio, certaines autorités de régulation, comme l'*Autorité de Régulation de Poste et de Télécommunication* (ou

ARPT) [6] en Algérie, imposent une norme extrêmement rigide concernant l'attribution d'une partie du spectre radio. Il n'y a rien de tout cela dans les fréquences optiques. L'installation est peu coûteuse et le délai de mise en œuvre est plus bref. Une liaison FSO peut être pleinement opérationnelle en quelques heures seulement. Comme les équipements d'émissions et de réceptions dans les systèmes FSO sont capables de transmettre et de recevoir par des fenêtres donc c'est facile de les monter à l'intérieur des bâtiments permettant de réduire l'allocation de l'espace sur les toitures, faciliter le câblage et le fonctionnement de l'équipement FSO au sein d'un environnement particulièrement favorable.

I.6 Applications de FSO

Cette technologie est employée par plusieurs applications, parmi lesquelles nous avons :

- Diffusion optique par satellite dans l'espace.
- Interconnexions de réseaux LAN dans les villes ou dans les campus universitaires, permettant d'éviter le coût élevé du déploiement des communications par fibre optique.
- Liaison pour un événement particulier.
- Liaison temporaire : aménagement rapide pour un temps limité attendant une liaison traditionnelle permanente.
- Liaison de secours : est installée au cas où une liaison tombe en défaillance.
- Liaison entre sites, réseaux différents (PDH, SDH, ATM, Ethernet 10/100/100).
- Bouchage d'anneau optique.
- Liaison de secours.
- Densité de réseau.
- Une infrastructure mobile, comme une liaison pour les nano cellules ou pico cellules GSM ou IMT-2004 [4,3], etc.

I.7 Avantages et inconvénients de FSO

Pour certaines utilisations, ces liaisons présentent plusieurs avantages supplémentaires par rapport aux liaisons fixes traditionnelles ou aux liaisons par fibre optique, mais elles comportent également des inconvénients [7] :

I.7.1 Avantages FSO

- Déploiement facile et accéléré ;
- Haut débit de données ;
- Matériel simple et peu encombrant ;
- Exploitation sans licence ;
- Rentabilité ;
- Possibilité de déplacer et de réutiliser les liaisons facilement ;
- Transparence du protocole de communication ;
- Sécurité intrinsèque des périphériques FSO, supérieure à celle des liaisons radio.

I.7.2 Inconvénients FSO

- Il s'agit de l'absence d'obstacles physiques entre l'émetteur et le récepteur ;
- Alignement du faisceau : orientation en ligne de visée ;
- Dispersion du faisceau ;
- Portée limitée par les conditions météorologiques (pluie, brouillard, neige) ;
- Influence du rayonnement solaire ;
- Atténuation atmosphérique, due aux caractéristiques atmosphériques, aux effets de la scintillation à l'existence d'aérosols.

I.8 Atténuation dans un canal FSO

En effet, les conditions météorologiques, la distance et les phénomènes de l'atmosphère comme la pluie, la neige mais aussi le brouillard, qui constituent un défi majeur dans la mise en œuvre des réseaux sans fils optiques, influencent fortement la fiabilité et la faisabilité d'une liaison optique sans fil. Ces effets, par leur durée et leur intensité, auront un grand impact sur l'autonomie et la crédibilité de la liaison.

I.8.1 Atténuation par le brouillard

Le signal de transmission de transmission est souvent perturbé dû aux conditions météorologiques. Le brouillard est en effet un phénomène où les particules contenues dans l'air, à cause de leur variation de taille, demeurent plus longtemps et affaiblissent le signal optique.

La visibilité est un moyen de déterminer l'atténuation due au brouillard. Selon les modèles de KRUSE et KIM, on utilise cette approche pour anticiper cette atténuation. Dans le cas des modèles de KRUSE et KIM, l'atténuation spécifique est représentée sous la forme de l'équation suivante :

$$\alpha_{\text{brouillard}} = \frac{3.912}{v} \left(\frac{\lambda}{550\text{nm}} \right)^{-q} \quad (1.1)$$

Où, v correspond à la visibilité en km, qui est la distance maximale à laquelle il est possible de distinguer un objet noir dans le ciel, λ indique la longueur d'onde en nm et q désigne le paramètre associé à la répartition de la taille des gouttelettes.

En particulier, on définit la visibilité à certaines fins météorologiques. Le tableau 1.2 fait apparaître les valeurs d'atténuation du brouillard en fonction de la visibilité au moyen de la formule de KRUSE et KIM.

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

Tableau I.2. Atténuation [dB/km] vs. Visibilité [km].

I.8.2 Atténuation par la pluie

Les précipitations sont principalement l'un des causes de la dégradation des communications FSO et ses effets ne doivent pas être négligés. En effet, la variation de la taille des gouttelettes cause de multiples réflexions et réfractions dans l'atmosphère.

Le facteur d'atténuation spécifique d'un réseau FSO dû à la pluie correspond à la formule suivante :

$$\alpha = a \cdot R^b \quad (1.2)$$

Où a et b correspondent à des paramètres liés à la fréquence et R , le taux de précipitations en [mm/h]. La formule fait apparaître un système linéaire entre le taux de précipitations et l'atténuation.

La formule de calcul correspondante pour l'atténuation de la pluie est donnée dans ce qui suit :

$$\alpha_{\text{pluie}} = 1.076 \cdot R^{0.67} \quad (1.3)$$

Le degré d'atténuation dépend de l'intensité de la pluie : 3 dB/km pour une pluie légère, 9 dB/km pour une pluie moyenne et 20 dB/km pour une pluie extrême. En cas de brouillard, la valeur d'atténuation est de 2.37 dB/km [8].

I.9 Paramètres d'une liaison FSO

Il faut tout d'abord vérifier si les liaisons optiques atmosphériques sont disponibles et fiables avant de les déployer :

- Le concept de disponibilité détermine en effet le pourcentage de temps pendant lequel ils fonctionnent sous des conditions satisfaisantes.
- Le terme "fiabilité" garantit le flux d'informations à travers un service d'une qualité donnée.

Comme pour l'équipement d'une liaison FSO, il est essentiel de connaître la marge brute et le budget de la liaison concernée. Ces paramètres détermineront le pouvoir de transmission des données numériques de la liaison sans dépendre des conditions météorologiques. Pour définir les liaisons optiques atmosphériques, les principaux paramètres à considérer sont : la capacité (puissance) de transmission, la sensibilité du récepteur, la zone de détection optique du récepteur et la divergence du faisceau transmis. Ces données techniques servent au calcul de la valeur de l'affaiblissement géométrique de la liaison et sa marge brute [9].

I.9.1 Intensité rayonnante

Il est possible de modéliser le rayonnement optique des émetteurs optiques au moyen par un modèle Lambertien généralisé [9,11]. Le diagramme de rayonnement d'un émetteur qui a un rayonnement Lambertien d'ordre " m " est défini par la formule :

$$R_0(\varnothing) = \left(\frac{m+1}{2\pi}\right) \cdot \cos^m(\varnothing) \quad (1.4)$$

Où \varnothing correspond à l'angle comprise entre l'orientation de la surface d'émission et la direction prise en compte du rayonnement optique.

L'intensité rayonnée est donc notée pour une puissance totale :

$$I = P_T \cdot R_0(\varnothing) \quad (1.5)$$

I.9.2 Puissance optique reçue

Cette puissance est calculée comme celle des faisceaux hertziens terrestres suivant de grandeurs d'ordre différents la formule suivante permet d'obtenir la puissance reçue [10] :

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_L \cdot G_R \cdot \tau_T \cdot \tau_L \cdot \tau_{\text{atm}} \quad (1.6)$$

Où, P_T désigne la puissance totale transmise, G_T est le gain de l'émetteur, G_L est la perte due au chemin de distance L , G_R est le gain du récepteur, τ_T représente l'efficacité d'un émetteur optique, τ_L correspond à l'efficacité d'un récepteur optique, τ_{atm} dénote l'affaiblissement atmosphérique.

La puissance optique reçue se traduit comme suit :

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right)^2 \cdot \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \cdot \tau_T \cdot \tau_L \cdot \tau_{\text{atm}} \quad (1.7)$$

Où, λ et D correspondent respectivement à la longueur d'onde et à l'ouverture du récepteur.

I.9.3 Densité de puissance optique

La densité de puissance pour une surface donnée de l'antenne est le rapport entre la puissance émise et la surface de l'antenne [9,10]. Sa formule est la suivante pour une distance L entre l'émetteur et le récepteur :

$$P_D = \frac{P_T}{4\pi L^2} \quad (1.8)$$

I.9.4 Perte en espace libre (PEL)

C'est la perte du signal lors de sa propagation de l'émetteur vers le récepteur [9, 11]. Il existe différents modèles qui sont basés sur la fréquence et la distance. Elle est calculée en utilisant la formule suivante :

$$PEL = 32.45 + 20 \cdot \log(L) + 20 \cdot \log(f) \quad (1.9)$$

Où f étant la fréquence et L étant la distance est la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Dans les communications optiques, on calcule cette perte afin de prédire le niveau de puissance du signal obtenu à la réception dans un milieu sans turbulence. Pour une distance L , la puissance reçue est :

$$P_R(L) = P_T \cdot G_T \cdot G_L \cdot G_R = \frac{G_T \cdot G_L \cdot G_R \cdot \lambda^2}{(4\pi L)^2} \quad (1.10)$$

On obtient la perte due au trajet en décibels sous la forme suivante :

$$P(L) \text{ [dB]} = 10 \log\left(\frac{P_T}{P_R}\right) = -10 \log\left(\frac{G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2}{(4\pi L)^2}\right) \quad (1.11)$$

I.9.5 Marge d'une liaison optique atmosphérique

Dans un système FSO, on appelle marge de liaison une quantité qui caractérise et décrit le signal transmis entre l'émetteur et le récepteur. Elle est capable de déterminer toutes les contributions nécessaires des pertes sur le signal et aussi de la disponibilité de la liaison. Elle peut être définie comme la puissance disponible au-dessus de la sensibilité du récepteur [9,12].

De la valeur de l'atténuation géométrique (Aff_{Geo}), on peut calculer cette marge brute dont l'expression est en [dB]. Parmi les données fournies par les fabricants telles que la puissance émise P_T , la sensibilité de réception S_r et les pertes du système P_{tot} , comme mentionnées déterminent la marge brute par la formule :

$$M_{Liaison}(dB) = P_T + |S_r| - Aff_{Atm}(dB) - P_{tot}(dB) \quad (1.12)$$

Où, S_r est la sensibilité du récepteur, Aff_{Atm} est l'atténuation moléculaire de la longueur d'onde utilisée dans la liaison, P_{tot} est la perte totale de toutes les autres pertes relatives au système.

L'affaiblissement géométrique de la liaison (dB) est donné par la formule qui suit :

$$Aff_{Geo} = \frac{S_L}{S_{Capture}} \quad (1.13)$$

Où S_L est la surface du spot lumineux à une distance L de l'émetteur et $S_{Capture}$ la surface de capture du récepteur.

On peut établir l'expression de l'atténuation géométrique de la liaison par :

$$Aff_{Geo} = \frac{\pi(L\theta)^2}{4+S_{Capture}} \quad (1.14)$$

Où θ est la divergence du faisceau laser.

Par conséquent, la liaison FSO est disponible si les atténuations additionnelles dues aux conditions météorologiques et du climat (pluie, neige, brouillard...), à la lumière du rayonnement solaire ainsi qu'au scintillement ne dépassent pas la marge de la liaison FSO.

I.9.6 Bilan de liaison

Le bilan de liaison est mesuré en calculant le rapport signal sur bruit utile à la sortie du récepteur relativement aux facteurs influençant la puissance de l'onde transmise. En considérant la puissance de bruit des récepteurs P_N , le rapport signal/bruit peut être défini par :

$$\frac{P_R}{P_N} = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_L \cdot G_R \cdot \tau_T \cdot \tau_L \cdot \tau_{atm}}{P_N} \quad (1.15)$$

La puissance de bruit dans une bande de fréquence donnée est :

$$P_N = k \cdot T \cdot B \quad (1.16)$$

Où k est la constante de Boltzmann, T est la température du système en Kelvin et B la bande de fréquence [9,13].

I.9.7 Débit de transmission

Il est calculé par le rapport signal sur bruit et le rapport de l'énergie par bit [9,14]. Ce rapport équivaut à l'énergie par bit sur la densité du bruit. Cette valeur est dépendante du type de modulation choisi et de la norme de communication. Pour prévenir tout phénomène pouvant dégrader la transmission du signal, une marge est prise par rapport à la valeur requise de $(\frac{E_b}{N})$.

Le rapport $(\frac{E_b}{N})$ en dB est donné par :

$$\frac{E_b}{N} = \left(\frac{E_b}{N}\right)_{requis} + M_{Liaison}(dB) \quad (1.17)$$

Enfin, le débit de transmission est calculé par la formule :

$$\text{Débit} = 10 \left(\frac{\left(\frac{P_R}{N}\right) - \left(\frac{E_b}{N}\right)}{10} \right) \quad (1.18)$$

I.9.8 Capacité du canal de transmission

La capacité du canal de transmission désigne la quantité maximale d'informations pouvant être transmises de manière sûre, c'est-à-dire sans perte d'informations. Le théorème de Shannon-Hartley permet d'obtenir la capacité C du canal de transmission avec un bruit blanc gaussien additif (AWGN) au moyen de la formule suivante :

$$C_{(t)} = B \log_2(1 + SNR_{(t)}) \quad (1.19)$$

On exprime la capacité d'un canal en [bits/s], la largeur de bande B en [Hz] et le rapport signal sur bruit est linéaire [9].

I.10 Conclusion

Le présent chapitre fut consacré à la description de la technologie FSO qui, bien qu'elle soit confrontée à des défis, a de nombreux domaines d'application grâce à sa rapidité, sa sécurité et sa flexibilité. La suite de ce chapitre sera dédiée aux composants optoélectroniques nécessaires à la technologie FSO.

CHAPITRE II

Composants Opto- électroniques

II.1 Introduction

Le terme optoélectronique désigne la branche de l'électronique et de la photonique, ainsi que l'étude des composants qui émettent, modulent ou détectent des signaux lumineux. Le présent chapitre expose les composants optoélectroniques exploitées dans le cadre de la technologie FSO.

II.2 Composants optoélectroniques

Tout système FSO contient trois (03) éléments opérationnels à savoir l'émetteur, le canal de propagation et le récepteur (voir la figure II.1). Les longueurs d'onde de 850 et 1550 nm sont égales à deux fenêtres atmosphériques (régions spectrales où l'absorption atmosphérique ambiante est réduite) et peuvent être exploités dans les communications par fibre optique par conséquent les composants exploités dans ces liaisons sont également exploitables dans les systèmes de communications optiques sans fil [10].

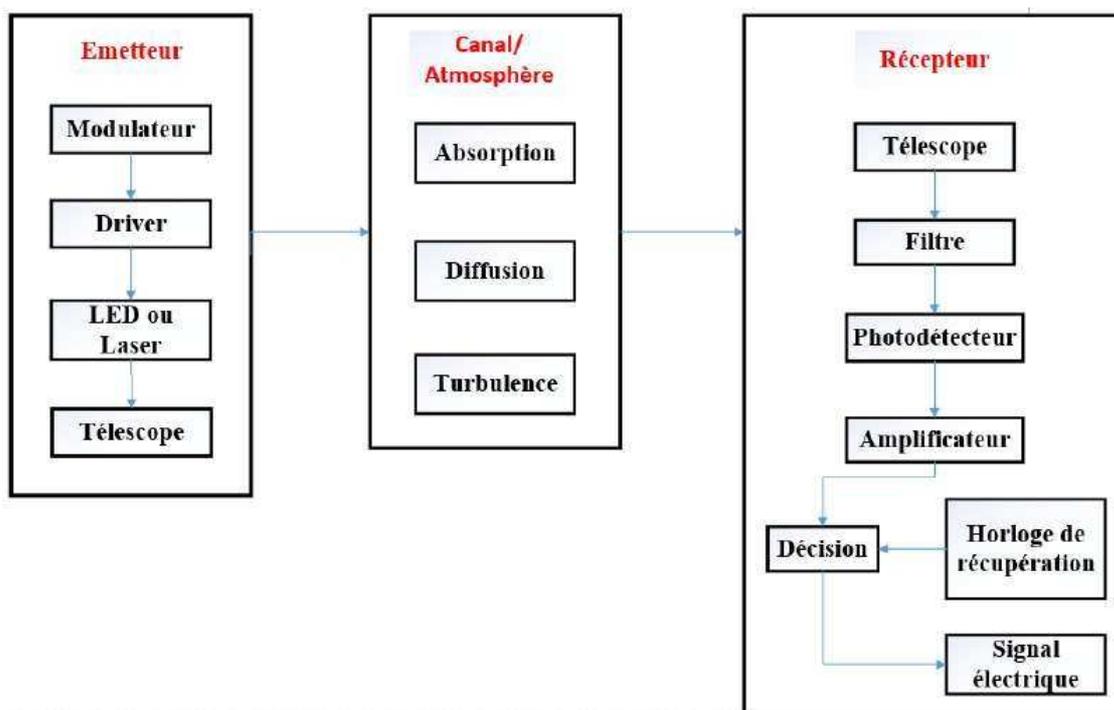


Figure II.1. Architecture fondamentale d'une liaison optique en espace libre.

On trouve des amplificateurs au niveau des émetteurs et des récepteurs dont le rôle est d'amplifier le signal avant de l'injecter dans le canal ou à la réception pour accroître la sensibilité du récepteur.

II.3 Emetteur optoélectronique

Ce dispositif a pour rôle la conversion du signal électrique modulé en signal optique et dispose principalement d'un modulateur, d'un pilote et d'une source optique (laser ou LED). Ensuite, le signal est propagé dans l'atmosphère jusqu'au récepteur. Ce dernier reçoit le signal modulé et extrait les informations transmises. Pour la plupart, les systèmes FSO sont conçus pour être exploités dans les fenêtres de 780-850 et 1520-1600 nm, ce qui correspond à des fréquences de transmission de données de l'ordre de 200 THz [10,16]. La figure II.2 représente le schéma de principe d'une unité de transfert optique en espace libre.

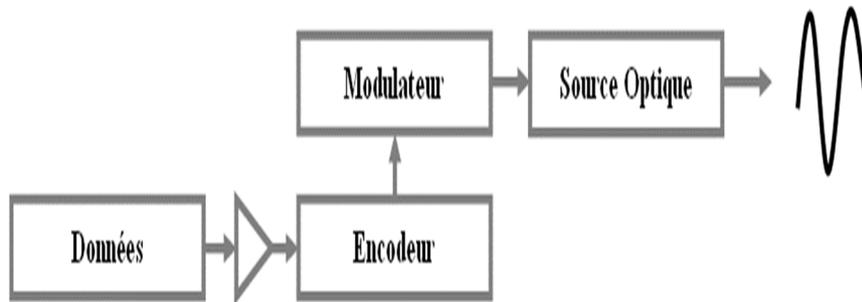


Figure II.2. Schéma de module d'un émetteur FSO [10,16].

II.3.1 Source optique

Il existe deux (2) types de sources optiques utilisées pour transmettre des données optiques :

a. Diodes électroluminescentes (ou DEL)

La DEL (diode électroluminescente) fait partie des composants optoélectroniques capable d'émettre de la lumière sous l'effet du courant électrique. Elle est constituée d'une source incohérente et polychromatique (Voir la figure II.3). Le spectre d'émission est assez grand et le diagramme de rayonnement moins directif. Du fait de la faiblesse de leur puissance d'émission, les DELs sont en général employées pour des applications à courte distance et des largeurs de bande suivant l'ordre de 155 MHz. Les sources DEL ont pour principal avantage d'être peu coûteuses à l'achat [15].

Ces diodes électroluminescentes sont fabriquées en rouge, jaune et vert. Les couleurs n'indiquent pas le type de matériau utilisé, mais plutôt le matériau semi-conducteur employé. Cela définit également la différence potentielle entre l'anode et la cathode, supérieure à celle des diodes au silicium : environ 1.5 V pour le rouge, 2.5 V pour le jaune et à peu près 3V pour le vert. Pour qu'elle devienne lumineuse, un courant d'environ 10 mA doit la traverser [16].



Figure II.3. Exemple d'une diode électroluminescente.

b. Diodes Lasers

Pour les applications à longue distance, la diode laser (amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement ou (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) offre des avantages significatifs par rapport à la diode électroluminescente. En effet, elle est cohérente, monochromatique et dispose d'une faible largeur spectrale et aussi d'une grande bande passante. Dans le secteur des systèmes optiques commerciaux sans fil, les lasers à semi-conducteurs (voir la figure II.4) sont particulièrement utilisés en raison de leur petite taille, de leur puissance élevée et de leur gain. Les entreprises qui ont besoin d'une puissance élevée et constante dans leurs systèmes FSO préfèrent les lasers à semi-conducteurs [15].



Figure II.4. Exemples de diode laser.

c. Critères de sélection des diodes lasers dans les systèmes FSO

Plusieurs facteurs sont étudiés dans la sélection d'une source laser pour les applications FSO. La longueur d'onde de transmission doit être en corrélation avec l'une des fenêtres atmosphériques. Comme mentionné précédemment, des fenêtres atmosphériques les plus favorables se situent entre 850nm et 1550nm dans le proche infrarouge. Dans le domaine spectral de l'IR long, il existe des fenêtres de longueur des ondes entre 3 et 5 micromètres (en particulier entre 3,5 et 3,6 micromètres et entre 8 et 14 micromètres) [17].

Parmi les autres facteurs affectant l'utilisation d'une source lumineuse particulière, il convient de citer les suivants :

- Coût et disponibilité des composants ;
- Puissance à transmettre ;
- Résistance ;
- Capacité de modulation ;
- Protection des yeux ;
- Dimensions physiques ;
- Harmonie avec d'autres supports de transmission comme la fibre.

II.3.2 Modulateurs optiques

La modulation permet à un dispositif de changer les paramètres d'un signal optique.

Deux techniques sont utilisées pour la modulation des ondes optiques qui sont la modulation directe et la modulation externe.

La transmission FSO repose actuellement sur des technologies de détection et de démodulation mises au point pour les communications optiques. En général, le système FSO fait appel à la modulation d'intensité et à la détection directe. Cette méthode est toutefois confrontée à l'augmentation du spectre de la diode laser, ce qui réduit les possibilités d'un choix spectral fin. Ceci limite les opportunités de choix spectral fine. Une augmentation spectrale de la diode exige en effet un filtre dont la largeur est suffisante par rapport à celle du flux lumineux utile. Or, l'accroissement de ce filtre a pour effet d'augmenter la lumière perturbatrice qui pénètre. Le signal optique est envoyé vers un photo-détecteur à la réception puis la puissance optique reçue est transformée en courant électrique. Ainsi, aucune information sur la fréquence et sur la phase n'est contenue. Sur la figure II.5, on peut voir une chaîne de transmission optique en modulation directe [10, 16 ,9].

Par ailleurs, une autre modulation existe sous le nom de modulation externe. Dans ce genre de modulation, les diodes lasers ne sont plus modulées. Elles reçoivent une puissance électrique continue et sont suivies par un appareil qui fait la modulation de l'intensité optique. Comme exemple, on peut citer l'interféromètre de Mach-Zehnder (IMZ) ou un modulateur électro-absorbant (EMA) (voir la figure II.6) [10, 16, 9].

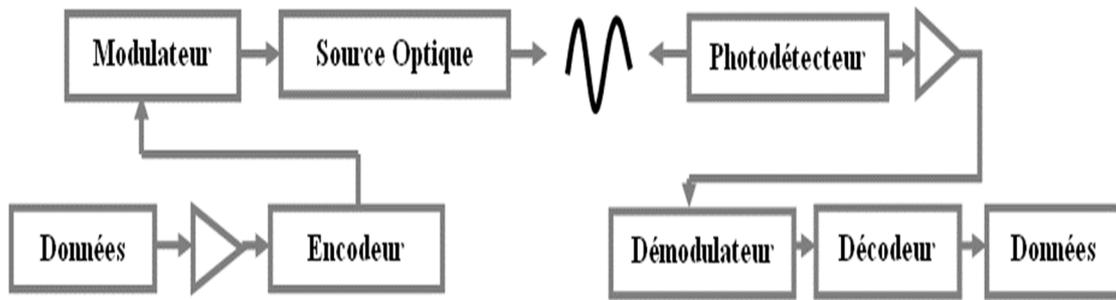


Figure II.5. Représentation de la modulation directe dans une liaison FSO [10, 16, 9].

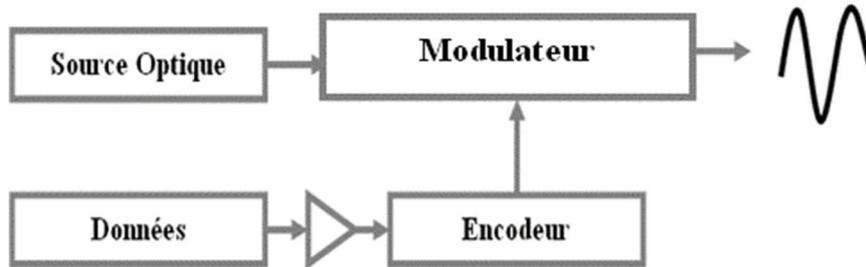


Figure II.6. Emission à modulation externe utilisant IMZ/MEA [10, 16, 9].

II.3.3 Types de modulation

Le choix du format de modulation est un facteur principal pour l'obtention d'un système de communication très performant à un prix raisonnable et d'une complexité acceptable.

La modulation d'intensité à détection directe (IM/DD) est la technique de modulation la plus pratique dans les systèmes FSO. Il existe différents types de modulations qui sont compatibles avec les systèmes FSO et reposant sur la modulation d'intensité comme OOK, PPM et MPPM.

- **Modulation OOK** : Cette modulation très simple et très répandue sur les systèmes de communication FSO. Elle est facile à déployer, simple à concevoir et peu coûteuse.
- **Technique de modulation PPM** : Cette technique de modulation offre l'avantage d'une meilleure efficacité en termes de puissance que l'OOK, mais au prix d'une augmentation des besoins en largeur de bande et d'une complexité accrue en raison du degré de précision élevé nécessaire à la synchronisation des créneaux et des symboles.
- **Modulation MPPM** : une généralisation du PPM est le MPPM. Cette modulation de réaliser un flux d'information important, avec une meilleure efficacité spectrale. Les systèmes de communication optique sans fil ont chacun leurs propres caractéristiques et exigences. Les méthodes de modulation présentées se caractérisent toutes par un facteur important de la conception, tel que la synchronisation, un haut débit, une très bonne efficacité spectrale ou une efficacité énergétique abondante. Ces méthodes de

modulation deviennent fascinantes pour les différents systèmes de communication optique sans fil et compétitives vis-à-vis des autres types de modulation disponible [8].

II.4 Paramètres d'un émetteur optique

Un émetteur optique se caractérise par les paramètres suivants :

- **Surface d'émission** : représente l'aire de la fenêtre émettrice, exprimée en mètres carrés.
- **Puissance d'émission** : c'est la puissance émise à partir de la surface d'émission, elle s'exprime en dBm ou en mW. Elle doit être mesurée en dehors du système de transmission optique, en espace libre et aussi le plus proche que possible des fenêtres d'émission de ce système.
- **Divergence du faisceau** : correspond à la valeur maximale de l'angle existant entre l'axe central du faisceau représentant la densité de puissance maximale par rapport à la direction représentant la densité de puissance la plus faible de -3 dB. Elle est exprimée en milli radian(mrad).
- **Longueur d'onde** : correspond à la longueur d'onde centrale ainsi qu'à l'intervalle spectral et est exprimée en nanomètres [3].

II.5 Amplificateur optique

La fonction principale d'un amplificateur optique consiste à amplifier directement un signal optique, sans convertir le signal optique en signal électrique, ni convertir le signal électrique amplifié en signal optique. Cet amplificateur optique en effet ne régénère pas le signal et ne donne pas de forme au signal à amplifier ; en revanche, le signal est amplifié, de même que le bruit qui lui est associé. Il est possible de réaliser l'amplification optique en trois points d'une liaison qui correspondent aux trois principales applications d'un amplificateur optique, comme montré par la figure II.7. La configuration de l'amplificateur optique dans le système que nous allons proposer est celle d'un amplificateur optique en ligne entre la fibre optique et le canal FSO.

La sélection d'un amplificateur optique repose sur le rôle qu'il doit assumer. En effet, il peut être considéré comme un amplificateur de puissance d'émission, comme un préamplificateur ou comme un amplificateur en ligne. Le booster est notamment destiné à augmenter la puissance injectée dans le réseau optique. Quant au préamplificateur, il est employé à l'autre extrémité

d'une liaison en vue d'amplifier le niveau du signal de manière à ce qu'il soit détecté au-dessus du bruit thermique du récepteur. L'amplificateur en ligne est employé sur une distance donnée, en cas d'affaiblissement des signaux sur de longues distances.

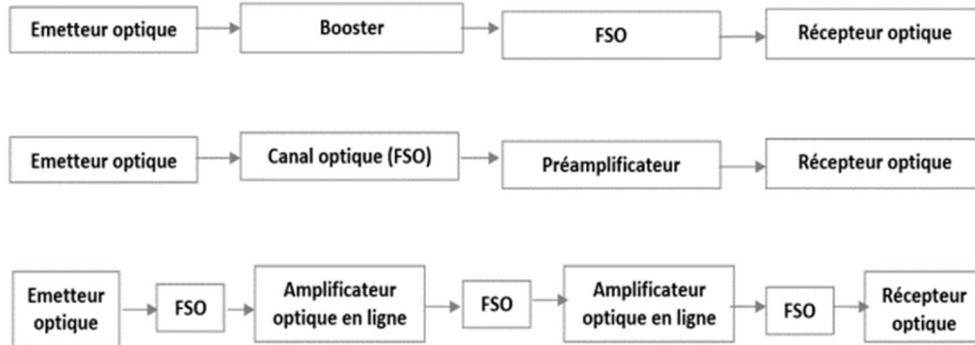


Figure II.7. Applications des amplificateurs optiques.

Dans les systèmes de transmission optique, trois types d'amplificateurs optiques sont essentiellement utilisés, à savoir :

II.5.1 Amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium

Le plus souvent, ils sont utilisés comme amplificateurs à fibre optique dopée à l'erbium. Leur simplicité est l'un de leurs avantages (voir la figure II.8). En effet, sa fibre optique (généralement monomode) est dopée à l'erbium, un élément de terre rare, de manière à absorber la lumière à une fréquence donnée et à émettre de la lumière à une autre fréquence. La source d'énergie ou de pompage est fournie par une diode laser de puissance élevée ou moyenne (50 à 400 [mW]) qui émet dans les bandes d'absorption de l'ion erbium (0,98 ou 1,48 [μm]). Un multiplexeur permet de coupler l'onde de signal et l'onde de pompe au sein de la fibre amplificatrice. Un isolateur est employé pour empêcher les réflexions.

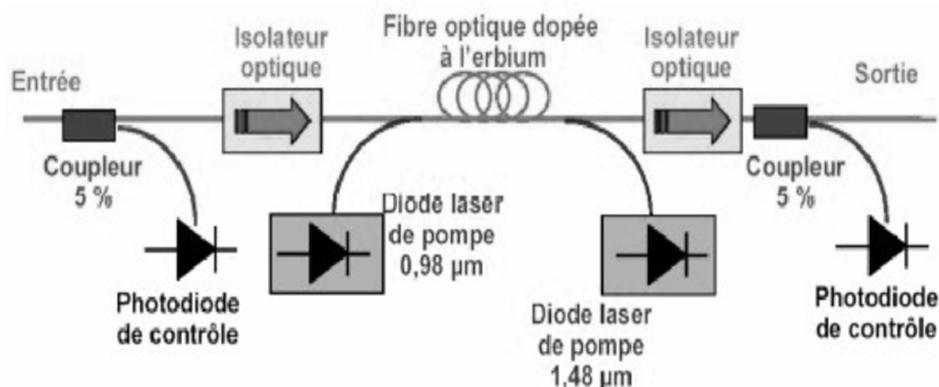


Figure II.8. Amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium [19].

Généralement, l'EDFA présente un gain de [25 à 45 dB] et des puissances de saturation pouvant aller de 1 à 10 [mW] (0 à 10 [dBm]), avec une large bande passante [1530-1560 nm] dont le gain est quasiment identique, ce qui le rend attractif lorsqu'il s'agit d'amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexés en longueurs d'onde.

II.5.2 Amplificateur à effet Raman

La conception de l'amplificateur Raman (voir la figure II.9) repose sur le gain Raman résultant de l'effet de la diffusion Raman stimulée. Cet amplificateur a pour objectif principal de compenser les pertes de ligne du signal tout au long de son trajet dans la fenêtre de transmission. À la différence du SOA et de l'EDFA, l'effet d'amplification est obtenu par une interaction non linéaire entre le signal et un laser de pompe dans une fibre optique. Les avantages de l'amplificateur Raman résident dans une plus grande gamme de longueur d'onde, un gain optique constant ainsi qu'une réduction efficace du facteur de bruit.

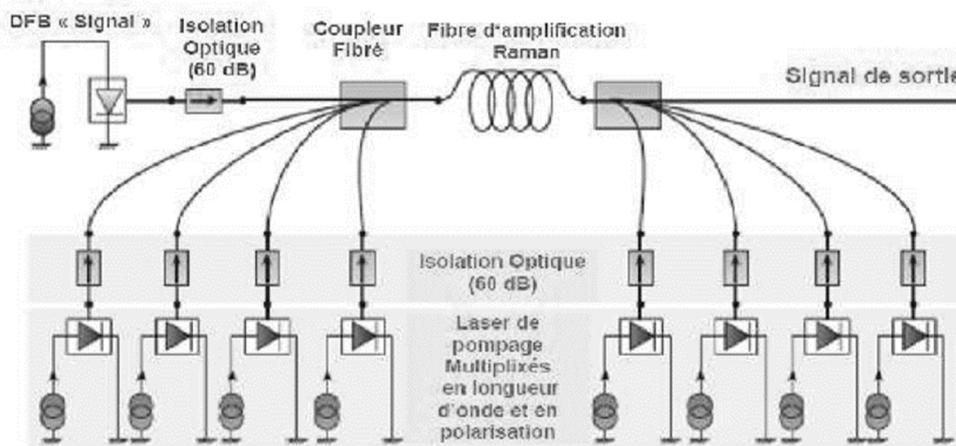


Figure II.9. Amplificateur optique à effet Raman [20].

II.5.3 Amplificateur optique à semi-conducteur

Il existe des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) basés sur l'utilisation d'un semi-conducteur comme moyen de gain. Par conséquent, ils ont une structure similaire à celle des diodes laser. Toutefois, ils sont dotés d'éléments de conception antireflets sur les faces avant. Normalement, il n'y a donc pas de réflexion du signal dans l'amplificateur. Les amplificateurs SOA ont comme avantage l'intégration monolithique avec d'autres composants, bien qu'ils présentent des non-linéarités, en particulier lors de la saturation du gain.

II.6 Récepteurs optoélectroniques

Cette partie de la réception constitue pour sa part la dernière étape de la chaîne de transmission (voir la figure II.10). Le récepteur optique a pour fonction la transformation du signal optique modulé reçu en signal électrique en assurant le minimum de détérioration. Cela est possible au moyen du photo-détecteur qui, de manière simple, se transforme en un compteur de photons et en un générateur de courant.

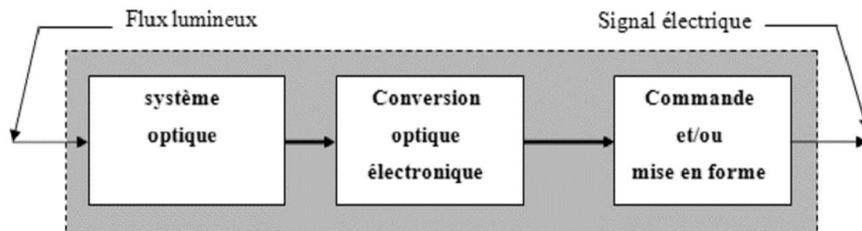


Figure II.10. Schéma fonctionnel d'un récepteur optique.

Le photo-détecteur est un semi-conducteur de jonction PN qui est polarisé inversement permettant la conversion du signal optique reçu (les photons) en signal électrique grâce à l'effet photoélectrique. Le photo-détecteur a trois propriétés requises, à savoir :

- Haute sensibilité (adaptation à la longueur d'onde de la source laser).
- Vitesse élevée (ou grande largeur de bande) permettant une utilisation dans les systèmes fonctionnant jusqu'à 40 Gbits/s.
- Faible contribution au bruit.

On distingue deux catégories de photodiodes : les photodiodes PIN et les photodiodes à avalanche (APD) [21].

II.6.1 Photodiode PIN

En effet, elles comprennent trois couches semi-conductrices : deux couches P et N fortement dopées (voir la figure II.11), entre lesquelles se trouve une couche presque intrinsèque (très faiblement ou non dopée), où la charge mobile est très faible. Pour leur faible coût, leur simplicité d'utilisation et leurs performances satisfaisantes, les photodiodes PIN restent les plus largement utilisées [22].

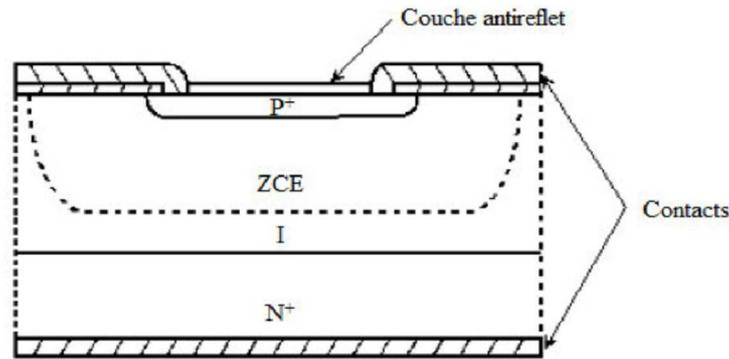


Figure II.11. Schéma d'une coupe transversale d'une diode PIN [23].

Voici les paramètres les plus importants caractérisant une photodiode PIN :

- La sensibilité
- Le courant d'obscurité
- Le temps de réponse.

II.6.2 Photodiode avalanche

On appelle photodiodes à avalanche (APD) des jonctions P-N à polarisation opposée exploitant le phénomène d'ionisation par impact afin d'obtenir un gain de signal intrinsèque. Le phénomène d'ionisation par impact se produit quand un porteur minoritaire acquiert suffisamment d'énergie cinétique pour irradier la structure cristalline du matériau et créer des paires électron-trou secondaires. De cette manière, un photo-porteur unique crée une série de porteurs, comme une avalanche (voir la figure II.12).

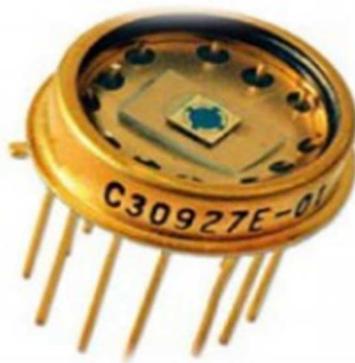


Figure II.12. Photodiode APD.

Le principe de la photodiode à avalanche est appliqué dans les zones à faible intensité lumineuse. Cette technologie présente des niveaux de gain très élevés, mais aussi des niveaux de bruit importants. À la différence de la photodiode PIN, cette dernière est un dispositif à gain

élevé, autrement dit, le nombre de paires électron-trou collectées est supérieur au nombre de photon abordés. Le gain d'une photodiode à avalanche est compris entre 50 et 200 [24].

II.7 Paramètres de récepteurs optiques

Un récepteur optique se caractérise principalement par les paramètres suivants [3] :

- **Surface de réception** : c'est la surface totale de la fenêtre de réception. Son unité est le mètre carré.
- **Sensibilité** : c'est le niveau optique minimum pour une qualité de transmission de données déterminée son unité est le dBm et la mesure doit être faite près de la fenêtre de réception optique en espace libre.
- **Sensibilité à saturation** : représente le niveau optique maximal pour une qualité de transmission de données spécifique, avec ou sans réglage automatique de l'atténuation. La plage dynamique est la différence entre la sensibilité de saturation et la sensibilité.
- **Champs de vision** : correspond à l'angle entre l'axe central et la direction à -3dB. Cette valeur est exprimable en demi-angle ou en angle total, mais elle doit être spécifiée. L'unité de mesure utilisée est le milliradian (mrad).

II.8 Conclusion

Le présent chapitre a porté sur l'exposition et la description des différents composants optoélectroniques pouvant être employés dans les systèmes FSO. Le chapitre prochain se consacrera aux résultats et aux interprétations de la simulation d'un système proposé.

CHAPITRE III

Simulations et analyses des résultats

III.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, nous présenterons une technique de transmission d'ondes millimétriques par fibre optique/communication optique sans fil pour les réseaux 5G. Nous analysons le système proposé en termes de taux d'erreur binaire (BER), de facteur de qualité Q et de diagramme de l'œil à l'aide du logiciel OptiSystem en fonction de la variation de l'atténuation, de la portée et de la fréquence. Dans un premier temps, nous allons introduire le logiciel OptiSystem ainsi que les critères utilisés pour évaluer les performances du système proposé. Ensuite, nous aborderons l'étude réalisée dans le cadre de notre analyse.

III.2 Présentation du logiciel OptiSystem

OptiSystem est une solution logicielle de pointe spécialement conçue pour la conception et la simulation de systèmes de communication optique. Il offre un environnement avancé et convivial pour modéliser, analyser et optimiser les performances des réseaux optiques et des liaisons fibre optique. Avec OptiSystem, les ingénieurs en télécommunications optiques, les chercheurs et les étudiants peuvent créer des modèles précis et détaillés de systèmes optiques complexes en utilisant une bibliothèque complète de composants optiques prédéfinis. Le logiciel permet également d'ajouter des composants personnalisés, offrant ainsi une flexibilité maximale dans la conception du système. Grâce à ses fonctionnalités puissantes, OptiSystem permet de simuler divers paramètres de transmission tels que l'atténuation, la dispersion et le bruit. Il permet également d'évaluer les performances en termes de qualité du signal, de débit de données, de sensibilité aux perturbations. Il s'agit d'une application Windows, composée essentiellement d'une fenêtre principale subdivisée en différentes sections distinctes (voir la figure III.1) :

- **Bibliothèque** : c'est une base de données qui regroupe une variété de composants préexistants.
- **Éditeur de layout** : pour éditer et configurer la mise en page courante.
- **Projet en cours** : il permet de visualiser les fichiers et les composants associés au projet en cours.

Pendant la conception, il est possible de faire simplement glisser un composant de la bibliothèque vers la disposition.

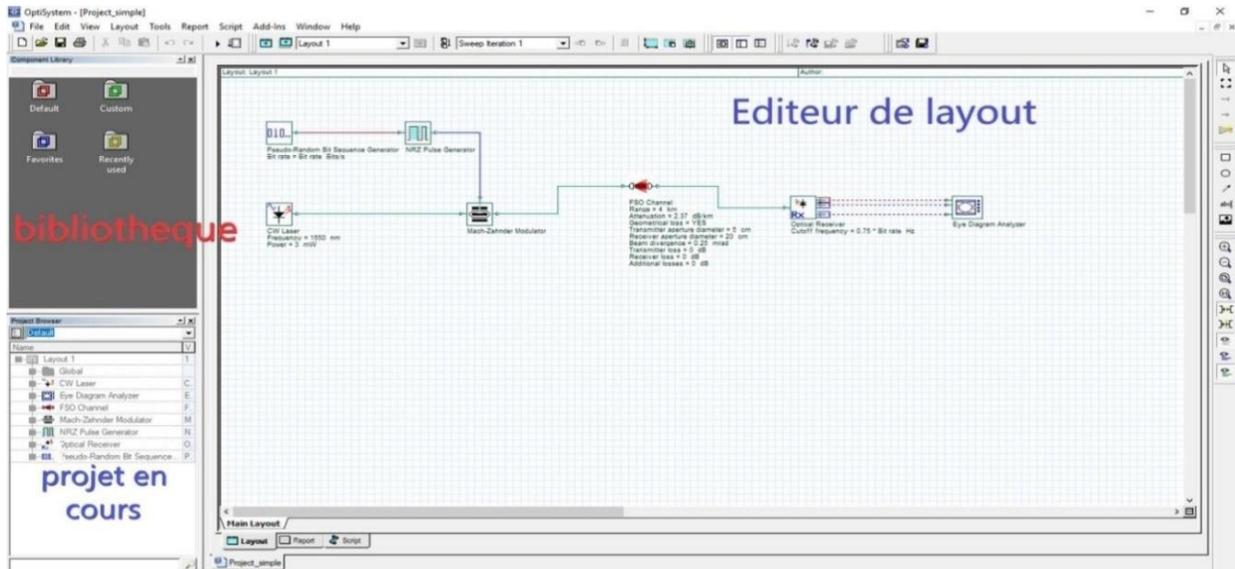


Figure III.1. Interface graphique d'OptiSystem.

Voici quelques-uns des avantages offerts par le logiciel OptiSystem

- **Modélisation réaliste** : permet de créer des modèles précis et réaliste des systèmes de communication optique ;
- **Vaste bibliothèque de composants** : dispose d'une large gamme de composants optiques prédéfinis ;
- **Flexibilité** : permet d'ajouter des composants personnalisés ;
- **Environnement de simulation puissant** : offre un environnement de simulation avancé, avec des fonctionnalités puissantes pour analyser les performances du système ;
- **Réduction des coûts** : permet de réduire les coûts associés aux essais matériels, tout en accélérant le processus de conception et d'optimisation.

III.3 Critères d'évaluation des performances

Le logiciel OptiSystem offre trois facteurs permettant d'évaluer les performances de notre système sur un canal FSO : le taux d'erreur sur les bits (BER), le facteur de qualité Q et le diagramme de l'œil.

III.3.1 Taux d'erreur binaire

En comparant la séquence de symboles transmis à celle reçue, il est possible de détecter les erreurs (lorsqu'un "0" est détecté à la place d'un "1" ou vice versa). En divisant le nombre d'erreurs par le nombre total de bits transmis, on obtient un rapport qui représente le taux

d'erreur [25].

$$\text{BER} = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits de transmis}} \quad (3.1)$$

En général, un système de transmission optique est considéré comme exempt d'erreurs si le taux d'erreur binaire (BER) est inférieur à une valeur donnée, telle que $1e-9$, $1e-12$ ou $1e-15$, en fonction des systèmes examinés. Dans le cas présent, le BER choisi est de $1e-9$.

III.3.2 Facteur de qualité Q

Lors de l'analyse du diagramme de l'œil, il est observé que le signal mesuré à l'entrée du canal comprend à la fois une composante liée au signal utile et une composante de bruit provenant de tous les éléments de la chaîne de transmission [26]. Sur le diagramme de l'œil, qui représente graphiquement le signal mesuré, les niveaux moyens I_1 et I_2 correspondent au signal utile. La quantification du "bruit", représentant les variations de puissance optique autour de ces niveaux moyens, est réalisée en combinant les écarts-types σ_1 et σ_2 . Le facteur Q est ainsi défini à partir du diagramme de l'œil (voir la figure III.2) par :

$$Q = \frac{I_0 - I_1}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (3.2)$$

La valeur de Q est généralement exprimée en dB, à l'aide de la formule suivante :

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

Le rapport entre le BER et le facteur de qualité Q est donné par :

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.4)$$

Où

$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$ est la fonction d'erreur complémentaire. Etant donné que la fonction erfc est décroissante, le taux d'erreur binaire (BER) diminue avec une augmentation du facteur Q. Ainsi, le facteur Q représente un moyen mathématique simple et précis de quantifier les performances d'un système.[27].

III.4 Diagramme d'œil

La qualité d'un signal optique transmis à travers un canal optique peut être évaluée en examinant son diagramme de l'œil après la réception des données détectées. Ce diagramme est formé par la superposition synchrone de chaque symbole binaire dans la séquence transmise [26]. Lorsque la qualité du signal optique détecté est faible, le diagramme de l'œil est fermé,

indiquant une mauvaise qualité. En revanche, si la détection du signal est sans erreur, cela signifie que la qualité du signal optique reçu est excellente, et le diagramme de l'œil est ouvert. En conclusion, le diagramme de l'œil offre une estimation visuelle très efficace de la qualité du signal optique reçu par le récepteur optique. L'utilisation d'un analyseur de diagramme de l'œil permet d'évaluer les systèmes de communication optique.

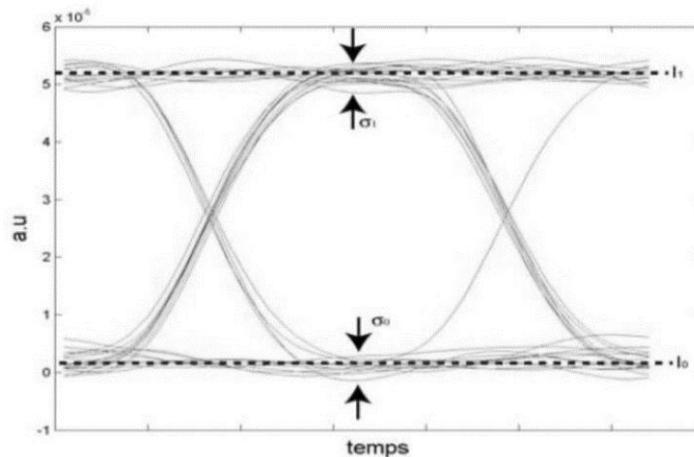


Figure III.2. Diagramme de l'œil.

III.5 Systèmes de communication fibre optique/FSO pour les réseaux 5G

Cette section a pour objectif d'étudier la génération et la transmission d'ondes millimétriques dans un système de communication fibre optique/FSO pour les réseaux 5G. La solution proposée (voir la figure III.3) consiste en une source laser à onde continue (CW) fonctionnant avec une longueur d'onde de 1550nm, une puissance d'émission de 30 dBm et une largeur de ligne de 1 MHz. Les signaux de données binaires de la liaison descendante sont représentés par des séquences de bits pseudo-aléatoires (PRBS) de 1 Gbps, elles sont codées en format électrique par un générateur d'impulsions électriques Non-Return-to-Zero (NRZ). Les séquences de bits sont conçues pour se rapprocher des caractéristiques aléatoires. Le modulateur AM a une fréquence définie et est dérivé électriquement par les signaux de données binaires transmis et la sortie de ce modulateur est employée pour piloter le modulateur optique externe de type Mach-Zehnder. Les signaux de données binaires sont ainsi modulés par une onde millimétrique pratique. À la sortie du modulateur Mach-Zehnder, le signal optique est lancé et propagé à travers une fibre monomode standard de 1 km, qui a une dispersion de 16,75 (ps/nm.km) et une atténuation de 0,2 dB/km, puis est amplifié par un amplificateur EDFA avec un gain de 10 dBm et un facteur de bruit choisi à 5 dB. Ensuite, la voie FSO est établie avec les paramètres résumés dans le tableau III.1.

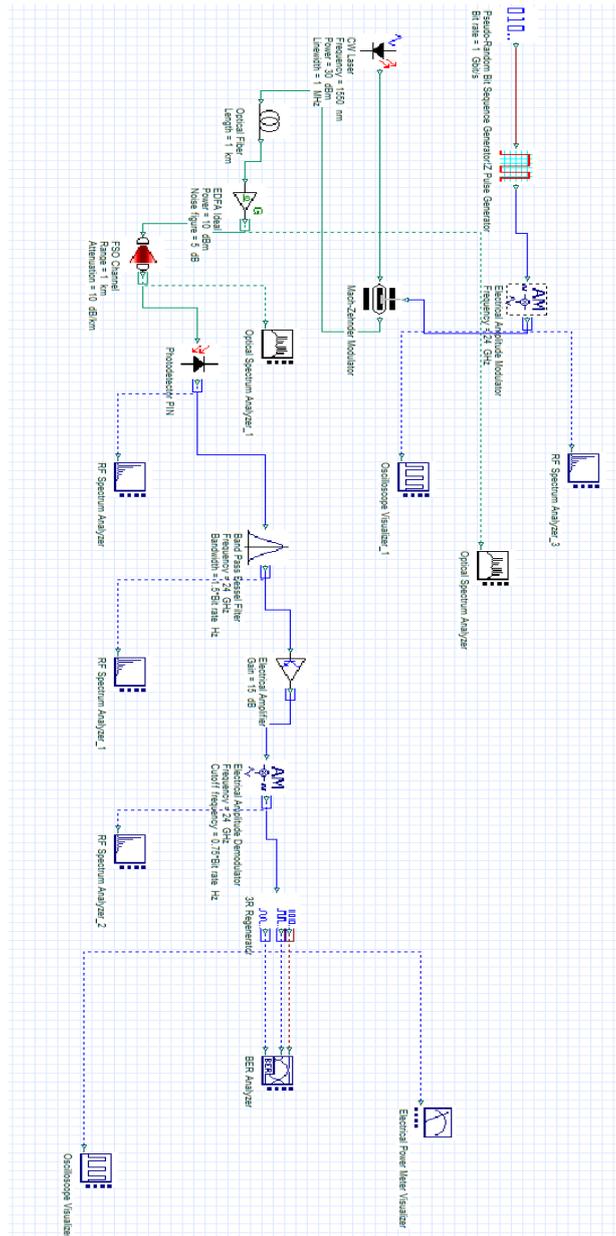


Figure III.3. Configuration du système proposé.

La réception du système proposé convertit les données optiques en forme électrique. Pour réaliser cette opération, il faut utiliser un détecteur de sensibilité. Après cela, il existe un filtre passe-bande de Bessel avec une fréquence de coupure de 1,5 fois la fréquence du rythme qui est utilisé pour faire passer la fréquence de l'onde millimétrique seulement désirée. Ensuite, un amplificateur électrique est mis en place afin d'amplifier le signal radio électrique avec un gain de 15 dB. Par la suite, un démodulateur est mis en œuvre pour récupérer le signal électrique des données transmises et, à la fin, le générateur 3R est activé ; il régénère un signal électrique. Il produit la séquence de bits d'origine et un signal électrique modulé à utiliser pour l'analyse du

BER. Il s'agit donc d'un sous-système reposant sur le composant de récupération des données et sur un générateur d'impulsions NRZ.

Paramètres	Description
Distance de la liaison FSO	Variable
Atténuation	Variable
Diamètre d'ouverture de l'émetteur	5 cm
Diamètre d'ouverture du récepteur	25 cm
Angle de divergence	0.25 mrad
Perte de l'émetteur	2 dB
Perte du récepteur	2 dB

Tableau III.1. Paramètres du canal FSO.

III.6 Résultats de simulation et interprétations

Dans cette section, nous exposons les résultats de la simulation du système que nous avons étudié et conçu. Nous analysons trois axes dans cette partie, à savoir :

- Effet de la variation de l'atténuation du canal FSO.
- Effet de la variation de la portée du canal FSO.
- Effet de la variation de la fréquence au niveau de l'émetteur.

Nous avons étudié les effets de la variation de l'atténuation, de la portée et du système proposé en termes de BER, de facteur de qualité Q et de puissance reçue. Trois fréquences ont été sélectionnées pour l'observation de ce système : 24 GHz, 28 GHz et 32 GHz.

III.6.1 Effet de la variation de l'atténuation du canal FSO

Les figures III.4, III.5, III.6 illustrent respectivement le BER, le facteur de Q et la puissance reçue en fonction de l'atténuation. Les valeurs d'atténuation varient de 2 dB/km à 20 dB/km et nous avons considéré que le canal transmettait 1 Gbps de données sur la liaison descendante avec une distance de 1 km (fibre ou FSO) pour les trois fréquences 24 GHz, 28 GHz et 32 GHz.

Tout d'abord, il convient d'examiner le BER en fonction de l'atténuation. A titre d'exemple, pour les fréquences 24 GHz, 28 GHz et 32 GHz, avec une atténuation de 12 dB/km, nous obtenons respectivement les valeurs de BER suivantes : $3,73e-219$, $1,9e-249$ et $7,34e-274$. Par ailleurs, pour une atténuation de 14 dB/km, nous obtenons respectivement les valeurs de BER suivantes : $4,31e-102$, $5,98e-109$ et $4,76e-123$. Nous constatons qu'en augmentant la valeur de l'atténuation, nous obtenons une forte augmentation du taux de BER. A partir des résultats, nous observons que la fréquence de 32 GHz offre la meilleure performance en termes de BER.

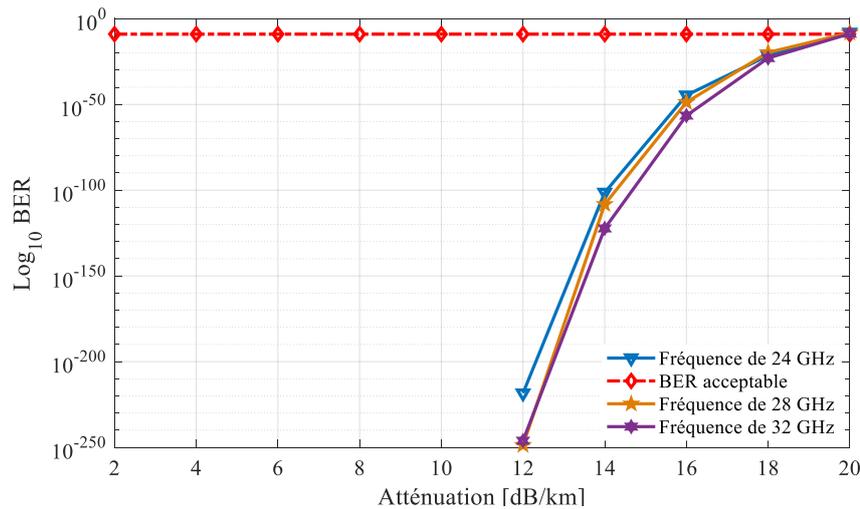


Figure III.4. BER vs. Atténuation [dB/km].

Ensuite, il faut déterminer le facteur de qualité en fonction de l'atténuation. À titre d'exemple, pour les fréquences 24 GHz, 28 GHz, et 32 GHz, avec un affaiblissement de 12 dB/km, nous obtenons respectivement les valeurs Q suivantes : 31,573, 33,707 et 33,530. Dans le cas d'un affaiblissement de 14 dB/km, nous obtenons respectivement les valeurs de Q suivantes : 21,411, 22,140 et 23,555. Tout comme pour le BER, c'est la fréquence de 32 GHz qui offre les meilleures performances. Nous constatons également que plus nous augmentons l'atténuation, plus nous avons une forte diminution du facteur Q.

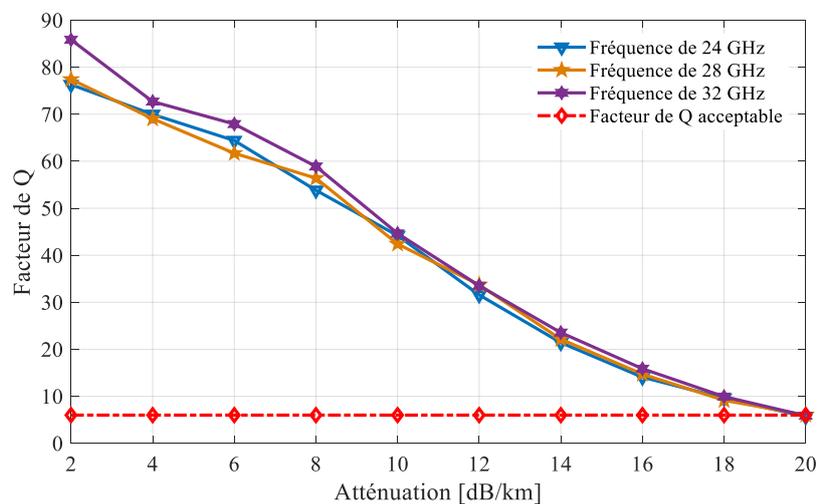


Figure III.5. Facteur de Q vs. Atténuation [dB/km].

Enfin, nous avons analysé la puissance reçue en fonction de l'atténuation. En ce qui concerne les fréquences 24 GHz, 28 GHz et 32 GHz, avec une atténuation de 12 dB/km, nous obtenons respectivement les valeurs suivantes de la puissance reçue : -43,29, -43,36 et 43,52 dBm. En revanche, pour un affaiblissement de 14 dB/km, nous obtenons respectivement les valeurs

suivantes de la puissance reçue : -47,65, -47,17 et -46,90 dBm. Nous notons ici qu'il n'y a pas de grande différence de puissance pour ces trois fréquences. La seule remarque que nous pouvons tirer est qu'il y a une diminution de la puissance reçue due à l'augmentation de l'atténuation.

Les atténuations maximales permettant d'obtenir un taux d'erreur acceptable pour les fréquences de 24, 28 et 32 GHz sont respectivement de 19,85, 19,87 et 19,96 dB/km. Ceci signifie que nous pouvons avoir une bonne performance dans des environnements extrêmement pluvieux. La figure III.7 représente le diagramme de l'œil pour chaque fréquence avec leur atténuation maximale.

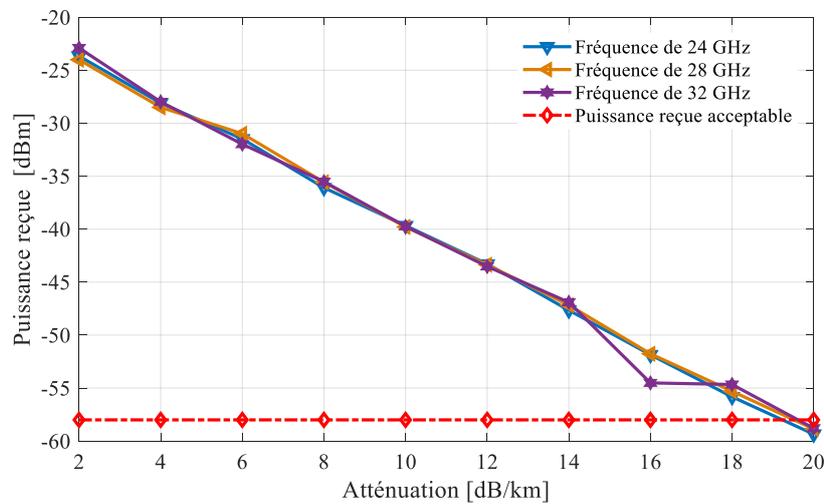


Figure III.6. Puissance reçue [dBm] vs. Atténuation [dB/km].

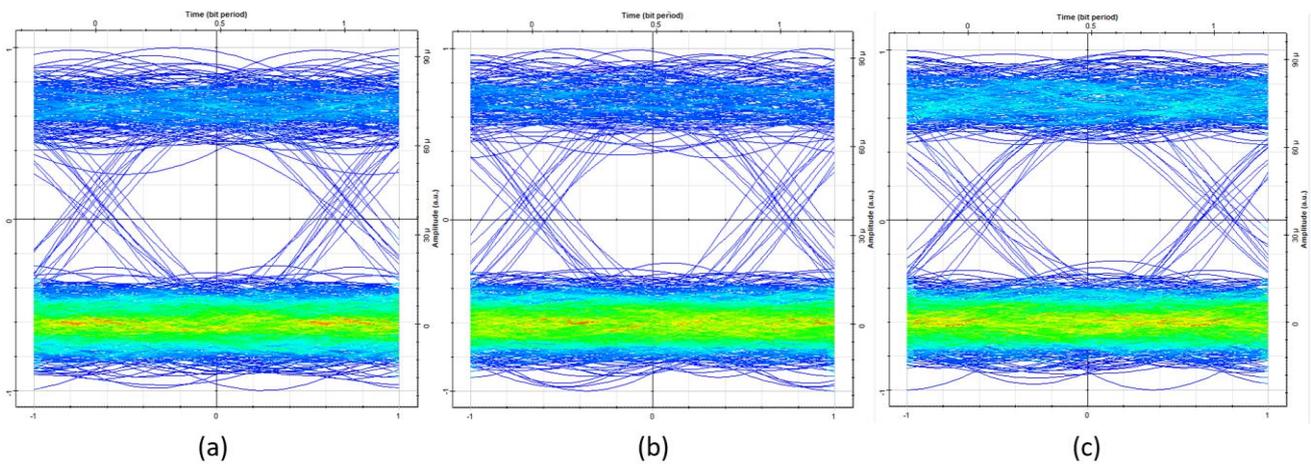


Figure III.7. Diagrammes d'œil vs. Atténuation du canal FSO : (a) 24 GHz @ 19.85 dB/km, (b) 28 GHz @ 19.87 dB/km et (c) 32 GHz @ 19.96 dB/km.

III.6.2 Effet de la variation de la portée du canal FSO

Cette partie consiste essentiellement dans le choix d'une portée de 200 m à 2 km avec un pas de 200 m pour trois fréquences différentes à savoir 24 GHz, 28 GHz et 32 GHz avec une distance de fibre optique de 2 km, une atténuation de 10 dB/Km pour le canal FSO et un débit de 1 Gbps. Les figures III.8, III.9 et III.10 illustrent les résultats obtenus lors de la simulation.

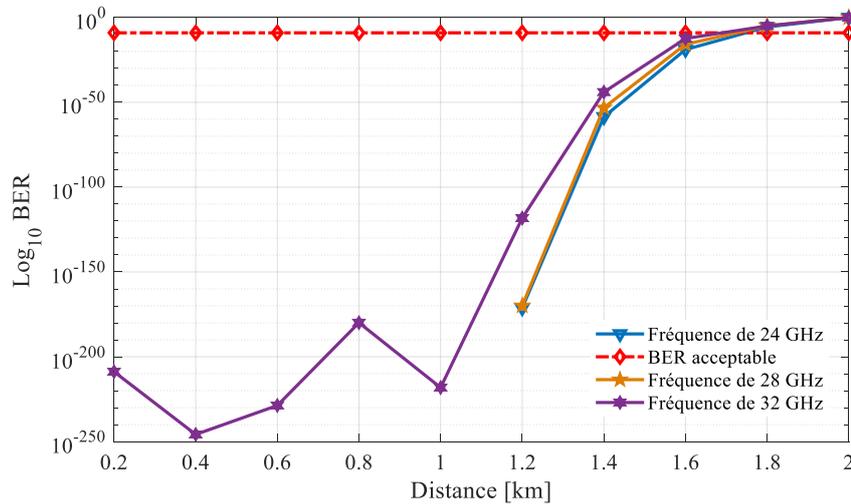


Figure III.8. BER vs. Distance [km].

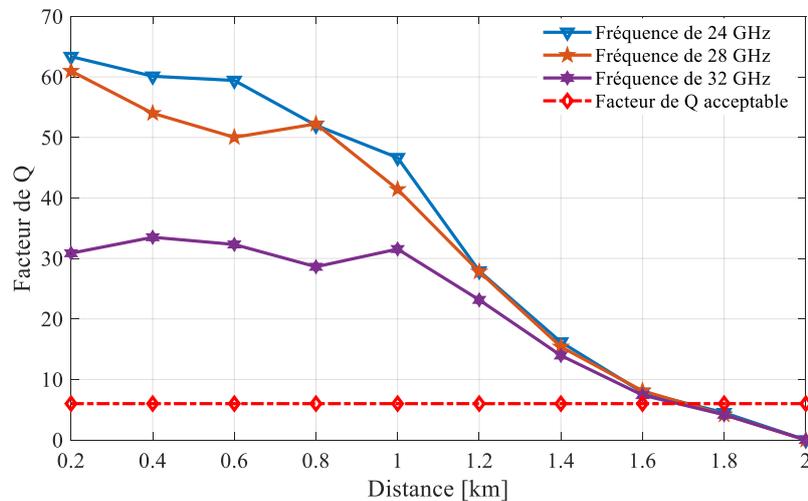


Figure III.9. Facteur de Q vs. Distance [km].

D'après les illustrations des résultats obtenus lors de la simulation dans les figures III.8, III.9 et III.10. Nous avons observé une corrélation entre l'augmentation de la portée et l'augmentation du taux d'erreur sur les bits (BER), ainsi qu'une diminution du facteur de qualité Q et de la puissance reçue pour chaque fréquence. De même que la portée, la fréquence a également un impact sur la qualité de notre système. Nous pouvons donc en déduire qu'une

fréquence de 24 GHz et une distance de 1,74 km garantissent une meilleure qualité du système. La figure III.11 illustre le diagramme de l'œil pour chaque fréquence à leur portée maximale.

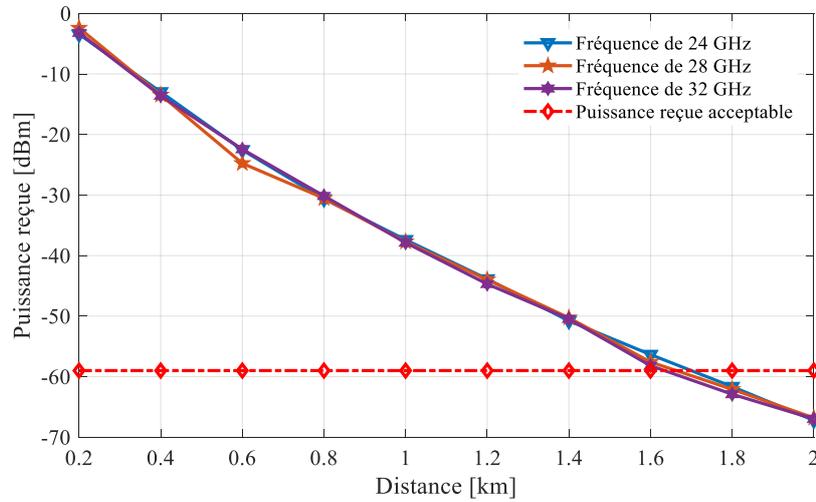


Figure III.10. Puissance reçue [dBm] vs. Distance [km].

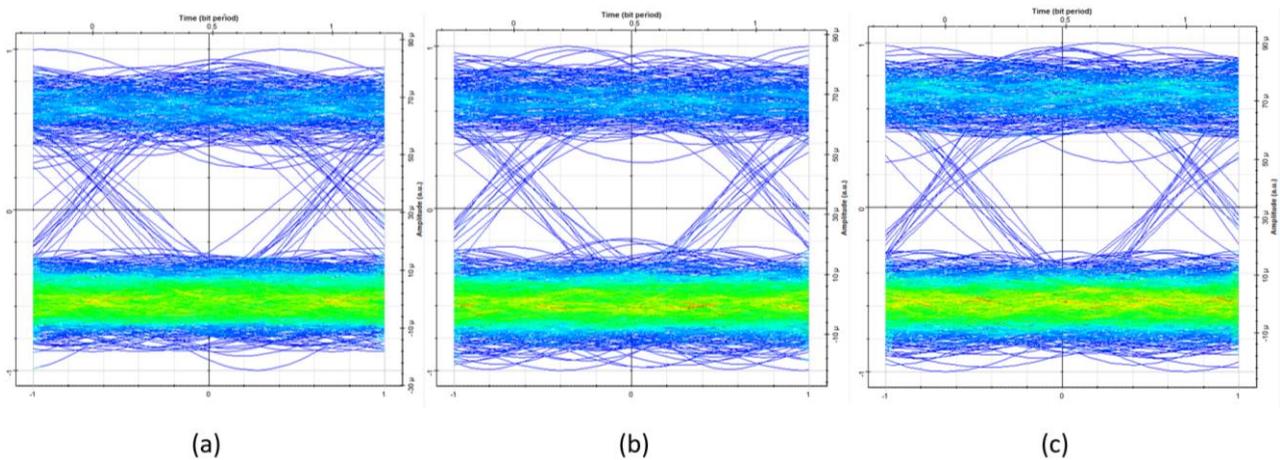


Figure III.11. Diagrammes d'œil vs. Portée du canal FSO : (a) 24 GHz @ 1.72 km, (b) 28 GHz @ 1.72 km et (c) 32 GHz @ 1.69 km.

III.6.3 Effet de la variation de la fréquence au niveau de l'émetteur

Dans cette phase de la simulation, nous avons examiné l'effet de la variation de la fréquence. Nous avons considéré trois cas : pour une atténuation de 3 dB/km (pluie légère), 9 dB/km (pluie moyenne) et 20 dB/km (pluie extrême). Sur la figure III.12, nous observons la variation de BER pour différentes valeurs de fréquence. Nous constatons que le meilleur BER obtenu pour le cas des atténuations de 3 dB/km et 9 dB/km sont à la fréquence de 31 GHz avec des valeurs respectives de $1,14e-276$ et $1,04e-230$ et dans le cas de l'atténuation de 20 dB/km, une bonne performance BER est obtenue à la fréquence de 32 GHz pour une valeur de BER égale à $1,25e-$

21. Dans la figure III.13, nous illustrons les diagrammes en œil pour des atténuations de 3 dB/km, 9 dB/km et 20 dB/km à leur meilleure performance en termes de BER.

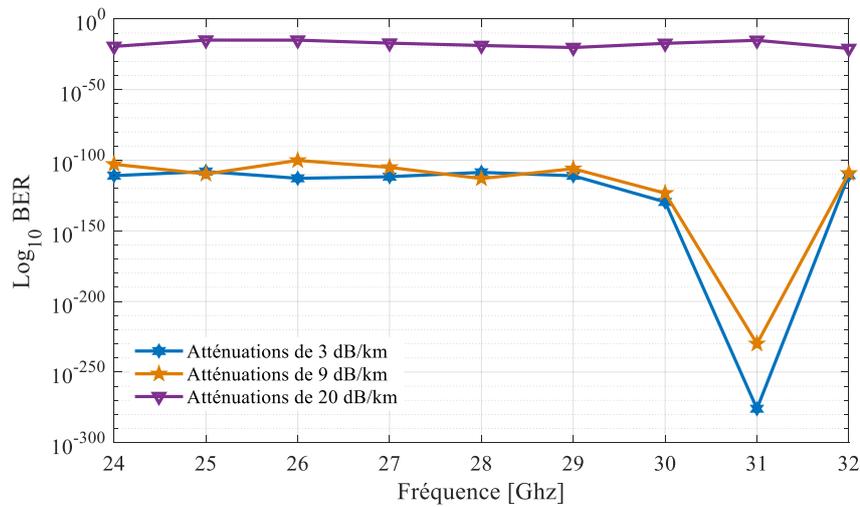


Figure III.12. BER vs. Fréquence [GHz].

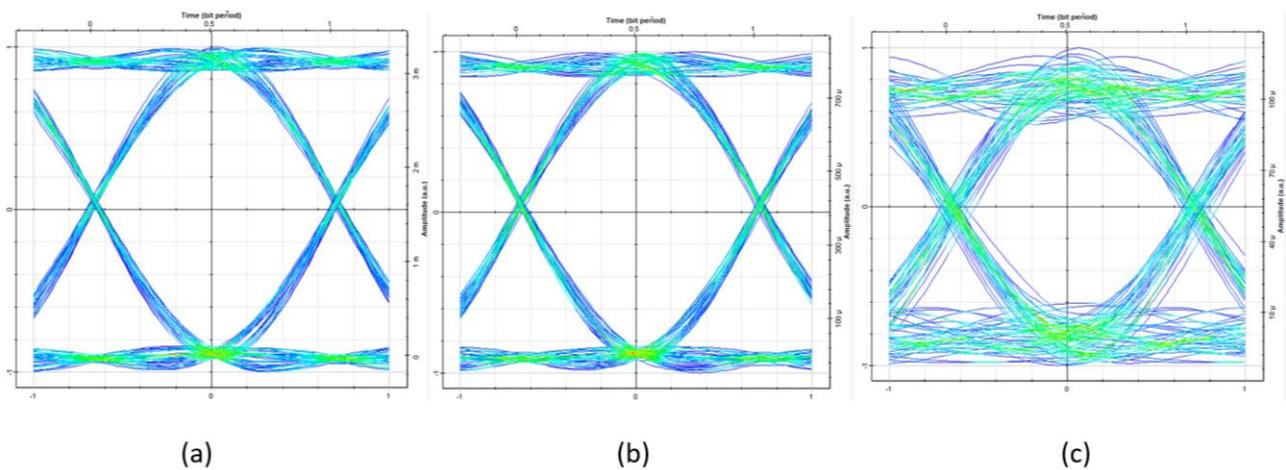


Figure III.13. Diagrammes d'œil vs. Atténuation du canal FSO pour 31 GHz : (a) 3 dB/km, (b) 9 dB/km et (c) 20 dB/km.

Dans la figure III.14, le facteur de qualité Q est exprimé en fonction de la fréquence pour les trois différentes atténuations. Nous constatons également que le meilleur facteur Q est obtenu avec la fréquence de 31 GHz pour les atténuations de 3 dB/km et 9 dB/km avec les valeurs respectives de 35,518 et 32,406 et dans le cas de l'atténuation de 20 dB/km avec la fréquence de 32 GHz correspondant à une valeur de 9,481. En ce qui concerne la variation de la puissance reçue en fonction de la fréquence (voir la figure III.15), les meilleurs résultats sont tous obtenus pour les trois atténuations à la fréquence de 32 GHz.

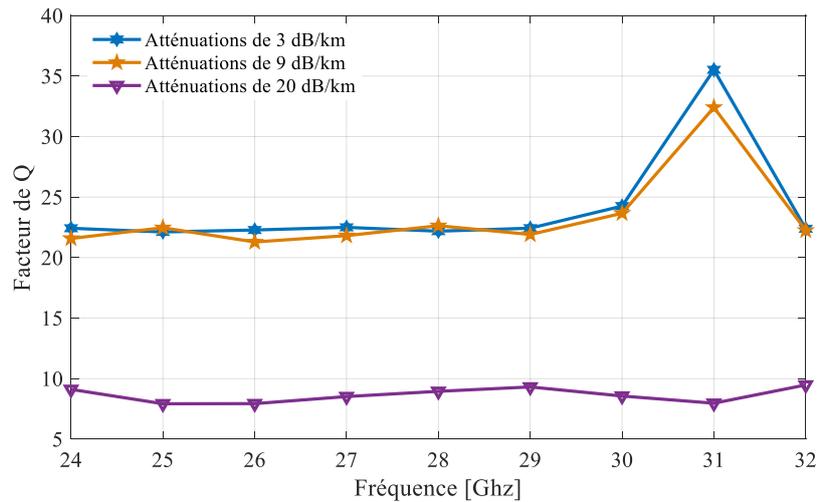


Figure III.14. Facteur de Q vs. Fréquence [GHz].

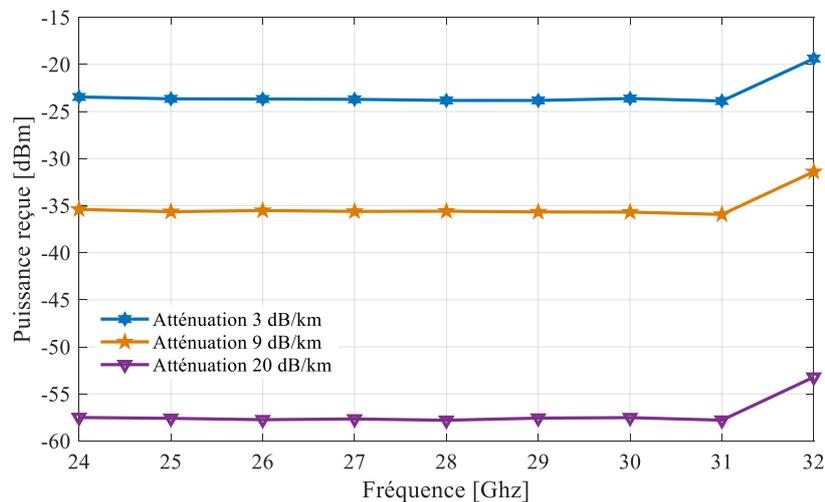


Figure III.15. Puissance reçue [dBm] vs. Fréquence [GHz].

III.7 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons examiné les limitations de la liaison Fibre/FSO concernant la portée, l'atténuation et la fréquence d'émission. L'évaluation des performances d'une liaison FSO est basée sur des critères essentiels tels que le taux d'erreur binaire, le facteur de qualité Q, et la puissance reçue, comme le démontre cette étude. En surveillant ces paramètres, nous pouvons maintenir un suivi constant de la qualité de la liaison et détecter toute détérioration qui pourrait impacter ses performances.

Conclusion générale

Ce projet visant à concevoir et simuler un système de communication basé sur les technologies de transmission par ondes millimétriques sur une liaison fibre optique/communication optique sans fil à l'aide du logiciel Optisystem a permis de mettre en évidence les performances et les limites de la technologie FSO pour la transmission de données. Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact significatif des paramètres de transmission tels que l'atténuation, la portée et la fréquence sur la qualité de la transmission.

La portée de transmission est un paramètre crucial dans le choix des performances du système FSO. Il est observé que l'augmentation de la portée entraîne une dégradation de la qualité du signal et, par conséquent, une augmentation du taux d'erreur binaire (BER). D'un autre côté, une portée trop courte peut limiter la capacité de transmission des données. Par conséquent, le choix de la portée optimale dépendra de l'application spécifique. Les résultats montrent que la portée optimale pour le système FSO est d'environ 1,74 km pour une fréquence de 24 GHz.

En ce qui concerne la fréquence de transmission, les résultats indiquent que la fréquence optimale dépend de l'atténuation due aux conditions météorologiques. Pour une atténuation faible ou moyenne, la fréquence optimale est de 31 GHz, tandis que pour une atténuation élevée, la fréquence optimale est de 32 GHz. En général, une fréquence plus élevée peut offrir une plus grande largeur de bande, mais elle est également plus sensible à l'atténuation due aux conditions météorologiques.

Il est important de noter que la simulation a été effectuée en utilisant un taux de transmission de données de 1 Gbit/s. Toutefois, il est crucial de comprendre que toute augmentation du taux de transmission pourrait potentiellement avoir un impact sur les performances globales du système.

Enfin, l'atténuation du canal FSO joue un rôle essentiel dans les performances de la technologie FSO. Nous avons observé une diminution du facteur Q et de la puissance, ainsi qu'une augmentation du BER au fur et à mesure que l'atténuation augmentait. Cependant, nous avons également identifié des fréquences optimales pour chaque niveau d'atténuation, ce qui nous permet d'optimiser les performances du système en fonction de l'environnement atmosphérique.

Finalement, ce mémoire prouve que la technologie FSO offre des performances élevées pour la transmission de données sans fil à courte distance.

Références Bibliographiques

- [1] Mohammed O. Zaatari, " Wireless Optical Communications Systems in Enterprise Networks ". The TelecommunicationsReview, 2003.
- [2] M. Al Naboulsi, " Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques : propagation, disponibilité et fiabilité", Thèse de l'université de Bourgogne, France, 2005
- [3] Rapport UIT-R F.2106, " Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre "
- [4] Vincent Foucal, "Conception d'interconnexions optiques haut débit courte distance en espace libre. Prototypage de modules de communication pour applications embarquées". FOUCAL_Vincent_2010.
- [5] Site officiel du constructeur MRV (www.mrv.com).
- [6] Site officiel de l'autorité de régulation de la poste et des télécommunications (www.arpt.dz)
- [7] F. Ben Ahmed, B. Kanoun. 'Analyse des performances d'une communication optique en espace libre', Thèse de doctorat école supérieure des communications de Tunis, 2015.
- [8] Shah, D., & Kothari, D. K. (2014), " Optimization of 2.5 Gbps WDM-FSO link range under different rain conditions in Ahmedabad ", In 2014 Annual IEEE India Conference (INDICON)
- [9] O. RINGAR, " Utilisation des techniques avancées d'Emission/Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande ", Thèse de l'université de LIMOGES, France, 2015.
- [10] A. K. Majumdar et J. C. Ricklin, " Free-Space Laser Communications: Principles and Advances ". New York: Springer, 2008.
- [11] Md. D. A and al., " Comparative Study of Path Loss Models of WiMAX at 2.5 GHz Frequency Band ", International Journal of Future Generation Communication and Networking Vol. 6, No. 2, Apr. 2013.
- [12] H. Henniger, O.Wilfert, " An Introduction to Free-space Optical Communications ", Radioengineering, Vol. 19, no. 2, Jun., 2010.
- [13] B. R. Mahafza " Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB ", Chapmanand Hal ICRC, 2000.

- [14] T. Lambard, " Contribution à l'étude et la conception d'une antenne réseau à balayage électronique pour liaisons de données haut-débit entre un drone et un satellite en bande Ka", Thèse de l'université de Toulouse, France, 2010.
- [15] M. Rouissat. Etude et Modélisation d'une Liaison Optique Sans Fil. Algérie : université de Tlemcen, 2013, pp.159.
- [16] H. Brahimi, " Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence ", Thèse de l'université Paul Sabatier-Toulouse III, France, 2010.
- [17] H. Willebrand et B. S. Ghuman, "Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in today's network. Indianapolis", SAMS publishing, 2002.
- [18] Sabi S. et Vijayakumar N, " Simulation of a Modem using Digital Pulse Interval Modulation for Wireless Optical Links ", 10th National Conference on Technological Trends (NCTT09) 67 Nov 2009.
- [19] https://www.researchgate.net/figure/Schema-dun-amplificateur-optique-a-fibre-dopee-a-lErbium_fig19_305181019 [accessed 7 Mar, 2023]
- [20] https://www.researchgate.net/figure/Amplificateurs-optique-a-effet-Raman_fig22_305181019 [accessed 7 Mar, 2023]
- [21] X. Zhu et J. Kahn, " Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels " IEEE Trans. on Communications, no. 2, pp. 1293–1300, 2003.
- [22] E. Rosencher et B. Vinter, Optoélectronique (Masson, 1998)
- [23] https://www.researchgate.net/figure/Coupe-transversale-dune-diode-PIN_fig12_305181019 [accessed 7 Mar, 2023]
- [24] D. Renker, "Properties of avalanche photodiodes for applications in high energy physics, astrophysics and medical imaging," Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment), vol. 486, pp. 164-9, 2002.
- [25] MECHIN. D; 2001, " Étude et réalisation de multiplexeurs insertion-extraction à réseaux de Bragg ", Optique, Optoélectronique, Microondes. Thèse de doctorat de l'Université Jean Monnet de Saint- Etienne.
- [26] MERZOUK. K; 2008, " Étude d'un système bas cout de transmission optique par Multiplexage temporel ", Thèse de doctorat Optique, Optoélectronique et Microondes. Institut Polytechnique de Grenoble.

- [27] Karim Ayari, " Implémentation d'un outil de calcul des imperfections de transmission pour les réseaux WDM tout optique ", PFE, Ecole Supérieur des Communications de Tunis, 2005.

Résumé

À partir de 2020, les réseaux de communication de cinquième génération (5G) étaient prévus pour être déployés dans le monde entier. Cependant, en raison de la pandémie de coronavirus, leur mise en place a été partiellement restreinte aux réseaux de sixième génération (6G). Cette initiative est motivée par l'avantage d'appliquer des porteuses à haute fréquence aux ondes millimétriques (ondes mm), ce qui permettra d'augmenter considérablement la capacité des réseaux sans fil. Le présent travail propose un système de communication basé sur des technologies de transmission hybrides à ondes millimétriques sur une liaison Backhaul à fibre optique/communication optique sans fil. Les performances de mesure de la qualité de transmission sont jugées par, le BER, le facteur Q, la puissance du signal optique reçu et avec la représentation d'un digramme de l'œil. Enfin, la simulation de la liaison a été réalisée à l'aide du logiciel OptiSystem.

Mots clés : Fibre optique, Communication optique sans fil, 5G, Ondes millimétriques.

Abstract

Starting in 2020, fifth-generation (5G) communications networks were scheduled for deployment worldwide. However, as a result of the coronavirus pandemic, the deployment of these networks has been partially restricted to sixth-generation (6G) networks. The motivation behind this initiative is to apply high-frequency carriers to millimeter waves (mm waves), which will significantly boost the capacity of wireless networks. In the present work, we propose a communication system based on hybrid millimeter-wave transmission technologies using a fiber-optic backhaul/optical wireless link. The performances of transmission quality measurement are judged by, BER, Q-factor, received optical signal power and with the representation of an eye diagram. Finally, the link is simulated using OptiSystem software.

Keywords: Fiber optics, Optical wireless communication, 5G, Millimeter waves.

الملخص

بدءًا من عام 2020، كان من المقرر نشر شبكات اتصالات الجيل الخامس (5G) في جميع أنحاء العالم. ومع ذلك، نتيجة لوباء فيروس كورونا، اقتصر انتشار هذه الشبكات جزئيًا على شبكات الجيل السادس (6G). الدافع وراء هذه المبادرة هو تطبيق الموجات عالية التردد على موجات المليمتر (موجات مم)، مما سيعزز بشكل كبير من قدرة الشبكات اللاسلكية. في العمل المقدم، نقتراح نظام اتصال يعتمد على تقنيات نقل الموجات الهجينة المليمترية باستخدام وصلة الألياف الضوئية / الارتباط اللاسلكي البصري. يتم الحكم على أداء قياس جودة الإرسال من خلال BER، عامل Q، طاقة الإشارة الضوئية المستقبلية وتمثيل مخطط العين. أخيرًا، تمت محاكاة الارتباط باستخدام برنامج OptiSystem.

الكلمات الرئيسية: الألياف البصرية، الاتصالات اللاسلكية الضوئية، الجيل الخامس، موجات المليمتر.