

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** : Systèmes de Télécommunications

**Par** : DAHMANI Meryem et DEMIM Kawtar

### **Sujet**

**Analyse de performances de différents formats de modulation numérique pour un système de communication optique en espace libre**

Soutenu publiquement, le **19 /06/ 2018** , devant le jury composé de :

Mr O.SEDDIKI	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr S.KAMECHE	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr H.E.ADARDOUR	Docteur	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
Mr S.H.IRID	Maître de Conférences	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** : Systèmes de Télécommunications

**Par** : DAHMANI Meryem et DEMIM Kawtar

### **Sujet**

**Analyse de performances de différents formats de modulation numérique pour un système de communication optique en espace libre**

Soutenu publiquement, le **19 /06/ 2018** , devant le jury composé de :

Mr O.SEDDIKI	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr S.KAMECHE	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr H.E.ADARDOUR	Docteur	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
Mr S.H.IRID	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Examineur

*A mes parents,*

*A toute la famille...*

# Remerciements

---

*Ce travail du Projet de Fin d'Etudes a été effectué au sein du laboratoire des Systèmes et Technologies de l'information et de la Communication (STIC) de la Faculté de Technologie à l'Université Abou-Bekr Belkaïd Tlemcen.*

*On voudrait tout d'abord remercier sincèrement notre Encadrant Monsieur Samir KAMECHE, Maître de Conférences classe A à l'Université de Tlemcen, non seulement pour son encadrement actif mais aussi pour sa grande disponibilité, sa patience, ainsi que pour la générosité avec laquelle il a su partager ses connaissances et conseils.*

*Au terme de ce projet, on tient à remercier Monsieur Haroun Errachid ADARDOUR, Docteur à l'Université de Tlemcen, pour la qualité de son Co-encadrement, son soutien et ses directives précieuses pendant toute la durée de ce travail.*

*Nos remerciements les plus respectueux s'adressent à Monsieur Omar SEDDIKI, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de présider le jury de ce Mémoire.*

*Nous exprimons également notre reconnaissance à Monsieur Sidi Mohammed Hadj, Maître de Conférences classe B à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner et de juger les travaux de ce Mémoire.*

*Enfin, que nos parents, nos familles et nos amis trouvent à travers ces quelques lignes l'expression de notre profonde gratitude pour leur soutien et leurs encouragements de tous les instants. On vous en remercie chaleureusement.*

## Résumé

Aujourd'hui, les chercheurs se concentrent sur l'utilisation des systèmes de communication optique en espace libre inter-bâtiments. Dans ce mémoire, l'analyse des performances de la liaison de communication FSO dans un environnement atmosphérique a été étudiée dans deux bandes C et L en utilisant différents formats de modulation : RZ, NRZ, GPG, HPG et RCPG. Les performances de la liaison FSO ont été étudiées en faisant varier la distance entre l'émetteur et le récepteur optiques, le débit de données, la puissance optique de Tx et la longueur d'onde de transmission.

En outre, l'analyse a été exécutée sous l'environnement OptiSystem, en utilisant le taux d'erreur binaire (BER) et facteur de qualité (Q) comme des métriques de performances.

**Mots clés** : FSO, performances de BER et facteur de Qualité, OptiSystem.

# Table des matières

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

1.1 Introduction.....	5
1.2 Technologie FSO.....	5
1.3 Fonctionnement .....	6
1.4 Topologies de FSO.....	7
1.5 Caractéristiques d'une liaison FSO .....	8
1.6 Applications de FSO .....	9
1.7 Avantages et Inconvénients de FSO .....	10
1.7.1 Avantages de FSO .....	10
1.7.2 Inconvénients de FSO .....	11
1.8 Comparaison entre FSO et fibre optique.....	11
1.9 Sécurité.....	12
1.10 Les paramètres d'une liaison FSO.....	12
1.10.1 Intensité rayonnante .....	12
1.10.2 Puissance optique reçue .....	13
1.10.3 La densité de puissance optique .....	14
1.10.4 Perte en espace libre (PEL).....	14
1.10.5 Marge d'une liaison optique atmosphérique .....	15
1.10.6 Bilan de liaison.....	16

1.10.7 Débit de transmission .....	16
1.10.8 Capacité du canal de transmission .....	17
1.11 Conclusion.....	17

## **Chapitre 2 : Composants Optoélectroniques pour un Système FSO**

2.1 Introduction.....	19
2.2 Composants optoélectronique.....	19
2.3 Emetteurs optoélectroniques .....	19
2.3.1 Les sources optiques .....	20
2.3.2 Modulateurs optiques.....	21
2.3.3 La modulation.....	22
2.3.4 Les amplificateurs optiques .....	26
2.4 Paramètres d'un émetteur optique .....	27
2.5 Canal Optique Atmosphérique (FSO) .....	27
2.6 Récepteurs optoélectroniques.....	28
2.6.1 Photodiodes PIN.....	28
2.6.2 Photodiodes à avalanche.....	29
2.7 Paramètres de récepteur optique .....	29
2.8 Conclusion.....	29

## **Chapitre 3 : Simulation d'une chaîne de transmission optique**

3.1 Introduction.....	31
3.2 Présentation du logiciel OptiSystem.....	31
3.3 Analyse d'une chaîne de transmission optique .....	35
3.3.1 Diagramme de l'œil.....	35
3.3.2 Taux d'erreur binaire « TEB où BER».....	36
3.3.3 Le Facteur de qualité « Q ».....	36
3.4 Performance d'une liaison FSO à haut débit .....	37

3.4.1 Impact du débit de données sur une liaison FSO simple à haut débit. ....	39
3.4.2 Impact de la puissance optique de Tx sur une liaison FSO simple à haut débit .....	44
3.4.3 Impact de la longueur d'onde et du débit de données sur une liaison hybride FSO- FO-FSO à haut débit.....	46
3.5 Conclusion.....	52
Conclusion Générale .....	54
Références Bibliographiques .....	56

# Sigles et abréviations

---

## A

APD	Avalanche Photodiode
ASK	Amplitude Shift Keying
AWGN	Additive White Gaussian Noise

## B

Bande C	Bande Conventionnel ou Central
Bande L	Bande Longue
Bande U	Bande Ultra longue
BER	Bit Error Rate

## C

CS-RZ	Carrier Suppressed Return to Zero
-------	-----------------------------------

## D

DD	Directe Detection
DEL	Diode Electroluminescent.
DL	Diode Laser

## E

EAM	Electro-Absorbant Modulator
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
E/O	Electrique/Optique

## F

FO	Fibre Optique
Facteur-Q	Facteur de Qualité

FSK	Frequency Shift Keying
FSO	Free Space Optical
FTTx	Fiber To The...
<b>G</b>	
GPG	Gaussian Pulse Generator
<b>H</b>	
HPG	Hyperbolio-secant Pulse Generator
<b>I</b>	
IM	Intensity Modulation
IR	Infra-Rouge
<b>L</b>	
LED	Light-Emitting Diode
LiFi	Light Fidelity
LOS	Line-Of-Sight
<b>M</b>	
MEA	Modulateur Electro-Absorbant
MZM	Modulateur Mach-Zehnder
<b>N</b>	
NRZ	Non Return to Zero
<b>O</b>	
OOK	On-Off Keying
OWC	Optical Wirless Communication

## **P**

PEL	Perte en Espace Libre
PIN	Positive Intrinsic Negative Photodiodes
PN	Positive Negative
PPM	Pulse Position Modulation
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence
PSK	Phase-Shift Keying

## **R**

RCPG	Raised Cosine Pulse Generator
RF	Radio Fréquence
RTCP	Réseau Téléphonique Commuté Publique
Rx	Réception en télécommunication
RZ	Return to Zero

## **S**

SNR	Signal-to-Noise Ratio
SOA	Semi-conductor Optical Amplifiers
SONET	Synchronous Optical NETWORK
SRS	Stimulated Raman Scattering

## **T**

TEB	Taux Erreur Binaire
Tx	Émission ou Transmission, en télécommunication

## **V**

VLC	Visible Light Communications
-----	------------------------------

# Liste des Figures

---

## Chapitre 1

---

Figure 1.1. Schéma de principe d'une liaison bidirectionnelle FSO en visée directe.....	5
Figure 1.2. Configuration de base d'une liaison FSO .....	6
Figure 1.3. Liaisons optiques FSO reliant des bâtiments centraux entre eux.....	7
Figure 1.4. Topologies de réseaux FSO.....	8
Figure 1.5. Illustration de l'ordre de rayonnement m d'une source .....	13

## Chapitre 2

---

Figure 2.1. Schéma de principe d'un système de transmission optique.....	19
Figure 2.2. Synoptique du bloc émetteur FSO.....	20
Figure 2.3. Spectre d'émission d'un DEL.....	20
Figure 2.4. Spectre d'émission d'un DL.....	21
Figure 2.5. Schéma de principe d'un modulateur Mach-Zehnder .....	22
Figure 2.6. Schéma d'un amplificateur à fibre dopée Erbium.....	26
Figure 2.7. Bloc de récepteur optique .....	28

## Chapitre 3

---

Figure 3.1. Logo d'OptiSystem .....	31
Figure 3.2. La fenêtre principale du logiciel .....	32
Figure 3.3. Projet sur logiciel OptiSystem .....	33
Figure 3.4. Paramétrage d'un composant .....	33
Figure 3.5. Modification des paramètres du layout.....	34
Figure 3.6. Démarrage de la simulation .....	34
Figure 3.7. Affichage des résultats de la simulation.....	35
Figure 3.8. Diagramme de l'oeil .....	36

Figure 3.9. Configuration d'une liaison optique simple à haut débit FSO : premier scénario ....	39
Figure 3.10. BER vs débit de données sans amplification.....	40
Figure 3.11. Facteur-Q vs débit de données sans amplification.....	40
Figure 3.12. BER vs débit de données avec amplification .....	41
Figure 3.13. Facteur-Q vs débit de données avec amplification .....	41
Figure 3.14. Configuration d'une liaison optique simple à haut débit FSO en utilisant une modulation externe : deuxième scénario .....	42
Figure 3.15. BER vs débit de données avec amplification, en utilisant un modulateur externe .....	43
Figure 3.16. Facteur-Q vs débit de données avec amplification, en utilisant un modulateur externe.....	43
Figure 3.17. BER vs puissance optique de Tx avec amplification, en utilisant un modulateur externe.....	44
Figure 3.18. Facteur-Q vs puissance optique de Tx avec amplification, en utilisant un modulateur externe .....	45
Figure 3.19. Architecture proposée : FSO-FO-FSO : troisième scénario .....	46
Figure 3.20. BER vs débit de données dans la bande C.....	48
Figure 3.21. Facteur-Q vs débit de données dans la bande C.....	48
Figure 3.22. BER vs longueurs d'onde dans la bande C .....	49
Figure 3.23. BER vs distance de liaison FSO autour de la bande L .....	49
Figure 3.24. Facteur-Q vs distance de liaison FSO autour de la bande L .....	50
Figure 3.25. Diagramme de l'œil autour de deux bandes simulées C et L.....	51

# Liste des Tableaux

---

## Chapitre 2

---

Tableau 2.1 Comparaison entre les formats de modulation: NRZ, RZ et CS-RZ.....	25
Tableau 2.2 Différents types de modulation.....	25

## Chapitre 3

---

Tableau 3.1. Paramètres de simulation pour le premier scénario .....	38
Tableau 3.2. Performance de la liaison FSO à 10 Gbit/s.....	41
Tableau 3.3. Valeurs de BER vs puissance optique de Tx.....	45
Tableau 3.4. Paramètres de simulation pour le troisième scénario .....	47

# Introduction générale

Aujourd'hui, la propagation des ondes optiques en espace libre (FSO) est considérée comme un complément pour améliorer les technologies sans fil existantes. Historiquement, la technologie FSO existe depuis environ une trentaine d'années (oui l'information est exacte) en tant que prototype initial pour des applications militaires et de communication satellitaire. En revanche que, cette technologie peut être utilisée même dans des autres applications, telles que les connexions permanentes entre plusieurs bâtiments, la communication aéroportée et les liaisons mobiles temporaires.

Par définition, « *Free Space Optics (FSO) est une technologie de communication optique qui implique la transmission optique de la voix, de la vidéo et des données en utilisant l'espace libre comme moyen de communication entre deux points distingué, c'est similaire aux communications par fibre optique* ». En terme technique, FSO offre une large bande passante de modulation, un spectre sans licence, un déploiement rentable, une faible consommation d'énergie et un coût moins élevé.

Un système de transmission optique implique les traitements suivants : la modulation du signal optique, la transmission, la détection et la démodulation. Parmi les facteurs principaux dans la conception et réalisation d'un système de communication optique à haut performance, c'est le choix de format de modulation. Dans un système FSO, l'intensité d'une source optique est modulée pour transmettre des signaux sur le canal, où le signal optique peut être modulé dans son amplitude, fréquence, phase et polarisation. Cependant, il y a différents types de format de modulation appropriés pour un système FSO qui a comparé en termes de puissance optique moyenne reçue nécessaire pour atteindre un BER et un facteur de qualité désiré à un débit de données utilisé. Le plus simple de format de modulation et le plus couramment utilisé est la modulation d'intensité avec détection directe. Le format de modulation devrait être choisi à base de l'efficacité de la puissance, l'efficacité de la bande passante, la simplicité de la conception, la mise en œuvre à faible coût et l'immunitaire à l'arrière-plan d'interférence des radiations optiques.

Le présent document vise à étudier et évaluer les performances d'un système de communication optique sous un canal FSO en utilisant différents formats de modulation, où le système a été simulé sous le logiciel OptiSystem. Toute cette étude a été organisée dans un document comportant trois chapitres, en plus d'une introduction générale, d'une conclusion générale, des perspectives et une bibliographie récente.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter une description générale sur la technologie FSO et son fonctionnement, leurs topologies, ses caractéristiques et leurs domaines d'application dans le monde des télécommunications, et nous allons citer aussi quelques avantages, inconvénients de cette technologie. En fin, nous ferons une comparaison entre FSO et la fibre optique, puis décrire quelques paramètres essentiels de la technologie FSO.

Le deuxième chapitre de ce document est une description générale sur les composantes optoélectroniques constituant une liaison optique en espace libre. En première partie, nous décrirons les blocs principaux d'un système de communication optique FSO, qui sont les suivants :

- L'émetteur : la diode laser, la diode électroluminescente.
- Modulateur : électro-absorbant, Mach-Zehnder.
- L'élément de connexion : le milieu atmosphérique.
- Le récepteur du signal optique : le photo-détecteur.

En deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons les différents formats de modulation numérique les plus utilisés, ainsi que leurs caractéristiques, les paramètres, les avantages et les inconvénients dans le contexte de modulation directe et externe.

La partie de simulation de la liaison FSO proposée, sera présentée au troisième chapitre. Selon l'étude que nous avons fait durant les deux chapitres précédent, nous allons proposer deux liaisons optiques en utilisant la technologie FSO, ce qui est intéressant ici : nous changeons les paramètres de test pour étudier et évaluer la performance de deux liaisons, à savoir : la puissance optique de Tx, la portée de la liaison et le débit de transmission de données.

En premier cas, différents formats de modulation ont été étudiés et évalués leurs performances dans une liaison optique FSO, à savoir : RZ, NRZ, GPG, HPG et RCPG, où nous allons intégrer deux types de modulations : directe et externe.

En deuxième cas, nous allons proposer une liaison optique hybride FSO-FO-FSO, où nous allons viser à analyser les performances de la liaison FSO-FO-FSO dans deux bandes, à savoir : la bande C et la bande L.

Le BER et le facteur de qualité sont deux métriques que nous utiliserons pour juger les performances des deux liaisons optiques proposées.

Enfin, ce document se termine par une conclusion résumant le bilan des travaux effectués et l'ouverture aux travaux futurs.

## CHAPITRE 1

# Technologie FSO

## 1.1 Introduction

Les communications optiques en espace libre (en anglais FSO : Free Space Optics), communément appelées Optical Wireless Communications ou OWC. Ils font référence à la transmission de faisceaux modulés de lumière visible ou infrarouge (IR) à travers la couche atmosphère pour obtenir un système de télécommunications optiques de type " point à point ", sur plus longue distance, en comparaison aux équipements existants similaires, par exemple : transmission par fibre optique. De plus, la technologie FSO utilise des lasers pour transmettre des données, mais au lieu d'enfermer le flux de données dans une fibre de verre, il est transmis par l'air. La communication optique en espace libre (FSO) fonctionne sur le même principe de base que les télécommandes de télévision infrarouge ou les claviers sans fil [1].

L'objectif de ce chapitre est de présenter le principe de fonctionnement et les caractéristiques de cette technologie, Ainsi que d'illustrer en plus de la robustesse de FSO, les diverses applications, avantages et inconvénients.

## 1.2 Technologie FSO

En terme simple, une liaison optique sans fil (voir la figure 1.1) implique le transfert de données via l'espace entre deux points utilisant le rayonnement optique comme un signal porteur. Les canaux où se propage le signal optique pourraient être l'espace lointain, l'atmosphère ou l'eau de mer. L'accent mis dans ce travail est cependant sur FSO terrestres, en tant que tel, le canal d'intérêt est l'atmosphère. Une liaison optique sans fil se fonde essentiellement sur une visibilité directe LOS (Line of Sight) entre les extrémités des points de communication, par conséquent pour assurer un échange fructueux d'informations, cela exige que l'émetteur et le récepteur soit en visibilité directe l'un avec l'autre sans aucun obstacle.

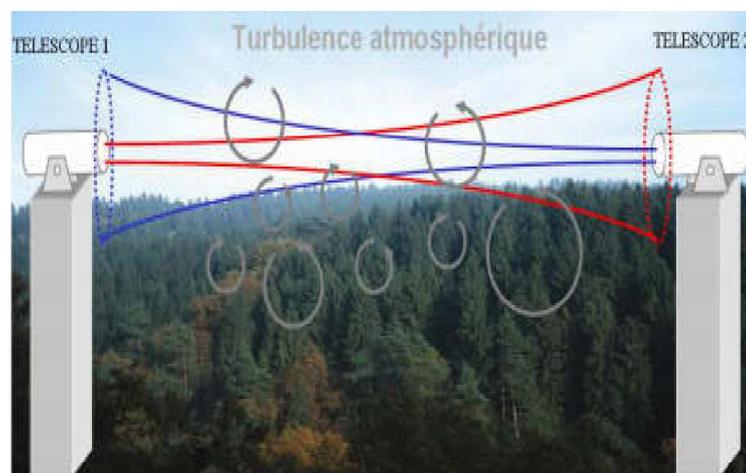


Figure 1.1. Schéma de principe d'une liaison bidirectionnelle FSO en visée directe [2].

### 1.3 Fonctionnement

La technologie FSO est étonnamment simple, offrant une fiabilité inégalée et une connectivité à haut débit... Cependant, il est basé sur la connectivité entre les unités sans fil optiques à base de FSO, chacune consistant en un émetteur et un récepteur optique pour fournir une capacité « full-duplex », la communication est bidirectionnelle et simultanée, comme il est illustré sur la figure 1. 2. Chaque unité optique sans fil utilise une source optique, plus une lentille ou un télescope qui transmet la lumière à travers l'atmosphère vers une autre lentille recevant l'information. À ce stade, la lentille de réception ou le télescope se connecte à un récepteur à haute sensibilité par fibre optique. La condition la plus importante dans une liaison FSO est que l'émetteur et le récepteur doivent être en visibilité directe l'un par rapport à l'autre [3,4]. Chaque équipement comporte plusieurs modules :

#### Partie d'émission :

- le module d'émission optique contenant soit une diode laser ou une diode électroluminescente ;
- le filtrage et l'amplification du signal numérique électrique ;
- le module de conversion électrique/optique (E/O), en cas d'interface optique ;
- l'interface d'affluent : électrique ou optique pour recevoir les données numériques.

#### Partie de réception :

- le module de réception optique contenant une photodiode ;
- le filtrage et l'amplification du signal numérique électrique ;
- le module de conversion électrique/optique (E/O), en cas d'interface optique ;
- l'interface d'affluent : électrique ou optique pour transmettre les données numériques.

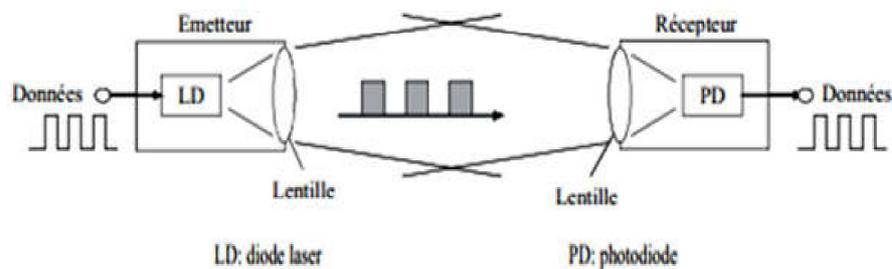


Figure 1.2. Configuration de base d'une liaison FSO [5].

De plus, les arbres, les bâtiments, les animaux et les conditions atmosphériques peuvent tous nuire à la visibilité nécessaire pour ce moyen de communication. Étant donné que la ligne de visée est si critique, certains systèmes utilisent une divergence de faisceau ou une approche par faisceau diffus, ce qui implique un large champ de vision qui tolère une interférence substantielle en visibilité directe sans impact significatif sur la qualité globale du signal. Certains systèmes sont également équipés de mécanismes de suivi automatique qui maintiennent une connectivité très ciblée, même lorsque les émetteurs-récepteurs sont montés sur des bâtiments élevés qui se balancent [3,4]. La figure 1.3 exprime un exemple d'architecture réseau optique sans fil basée sur des liaisons FSO.

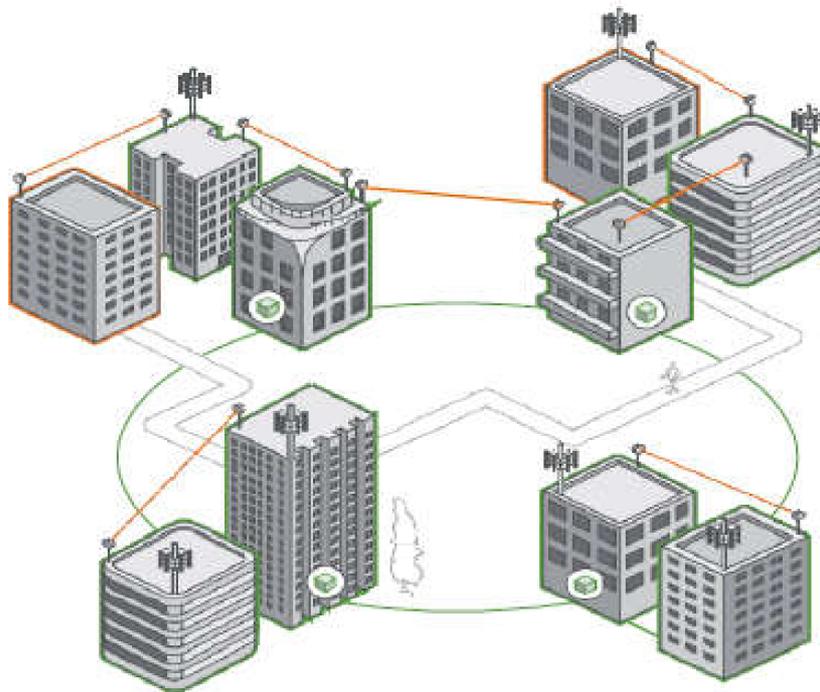


Figure 1.3. Liaisons optiques FSO reliant des bâtiments centraux entre eux [12].

#### 1.4 Topologies de FSO

Ce type de réseau FSO permet de créer une connexion flexible dont la topologie peut être diverse. Il existe quatre architectures principales qui ont été utilisées (voir la figure 1.4) :

- Point à point : est une connexion dédiée offrant une bande passante plus élevée mais moins évolutive.
- Maillage : peuvent offrir une redondance et une fiabilité plus élevée, mais elle présente des distances limitées par rapport d'autres options. En outre, à travers cette topologie, on peut ajouter des nœuds facilement dans un réseau FSO.

- Point à multipoint : offre des connexions moins coûteuses. Aussi, les nœuds sont facilement ajoutés dans cette topologie, mais les frais de la bande passante sont moins élevés que l'option point à point.
- Anneau : présente une connexion fiable avec un taux de données très élevés. De plus, cette topologie présente une meilleure protection et service au réseau FSO et est évolutive [6,7].

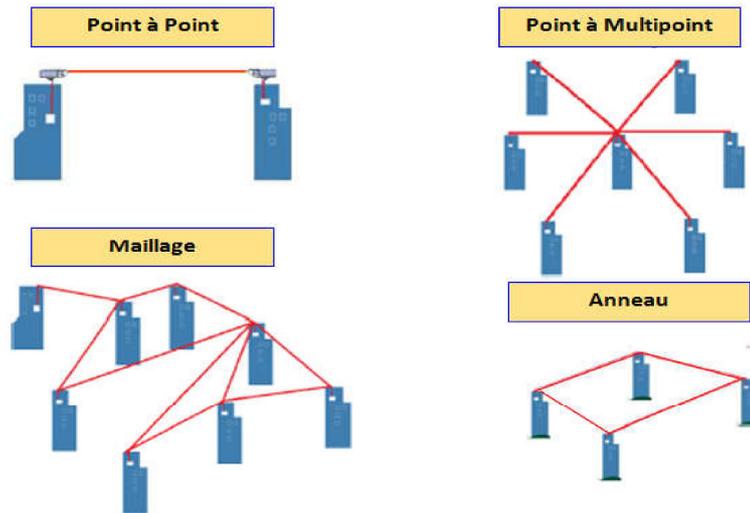


Figure 1.4. Topologies de réseaux FSO [8].

### 1.5 Caractéristiques d'une liaison FSO

C'est les paramètres principaux dont nous devons tenir compte pour la définition des communications optiques en espace libre [9-12] sont :

- La longueur d'onde : la longueur d'onde à laquelle fonctionne un dispositif FSO est le premier paramètre à considérer. En pratique, les lasers utilisés émettent des rayonnements infrarouges situés le plus souvent dans une gamme de longueur d'onde autour de 1550 nm, car la sensibilité des photodiodes utilisées en réception est bien meilleure à 1550 nm que dans le visible ou le proche infrarouge ;
- Bande passante : dans tout système de communication, la quantité de données transportées est directement liée à la bande passante de la porteuse modulée. Par exemple, l'utilisation d'un support optique (fibre ou sans fil) dont la fréquence varie de  $10^{12}$  Hz à  $10^{16}$  Hz pourrait permettre la transmission de données jusqu'à 2000 THz ;
- Faisceau de taille étroite : le rayonnement optique est connu par son faisceau très étroit, un faisceau laser typique possède un angle de divergence entre 0,01 et 0,1 mrad et une

- efficacité plus grande. Cela implique que la puissance émise est concentrée seulement dans une zone très étroite ;
- Un spectre ne nécessitant pas de licence ;
  - Rapide à déployer et redéployer : le temps qu'il faut à une liaison FSO afin d'être pleinement opérationnel, de l'installation jusqu'à l'alignement de la liaison, pourrait être aussi faible que quelques heures ;
  - Performance liée aux conditions climatologiques : la performance de liaison FSO terrestre est liée aux conditions atmosphériques. La propriété non-stable du canal est le plus grand défi. Toutefois, ce n'est pas propre aux liaisons FSO, les liaisons RF et les liens de communication par satellite sont également exposés aux pannes lors de fortes pluies et en cas de tempête ;
  - La portée : la portée de ce type de liaisons varie entre 10 m à 7700 m. Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur et non pas comme des valeurs absolues.

## 1.6 Applications de FSO

Actuellement, la liaison de communication FSO est utilisée dans de nombreux services [12,13]. Ceux-ci sont décrits ci-dessous en détail :

- Accès sans fil - extérieur : FSO peut être utilisée par des fournisseurs de services sans fil pour la communication et il ne nécessite aucune licence pour utiliser le FSO. Par contre, nous trouvons que l'utilisation des bandes de fréquence de micro-ondes besoin une licence pour fonctionner dans le monde des télécommunications ;
- Accès militaire : puisque le système FSO sécurisé et indétectable, il est capable de connecter et couvrir des grandes zones avec une sécurité élevée, un temps de planification et de déploiement minimal. Donc, avec toutes ces conditions, il est approprié pour des applications militaires ;
- Connectivité d'entreprise : les systèmes FSO sont facilement installés. Cette caractéristique permet de connecter plusieurs réseaux locaux entre eux, par exemple, entre des bâtiments ou d'autres propriétés, les réseaux de stockage et les connexions intra-campus ;
- Extensions du réseau Metro : les opérateurs peuvent déployer le système FSO pour étendre les anneaux de fibre métropolitaine existants, Aussi, il est déployé pour connecter de nouveaux réseaux avec une durée minimale, et une infrastructure de base est très facile à réaliser. Il peut également être utilisé pour compléter les anneaux SONET ;

- Protection de fibre optique : FSO peut également être protégée les liaisons par fibre optique comme une liaison secours, en cas d'échec de transmission ;
- Backhaul : FSO peut être utile pour acheminer le trafic du téléphone cellulaire depuis les antennes vers le RTCP (Réseau Téléphonique Commuté Publique) avec une vitesse élevée et un débit de données élevé ;
- Accélération de service : FSO peut également être utilisée pour fournir un service instantané aux clients de fibre optique, pendant que l'infrastructure de fibre optique est posée ;
- Accès au dernier kilomètre : Dans les villes actuelles, plus de 95% des bâtiments n'ont pas accès à l'infrastructure de la fibre optique en raison du développement des systèmes de communication après les zones métropolitaines. La technologie FSO semble une solution prometteuse pour la connexion des utilisateurs finaux aux fournisseurs de services ou à d'autres réseaux existants. En outre, la technologie FSO fournit une connexion haut débit jusqu'à Gbps. Donc, elle est plus importante que les systèmes alternatifs.

## 1.7 Avantages et Inconvénients de FSO

Cette section présente les avantages et les limites d'une liaison optique en espace libre :

### 1.7.1 Avantages de FSO

Les avantages du FSO sont multiples [3,14,15]:

- Des débits binaires élevés ;
- Déploiement facile du réseau ;
- Peut-être utilisée pour alimenter des dispositifs ;
- Fonctionnement à longue distance sans licence (contrairement à la communication RF) ;
- Communication full-duplex ;
- FSO ne souffre pas d'interférence de fréquence radio ou de saturation de bande ;
- Aucun logiciel requis sur les appareils clients ;
- Fonctionnement à très haut niveau de sécurité : FSO est certifiée dans des applications gouvernementales et de défense pour le transfert d'informations confidentielles et classifiées ;
- Installation à l'intérieur est possible et n'est pas affectée par l'opération à travers le verre ;
- Facilité et rapidité d'installation ;

- Capacité de transmission élevée ;
- Transparence du protocole réseau ;
- Investissement à faible risque ;
- Rapidité de la génération de revenus.

### 1.7.2 Inconvénients de FSO

Les facteurs principaux qui limitant les applications FSO terrestres [6,15] sont :

- Dispersion du faisceau ;
- Absorption et pollution atmosphérique ;
- Pluie, neige, brouillard ;
- Chaleur ambiante modifiant l'indice de réfraction du milieu (déformation-déviations du faisceau) ;
- Scintillation ;
- Pollution lumineuse parasite ;
- Instabilité du pointage en période venteuse ;
- Rayonnement solaire axial gênant la réception.

### 1.8 Comparaison entre FSO et fibre optique

Les systèmes de communication optiques sans fil et les fibres optiques ont presque une même bande de transmission, d'ici vient l'importance de les comparer. Un des points les plus importants de la comparaison entre les deux systèmes est la manière dont ils transmettent la lumière. La lumière peut être transmise soit à travers l'espace libre (FSO, OWC et LiFi/VLC) ou à travers un milieu confiné (fibre optique et soliton optique). La lumière se déplace plus vite dans l'air (environ 300.000 km/s) qu'à travers le verre (environ 200.000 km/s), ce qui fait que les communications à travers les liaisons FSO peuvent être considérées comme des communications à la vitesse de la lumière.

Le déploiement des réseaux à fibre optique prend des mois, tandis que les systèmes optiques sans fil peuvent être mis en place en quelques heures.

L'installation des fibres nécessite le creusement de tranchées, qui peut causer la pollution, l'abattage des arbres et la destruction des monuments historiques, dont ce n'est pas le cas pour FSO, et par conséquent les systèmes FSO sont respectueux de l'environnement.

Les fibres optiques sont préférables pour les liaisons à grandes distances ainsi que pour les épines dorsales des réseaux. Pour les réseaux urbains, les liaisons FSO ont l'avantage d'être peu coûteuses, rapides et faciles d'installer, flexibles et peuvent être déployées dans tous les réseaux [12].

### 1.9 Sécurité

FSO est une méthode très sécurisée de communications sans fil par rapport aux réseaux de signaux RF car les faisceaux lumineux ne peuvent pas être détectés par les analyseurs de spectre, les transmissions de données peuvent être cryptées, les faisceaux laser sont très étroits et invisibles. Pour recevoir le signal, un autre récepteur correspondant devrait être aligné dans le trajet de la lumière, ce qui est très improbable [6].

### 1.10 Les paramètres d'une liaison FSO

Avant de déployer des liaisons optiques atmosphériques, il est important de savoir leur disponibilité et leur fiabilité :

- la disponibilité détermine le pourcentage du temps de leur fonctionnement dans des conditions acceptables.
- la fiabilité assure un débit d'informations par une qualité de service donnée [5].

À l'instar des équipements pour une liaison FSO, il est primordial de savoir le bilan de liaison et la marge brute de la liaison donnée. La connaissance de ces paramètres permet de connaître la capacité du lien laser à transmettre des données numériques malgré les variations des conditions climatiques. Les principaux paramètres à prendre en considération pour la définition des liaisons optiques atmosphériques sont les suivants : la puissance émise, la sensibilité du récepteur, la surface de détection optique du récepteur et la divergence du faisceau émis. A partir de ces données techniques, on pourra connaître la valeur de l'affaiblissement géométrique de la liaison et sa marge brute [16].

#### 1.10.1 Intensité rayonnante

Le rayonnement optique de la plupart des émetteurs optiques peut être modélisé par un modèle Lambertien généralisé [16,17]. Un émetteur ayant un rayonnement de type Lambertien généralisé d'ordre "  $m$  " a un diagramme de rayonnement exprimé par la relation suivante :

$$R_0(\varphi) = \left(\frac{m+1}{2\pi}\right) * \cos^m(\varphi) \quad (1.1)$$

Où  $\varphi$  est l'angle entre l'orientation de la surface émettrice et la direction considérée de rayonnement optique.

Lorsque  $m=1$ , on dit que l'émetteur est « Lambertien ». La Figure II- 6 illustre le diagramme de rayonnement d'une source d'ordre 1, 10 et 20 (voir la figure 1.5).

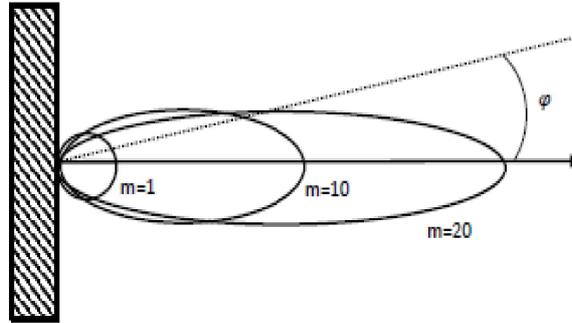


Figure 1.5. Illustration de l'ordre de rayonnement  $m$  d'une source.

L'intensité rayonnée pour une puissance optique  $P_T$  s'écrit alors :

$$I = P_T * R_0(\varphi) \quad (1.2)$$

### 1.10.2 Puissance optique reçue

Elle se calcule comme pour les faisceaux hertziens terrestres, mais avec des ordres de grandeurs très différents [16,18]. La puissance optique reçue est donnée par la relation suivante :

$$P_R = P_T * G_T * G_L * G_R * \tau_T * \tau_L * \tau_{atm} \quad (1.3)$$

Où :

- $P_T$  : puissance totale émise ;
- $G_T$  : gain d'antenne émettrice ;
- $G_L$  : perte due au trajet de distance  $L$  ;
- $G_R$  : gain d'antenne réceptrice ;
- $\tau_T$  : rendement d'un émetteur optique ;
- $\tau_L$  : rendement d'un récepteur optique ;
- $\tau_{atm}$  : perte atmosphérique.

La puissance optique reçue peut être exprimée comme suit :

$$P_R = P_T * G_T * \left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right)^2 * \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 * \tau_T * \tau_L * \tau_{atm} \quad (1.4)$$

Où  $\lambda$  et  $D$  représentent respectivement, la longueur d'onde et le diamètre d'une antenne réceptrice.

### 1.10.3 La densité de puissance optique

La densité de puissance par unité de surface d'une antenne donnée, est le rapport de la puissance émise sur une surface de l'antenne [16,18]. Pour une distance  $L$  séparant l'émetteur du récepteur, elle est donnée par la relation suivante :

$$P_D = \frac{P_T}{4\pi L^2} \quad (1.5)$$

### 1.10.4 Perte en espace libre (PEL)

La perte due au trajet traduit la perte du signal lors de sa propagation de l'émetteur vers le récepteur [16,19]. Il existe plusieurs modèles basés sur la fréquence et la distance. Le calcul se fait à l'aide de l'équation suivante :

$$PEL = 32.45 + 20 * \log(L) + 20 * \log(f) \quad (1.6)$$

Où  $f$  désigne la fréquence et  $L$  la distance séparant l'émetteur du récepteur.

En communication optique, cette perte est calculée pour prédire la puissance du signal obtenue à la réception dans un environnement non-turbulent. La puissance reçue à une distance  $L$  est :

$$P_R(L) = P_T * G_T * G_L * G_R = \frac{P_T * G_T * G_R * \lambda^2}{(4\pi L)^2} \quad (1.7)$$

La perte due au trajet en décibel est donnée comme suit :

$$P(L)[dB] = 10 \log\left(\frac{P_T}{P_R}\right) = -10 \log\left(\frac{G_T * G_R * \lambda^2}{(4\pi L)^2}\right) \quad (1.8)$$

### 1.10.5 Marge d'une liaison optique atmosphérique

Une marge de liaison d'un système FSO est une grandeur qui permet de caractériser et de décrire le signal transmis entre l'émetteur et le récepteur. Elle permet aussi de donner toutes les contributions pertinentes en termes de pertes sur le signal et ainsi que sur la disponibilité de la liaison. La marge de la liaison optique atmosphérique peut être définie comme étant la puissance disponible au-dessus de la sensibilité du récepteur [16,20].

À partir de la valeur de l'affaiblissement géométrique ( $Aff_{Geo}$ ), il est possible de calculer cette marge brute exprimée en (dB). Les données fournies par les constructeurs telles que la puissance à l'émission  $P_T$ , la sensibilité en réception  $S_r$  et les pertes systèmes  $P_{tot}$ , si elles sont mentionnées, permettent de déduire la marge brute via l'expression suivante :

$$M_{Liaison}(dB) = P_T + |S_r| - Aff_{Atm}(dB) - P_{tot}(dB) \quad (1.9)$$

Où :

- $P_T$  : puissance émise par l'émetteur ;
- $S_r$  : sensibilité du récepteur ;
- $Aff_{Atm}$  : atténuation moléculaire correspondant à la longueur d'onde utilisée dans la liaison ;
- $P_{tot}$  : ensemble de toutes les autres pertes relatives au système.

L'atténuation géométrique de la liaison (dB) peut être calculée par l'équation suivante :

$$Aff_{Geo} = \frac{S_L}{S_{capture}} \quad (1.10)$$

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

Nous pouvons établir l'équation de l'atténuation géométrique de la liaison avec l'expression suivante :

$$Aff_{Geo} = \frac{\pi(L\theta)^2}{4*S_{capture}} \quad (1.11)$$

Où  $\theta$  est la divergence du faisceau laser.

La liaison sera donc disponible si les affaiblissements supplémentaires dus aux conditions météorologiques ou climatiques (pluie, neige, brouillard, etc.), à la lumière ambiante (rayonnement solaire) et aux scintillations sont inférieurs à la marge de la liaison.

### 1.10.6 Bilan de liaison

Le bilan de liaison permet de calculer le rapport signal utile sur bruit en sortie du récepteur en fonction de tous les paramètres qui influent sur la puissance de l'onde émise. Considérons  $N$  la puissance du bruit des récepteurs, il est possible de définir le rapport signal sur bruit par :

$$\frac{P_R}{N} = \frac{P_T * G_T * G_L * G_R * \tau_T * \tau_L * \tau_{atm}}{N} \quad (1.12)$$

La puissance du bruit dans une bande de fréquence donnée, se définit par :

$$N = k * T * B \quad (1.13)$$

Où  $k$  est la constante de Boltzmann ( $k = 1,380\ 650\ 3 \times 10^{-23} J/K$ ),  $T$  la température système en Kelvin et  $B$  la bande de fréquence [16,21].

### 1.10.7 Débit de transmission

Celui-ci se calcule à partir de rapport signal sur bruit et du rapport de l'énergie par bit [16,22]. Le rapport correspond à l'énergie par bit sur la densité du bruit. Cette valeur dépend du type de modulation choisie et de la norme de communication. Afin d'anticiper tout phénomène pouvant dégrader la transmission du signal, une marge est prise par rapport à la valeur requise de  $\left(\frac{E_b}{N}\right)$ . Le rapport  $\left(\frac{E_b}{N}\right)$  en dB est donné par :

$$\frac{E_b}{N} = \left(\frac{E_b}{N}\right)_{requis} + M_{Liaison}(dB) \quad (1.14)$$

Par conséquent, le débit de transmission est donné par la formule :

$$\text{Débit} = 10 \left( \frac{\left(\frac{P_R}{N}\right) - \left(\frac{E_b}{N}\right)}{10} \right) \quad (1.15)$$

### 1.10.8 Capacité du canal de transmission

La capacité d'un canal de transmission est la quantité maximale d'information que l'on peut transmettre de manière fiable, c'est-à-dire sans perte d'information. La capacité  $C$  d'un canal de transmission avec un bruit blanc gaussien additif (AWGN) est donnée par le théorème de Shannon-Hartley par :

$$C_{(t)} = B \log_2(1 + SNR_{(t)}) \quad (1.16)$$

La capacité d'un canal est exprimée en bit/s, la bande passante  $B$  en Hertz, et SNR représente le rapport signal sur bruit [16].

### 1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit brièvement la technologie de communication optique en espace libre en tant que support de transmission. En outre, nous avons cité toutes les caractéristiques d'une liaison FSO, les topologies d'un réseau FSO, et les avantages et inconvénients liés à cette technologie.

Le chapitre suivant sera consacré aux différents composants optoélectroniques qui peuvent être utilisés dans un système FSO.

CHAPITRE 2

Composants  
Optoélectroniques pour un  
Système FSO

## 2.1 Introduction

Les systèmes de télécommunication optiques peuvent être classés en deux types : les systèmes guidés où on utilise un support, principalement la fibre optique, pour transporter un signal optique depuis l'émetteur jusqu'au destinataire, et les systèmes non-guidés où le signal optique est envoyé depuis l'émetteur jusqu'au récepteur en se propageant dans l'espace libre (FSO). La technologie FSO permet la transmission de tous types de données avec un débit comparable à celui de la fibre optique tout ayant la souplesse et des avantages importants par rapport d'autre technologie sans fil, plus la mobilité dans certaines applications.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons plus particulièrement aux différents composants optoélectroniques qui constituent une liaison FSO, et les formats de modulation les plus utilisés dans ce contexte.

## 2.2 Composants optoélectroniques

FSO est une technologie de communication optique qui transmet des données en propageant la lumière en visibilité directe entre deux points distants. Le signal à transmettre est obtenu sous la forme d'un courant électrique modulant en agissant sur la transmission d'un composant optoélectronique.

Dans les liaisons optiques en espace libre, comme dans tous les systèmes de communication, il existe trois blocs importants pour effectuer la transmission de l'information : émetteur, canal de communication et récepteur, voir la figure 2.1.

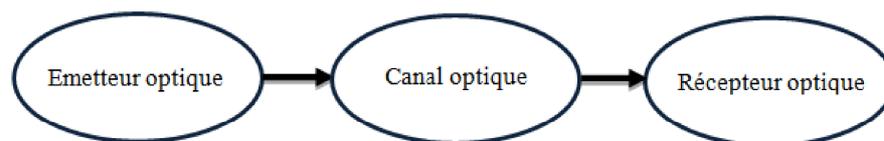


Figure 2.1. Schéma de principe d'un système de transmission optique.

Dans les sections suivantes, nous allons décrire les principaux composants d'un système FSO.

## 2.3 Emetteurs optoélectroniques

Le module d'émetteur, généralement noté Tx, convertit le signal électrique modulé en un signal optique qui se propage à travers l'atmosphère vers le récepteur. Les émetteurs optiques exploitent un large spectre qui s'étend de l'UV à l'IR [23]. La majorité des systèmes FSO sont conçus pour fonctionner dans les fenêtres de 780 - 850 et 1520 - 1600 nm [24], ce qui correspond à des fréquences de

transmission des données autour de 200 THz [12]. La figure 2.2 suivante représente le schéma d'un bloc d'émetteur de transmission optique en espace libre.

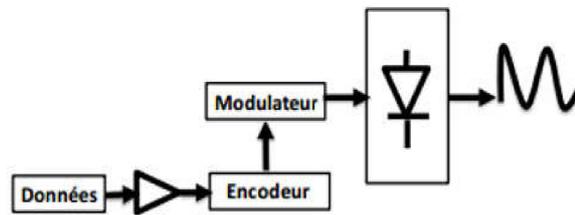


Figure 2.2. Synoptique du bloc émetteur FSO [25].

### 2.3.1 Les sources optiques

Dans les systèmes de communications modernes optiques, diverses sources de lumière sont utilisées pour la transmission de données optiques. Les deux types les plus couramment utilisés sont les diodes électroluminescentes et les diodes lasers :

#### A. Diodes DEL (électroluminescentes)

Diodes DEL sont des dispositifs de jonction PN à semi-conducteurs qui émettant de la lumière lorsqu'elles sont polarisés en direct. En raison de leur puissance de transmission relativement faible, les DEL sont généralement utilisées dans des applications sur des courtes distances avec des besoins en bande passante modérés, jusqu'à 155 Mbps. Selon le système de matériel, les LED peuvent fonctionner dans différentes gammes de longueurs d'onde par rapport à la bande étroite d'une diode laser, elles ont également une gamme de fonctionnement spectrale beaucoup plus large, voir la figure 2.3. L'avantage majeur des sources DEL est leur faible coût et leur vie extrêmement longue, mais elle présente une sécurité inférieure à celle des diodes lasers [26–27].

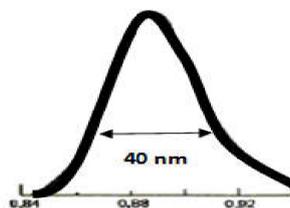


Figure 2.3. Spectre d'émission d'un DEL [28].

#### B. Diodes lasers (DL)

Diodes lasers sont des composants similaires aux diodes électroluminescentes, mais un peu différents dans leurs fonctionnements et caractéristiques. Elles sont utilisées dans des applications sur

des longues distances avec un rendement énergétique élevé, et une large bande passante, aussi elles fonctionnent sur une largeur spectrale relativement étroite, voir la figure 2.4 [23].

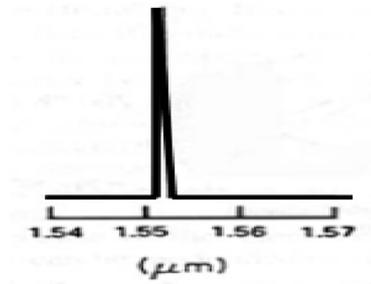


Figure 2.4. Spectre d'émission d'un DL [28].

### 2.3.2 Modulateurs optiques

Les modulateurs sont des dispositifs capables de convertir un signal d'information basse fréquence en une porteuse optique pour une communication à longue distance. Les paramètres qui caractérisent les modulateurs optiques sont les suivantes : bande passante, perte d'insertion, profondeur de modulation, puissance d'entraînement, et débit de transmission.

Il y a plusieurs façons d'obtenir une lumière modulée. La première consiste à fabriquer une source modulable, c'est la modulation directe (dont l'exemple, type est le Laser à semi-conducteur). La seconde consiste à moduler la lumière émise par une source non-modulable, c'est la modulation externe.

Lorsque le débit est faible, moins de 5 Gbit/s, nous utilisons seulement la modulation directe celle-là n'est pas complexe et n'a besoin que d'une diode laser. Au-delà de 5 Gbit/s, la modulation directe ne suffit pas, car il y a trop de dégradations tels que les oscillations de relaxation, chirp, bruit... Dans ce cas, nous devons utiliser la modulation externe [29].

Plusieurs types de modulateurs sont disponibles, en particulier nous nous intéresserons au modulateur de Mach-Zehnder et au modulateur électro-absorbant.

#### A. Modulateur électro-absorbant (MEA)

Le principe de fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur soumis à un champ électrique. Cet effet est connu sous le nom d'effet Franz-Keldysh dans un matériau massif et d'effet Stark confiné dans un matériau quantique. Une caractéristique particulièrement intéressante des modulateurs à électro-absorption est qu'ils peuvent être facilement intégrés avec les diodes lasers pour créer des sources optiques compactes et à très large bande de modulation [30].

## B. Modulateur Mach-Zehnder

Le modulateur Mach-Zehnder est un interféromètre à deux ondes, constitué de deux bras recevant chacun la moitié de la puissance lumineuse initiale. Au niveau de ses bras, un déphasage relatif entre les deux signaux est appliqué, au moyen d'une ou de deux cellules électro-optique disposées chacune dans un bras (voir la figure 2.5). Ce déphasage est converti en variation d'intensité du signal optique par l'interférence entre les signaux déphasés issus des deux bras [31].

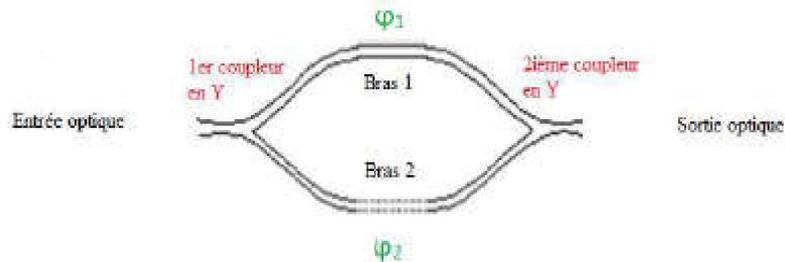


Figure 2.5. Schéma de principe d'un modulateur Mach-Zehnder [31].

### 2.3.3 Modulation

Dans les systèmes de communication FSO, l'intensité d'une source optique est modulée pour transmettre des signaux. Pour la transmission de données numériques, la modulation la plus pratique dans les systèmes de communication optiques sans fil est la modulation d'intensité à détection directe (IM/DD), également appelée détection « non-cohérente ». Les systèmes de modulation (IM / DD) sont plus simples et moins chers que les systèmes de la modulation cohérente. La limite de cette méthode provient de l'élargissement spectral de la diode laser. Cela restreint les possibilités de sélection spectrale fine. En effet, un élargissement spectral de la diode nécessite un filtre assez large pour ne pas supprimer une partie du flux lumineux utile. L'élargissement de ce filtre augmente la lumière parasite qui pénètre [25]. Il existe deux méthodes de modulations dans le système optique, la modulation directe et la modulation externe.

Les propriétés des diodes lasers vues précédemment font que la modulation directe est satisfaisante jusqu'à 15 GHz environ, mais qu'au-delà, cette méthode n'est plus applicable. Trop de dégradations (oscillations de relaxation, chirp, bruit, ...) apparaissent et limitent les capacités de transmission. La modulation externe est une bonne alternative, le laser émettant dans ce cas un simple signal constant, tous les défauts dus à la modulation du courant de polarisation seront éliminés [30].

## A. Paramètres de modulation

Il y a principalement trois paramètres du support qui peuvent être variés pour effectuer le processus de modulation pour la cartographie de l'information [32] :

- L'intensité ;
- La phase ;
- La fréquence ;
- La polarisation.

## B. Caractéristiques de modulation

### B.1. La rapidité de modulation

Se définit comme étant le nombre de changements d'état ou de symboles par seconde d'un ou de plusieurs paramètres modifiés simultanément. Un changement de phase du signal porteur, une excursion de fréquence ou une variation d'amplitude sont par définition des changements d'état ou de symboles. La rapidité de modulation s'exprime en "bauds".

$$R = \frac{1}{T_B} \quad (2.1)$$

$T_B$  : durée du changement d'état.

### B.2. Le débit binaire

Se définit comme étant le nombre de bits transmis par seconde. Il sera égal ou supérieur à la rapidité de modulation selon qu'un changement d'état représentera un bit ou un groupement des bits. Le "débit binaire" si l'alphabet se limite à 2 caractères 0 ou 1,  $D=R$  et s'exprime en "bits par seconde".

Si l'alphabet se limite à  $M$  caractères ( $M>2$ ), on transmet donc plusieurs bits pour une période  $T_B$  et on a la relation fondamentale.

Soit

$$D = n \cdot R \quad (2.2)$$

### B.3. Le taux d'erreur par bit ou BER

La qualité d'une liaison est liée au taux d'erreur par bit :

$$TEB = \frac{\text{nombre de bits faux}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (2.3)$$

#### B.4. L'efficacité spectrale EFF d'une modulation

Elle s'exprime en "bit/seconde/Hz". La valeur D est le "débit binaire" et B est la largeur de la bande occupée par le signal modulé.

$$EFF = \frac{D}{B} \quad (2.4)$$

#### B.5. Symbole

Est un élément d'un alphabet. Si M est la taille de l'alphabet, le symbole est alors dit M-aire. Lorsque M=2, le symbole est dit binaire. En groupant, sous forme d'un bloc, n symboles binaires indépendants, on obtient un alphabet de  $M = 2^n$  symboles M-aires.

Le besoin de l'heure actuelle est d'obtenir un débit de données élevé avec de bonnes performances de BER [33].

### C. Techniques de modulation

Dans des liaisons FSO, il existe différentes options disponibles pour les techniques de modulation qui peuvent être utilisées, par exemple [34] :

- On-Off Keying (OOK), où le 1 est représenté par la présence de l'impulsion tandis que le 0 par l'absence d'impulsion ;
- La modulation par déplacement d'amplitude (ASK), où l'information est incrustée dans l'amplitude de l'impulsion sinusoïdale ;
- La modulation par déplacement de phase (PSK), où l'information est intégrée dans la phase ;
- La modulation par déplacement de fréquence (FSK), où l'information est intégrée dans la fréquence ;
- PPM (Pulse Position Modulation) l'information est transmise par une impulsion dans un slot unique, tandis que dans les autres ( $M-1$ ) slots aucune impulsion ne sera émise.
- La modulation par déplacement de phase binaire (BPSK) est un schéma de modulation numérique qui transmet des données en changeant ou en modulant, la phase d'un signal de référence (l'onde porteuse). BPSK est la forme la plus simple de modulation par déplacement de phase (PSK);
- La modulation par déplacement de phase en quadrature (QPSK) est l'une des variantes de la modulation PSK qui utilise quatre points différents sur le diagramme de constellation, équidistants autour d'un cercle pour représenter les bits de données ;

Le choix du schéma de modulation dépend de deux critères, l'efficacité de l'énergie optique et l'efficacité de la bande passante. La modulation la plus couramment utilisée est OOK. C'est la technique IM / DD la plus simple, mais elle a une faible efficacité énergétique.

PPM (Pulse Position Modulation) manque d'efficacité de bande passante, mais a une bonne efficacité énergétique par rapport à ASK. BPSK et QPSK peuvent également être utilisés. En termes de performances de BER et de puissance requise, le BPSK est meilleur que le QPSK [35–37].

#### D. Format de modulation

Différents formats de modulation tels que RZ, NRZ, CS-RZ peuvent être utilisés. Le format de modulation RZ est bien adapté pour les longues distances et le format de modulation NRZ est pour les communications à courte distance et il est moins cher que RZ format. Nous avons essayé d'illustrer quelques formats de modulations les plus répandus, voir le Tableau 2.1.

Format de modulation	variations	Débit (Gbits/s)	caractéristiques
NRZ	Amplitude : variable Phase : constante Polarisation : constante	2.5/10/40	Format de modulation le plus simple à implanter avec un bon rapport performance/complexité.
RZ	Amplitude : variable Phase : constante Polarisation : constante	10/40	Résistance accrue à la plupart des sources de distorsion lors de la transmission.
CS-RZ	Amplitude : variable Phase : variable Polarisation : constante	40	Résistance accrue à la plupart des sources de distorsion lors de la transmission.

Tableau 2.1. Comparaison entre les formats de modulation: NRZ, RZ et CS-RZ.

#### E. Les avantages et les inconvénients de modulation directe et externe

Le Tableau 2.2 présente les avantages et les inconvénients de ces deux types de modulation.

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

Tableau 2.2. Différents types de modulation [25].

### 2.3.4 Les amplificateurs optiques

Bien que l'atténuation d'une liaison optique soit très faible, le signal transmit qui va se propager via le canal, ne peut pas être détecté après quelques centaines de kilomètres de propagation. Pour pallier ce problème, des répéteurs (des amplificateurs optiques) essentiellement doivent être placés périodiquement tout au long de la liaison optique pour redonner de l'énergie au signal pour qu'il puisse être détecté de manière optimale [38].

Il existe principalement trois mécanismes physiques différents qui peuvent être utilisés pour amplifier un signal lumineux, tels que : les amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA pour Erbium-Doped Fiber Amplifiers), les amplificateurs Raman, et les amplificateurs à semi-conducteur (SOA pour Semi-conductor Optical Amplifiers).

#### A. Les amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA)

L'amplificateur à fibre dopée à l'erbium est le plus commun. Ils utilisent une fibre optique dopée pour amplifier un signal optique. En outre, ils sont habituellement liés à des lasers à fibre. Le signal à amplifier et le signal de pompage sont couplés dans la fibre dopée, ce signal est amplifié grâce à l'interaction avec le dopage des ions. Pour cela, le noyau d'une fibre de silice est dopé avec des ions erbium trivalent et peut être efficacement pompé par un laser à une longueur d'onde de 980 nm ou 1480 nm ; cela représente un gain dans la région de 1550 nm [39]. La Figure 3.6 ci-dessous montre le principe de fonctionnement et un schéma d'un EDFA.

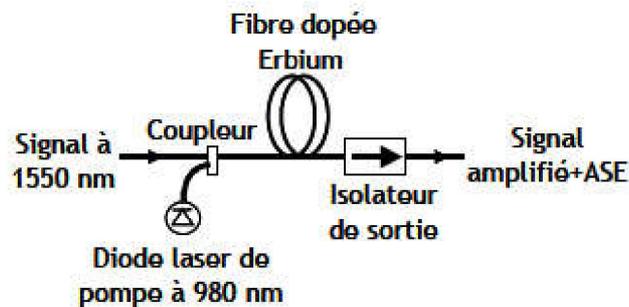


Figure 2.6. Schéma d'un amplificateur à fibre dopée Erbium.

#### B. Les amplificateurs Raman

Le principe de l'amplificateur Raman diffère radicalement aux autres types d'amplificateurs. Comme son nom l'indique, il repose sur la diffusion Raman stimulée (Stimulated Raman scattering, SRS), opérant des transferts d'énergie des basses longueurs d'onde vers des longueurs d'onde plus élevées.

Contrairement aux EDFA nécessitant des fibres dopées spécialement conçues pour cela, l'amplification Raman peut avoir lieu dans n'importe quelle fibre, et en particulier directement dans la

fibre de ligne. Qui plus est, l'augmentation Raman introduit moins du bruit dans le signal augmenté. À la différence des EDFA qui amplifient périodiquement le signal mais de manière discrète, les amplificateurs Raman permettent une amplification du signal continue dans la fibre de ligne [38].

### C. Les amplificateurs à semi-conducteur (SOA)

Les SOA sont des amplificateurs optiques conçus sur le principe de la diode laser. Ils agissent par le biais de l'émission stimulée au sein d'un semi-conducteur. Cependant, les technologies associées aux SOA ne sont pas encore suffisamment matures pour permettre à un SOA de se substituer à un EDFA, en particulier dans les systèmes longs distance et large bande, et à haut débit.

La fabrication de ce type d'amplificateur est le plus disponible sur le marché, mais présente l'inconvénient d'introduire plus du bruit. Il a un gain plus modeste que celui de l'amplificateur EDFA. Ces types d'amplificateurs sont plus utilisés dans les systèmes métropolitains, ou pour des opérations de routage ou de régénération optique [38-39].

### 2.4 Paramètres d'un émetteur optique

Dans cette partie, nous allons citer quelques paramètres qui caractérisent un émetteur optique :

- Surface d'émission : est la surface de la fenêtre d'émission, exprimée en mètres carré.
- Puissance d'émission : est la puissance émise par la surface d'émission, exprimée en dBm ou en mW. La puissance doit être mesurée à l'extérieur du système de transmission optique en espace libre et aussi près que possible des fenêtres d'émission de ce système.
- Divergence du faisceau ou  $\theta$  : est la valeur maximale de l'angle compris entre l'axe central du faisceau correspondant à la densité de puissance maximale et la direction correspondant à une densité de puissance inférieure de -3 dB. La divergence est exprimée en milli radian (mrad).
- La longueur d'onde ou  $\lambda$  : est donnée par la longueur d'onde centrale et par l'intervalle spectral. L'unité est le nanomètre [40].

### 2.5 Canal Optique Atmosphérique (FSO)

La liaison optique en espace libre est utilisée pour transmettre le signal de l'extrémité émettrice à l'extrémité réceptrice à travers le canal de propagation qui constitue le milieu atmosphérique. C'est un milieu très complexe et dynamique pouvant affecter les caractéristiques du faisceau laser émis. Les systèmes FSO sont soumis à un certain nombre de défis liés pour la plupart aux facteurs environnementaux et plus particulièrement aux effets de l'atmosphère sur la propagation du faisceau émis. La propagation de l'onde lumineuse dans l'atmosphère est affectée principalement par la diffusion et l'absorption du rayonnement des particules et les molécules composant le milieu [41]. Les liaisons FSO sont ainsi soumises à des contraintes pénalisantes imposées par le milieu de propagation atmosphérique qui ne constitue pas un milieu idéal de propagation en raison de la variation spatio-

temporelle de ses caractéristiques physiques et de la diversité de ses constituants. Ces contraintes entraînent une extinction du signal optique au cours de sa propagation et donc une limitation de la portée. L'extinction atmosphérique est causée par un certain nombre de phénomènes sélectifs en longueurs d'onde : l'absorption moléculaire caractérisée par une forte dépendance spectrale, la diffusion moléculaire (diffusion Rayleigh), l'extinction (absorption et diffusion) par les particules en suspension (aérosols), en précipitation (pluie, neige, etc.), et la turbulence atmosphérique due aux variations spatio-temporelles de l'indice de l'air (scintillations, fluctuation spatiale du faisceau, etc.) [25].

## 2.6 Récepteurs optoélectroniques

Le récepteur aide à récupérer les données transmises après la propagation atmosphérique, généralement noté Rx. Le récepteur est équipé notamment d'un détecteur constitué d'une ou plusieurs photodiodes permettant la conversion du signal optique en signal électrique. Les paramètres essentiels pour choisir un photo-détecteur vis-à-vis des exigences de transmissions optiques sont alors [42-43] :

- Une bonne sensibilité à la longueur d'onde de transmission (850 – 1550 nm) ;
- Une réponse rapide ;
- Un fort rapport signal sur bruit ;
- Insensible aux variations de température.

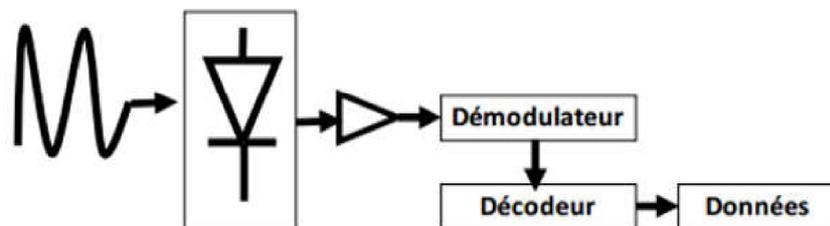


Figure 2.7. Bloc de récepteur optique [25].

Les photo-détecteurs utilisés dans les systèmes optiques sans fil sont généralement fabriqués à base de photodiodes PIN ou de photodiodes à avalanche.

### 2.6.1 Photodiodes PIN

Les photodiodes PIN (Positive Intrinsic Negative). Ce sont également des composants à semi-conducteurs qui possèdent une région intrinsèque (faiblement dopée) prise en sandwich entre une région de type P et une région de type N. Cependant, lorsqu'il est polarisé en inverse, ce composant émet

un courant proportionnel à la puissance optique incidente. En outre, les photodiodes PIN sont les plus utilisés, car elles sont peu coûteuses et simples à utiliser avec une performance satisfaisante.

### 2.6.2 Photodiodes à avalanche

Les photodiodes à avalanche (APD), sont des détecteurs à semi-conducteur à gain interne, ce dernier augmentant la sensibilité de détection par rapport aux détecteurs PIN. Le gain interne donne de meilleurs résultats du rapport signal sur bruit, par rapport à l'utilisation d'un étage d'amplification externe, tel qu'un circuit du transistor externe [27]. Les photodiodes APD sont beaucoup mieux pour les applications sur longues distances, sa grande sensibilité fournit une marge supplémentaire au lien. Toutefois, les photodiodes APD nécessitent une tension stable de haute polarisation, et elles sont plus chères que les diodes PIN [12].

## 2.7 Paramètres d'un récepteur optique

Dans cette partie, nous allons citer quelques paramètres qui caractérisent un récepteur optique, à savoir :

- Surface de réception : est la surface complète de la fenêtre de réception, exprimée en mètres carré. La technique de détection utilisée au récepteur dépend sur le format de modulation. Toutes les techniques de détection ne sont pas adaptées au format de modulation, par exemple, les récepteurs de détection directe sont insensibles à la phase et informations de polarisation.
- La sensibilité : est le niveau optique minimal pour une qualité de transmission des données considérées. L'unité est le dBm.
- La sensibilité à saturation : est le niveau optique maximal pour une qualité de transmission des données considérées, avec et sans réglage automatique de l'affaiblissement. La différence entre la sensibilité à saturation et la sensibilité donne la gamme dynamique.
- Champ de vision : est l'angle entre l'axe central et la direction à  $-3$  dB. La valeur peut être exprimée comme un demi-angle ou comme un angle total, mais il faut le préciser. L'unité utilisée est le milliradian (mrad) [40].

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé tous les composants entrant dans un système de transmission optique en espace libre. Nous avons aussi présenté quelques techniques dans la modulation du faisceau laser. Dans le chapitre suivant, les résultats et les interprétations de la conception et l'évaluation des performances d'un système FSO pour les télécommunications optiques à haut débit en utilisant les différents formats de modulations seront présentés.

## CHAPITRE 3

# Simulation d'une chaîne de transmission optique

### 3.1 Introduction

Les systèmes de communication optique en espace libre (FSO) ont des caractéristiques inhérentes pour supporter les demandes du réseau. Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude approfondie sur une liaison optique point à point sous un canal FSO, à chaque fois Tx émet un signal optique avec un débit de données dans la voie descendante entre 2.5 à 10 Gbit/s, la portée maximale du système conçu est de 3000 m sans correction, en plus les effets atmosphériques sont inclus. La théorie précédente que nous avons accomplie, nous a permis de proposer une simulation introduite sous le logiciel industriel *OptiSystem*. Ce chapitre est organisé comme suit: dans la section 3.2, nous commençons à présenter le logiciel *OptiSystem*. Dans la section 3.3, nous présenterons quelques paramètres d'analyse d'une chaîne de transmission optique. La performance d'une liaison optique FSO à haut débit que nous avons proposée et les résultats de la simulation ont été discutés et interprétés dans la section 3.4. La conclusion de nos résultats simulés sera conclue à la section 3.5.

### 3.2 Présentation du logiciel *OptiSystem*

Les systèmes des télécommunications optiques présentent une complexité dans leur modélisation et leur simulation. Le design et l'analyse des systèmes incluent des composants non-linéaires et des sources non-gaussiennes du bruit, ce qui ne facilite pas la tâche au concepteur. *OptiSystem* vient résoudre ces problèmes tant par la simplicité de son utilisation que par la grande variété de sa bibliothèque de composants. *OptiSystem Design* est un paquet destiné à la simulation des communications optiques en mode simulation, ce logiciel innovateur permet la conception, le test et l'optimisation virtuelle des liaisons optiques de tous types, voir la figure 3.1.



Figure 3.1. Logo d'*OptiSystem*.

*OptiSystem* est un environnement interactif qui allie des outils numérique efficaces à des fonctionnalités graphique puissantes et une interface utilisateur conviviale. Il permet de :

- Concevoir un système ;
- Connecter les composants ;
- modifier les paramètres des composants.

*OptiSystem* contient une fenêtre principale répartie en plusieurs parties (voir la figure 3.2) :

- Vue d'ensemble du projet : permet la visualisation miniature du *layout* en cours d'édition ;
- Bibliothèque : une base de données de divers composants existants ;
- Editeur du *layout* : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception ;
- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composant correspondant au projet en cours ;
- Groupe de paramétrage : permet le paramétrage global du projet en cours et la simulation ;
- Fenêtre de sortie : lors de la simulation, cette fenêtre permet la visualisation des diverses phases de la simulation ou des messages d'erreurs [1].

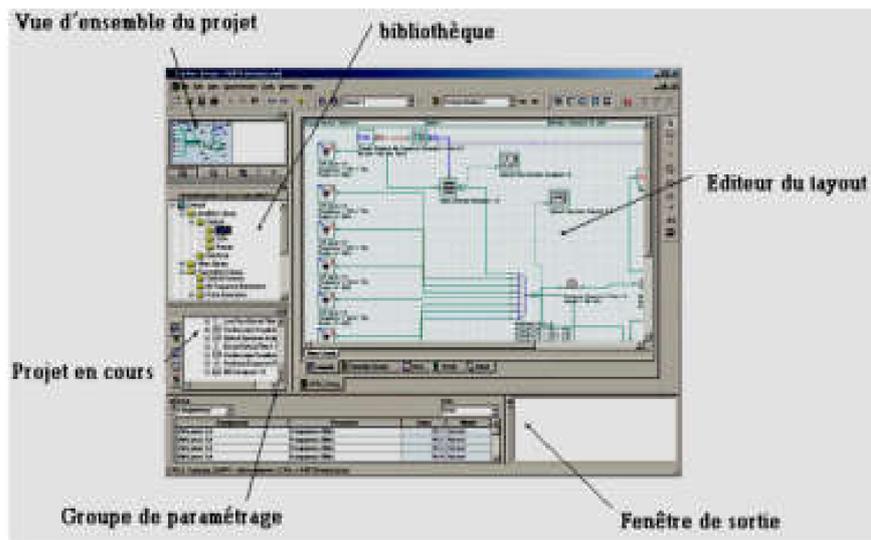


Figure 3.2. La fenêtre principale du logiciel.

Afin de concevoir un projet dans logiciel, comme illustré dans la figure 3.3, il faut glisser le composant de la bibliothèque vers le *layout*.

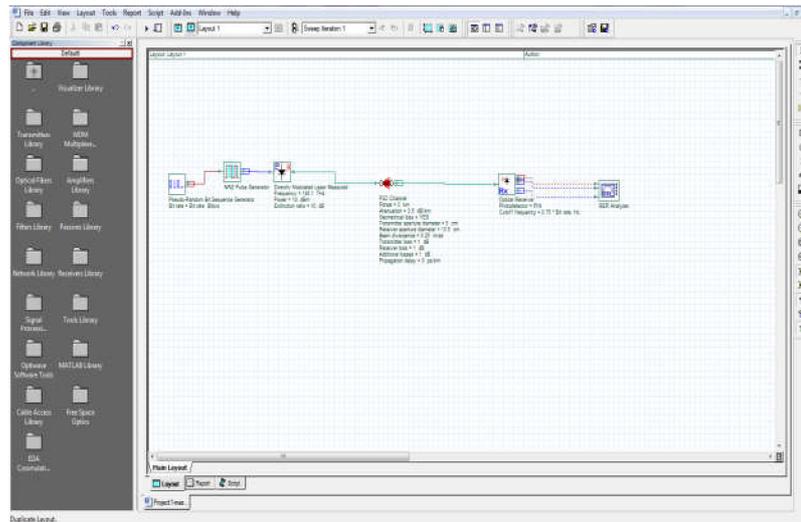


Figure 3.3. Projet sur logiciel *OptiSystem*.

*OptiSystem* permet aussi le paramétrage pour chaque composant défini dans le *layout*. En effet, un double-clic sur le composant permet l'affichage de ses paramètres, voir la figure 3.4.

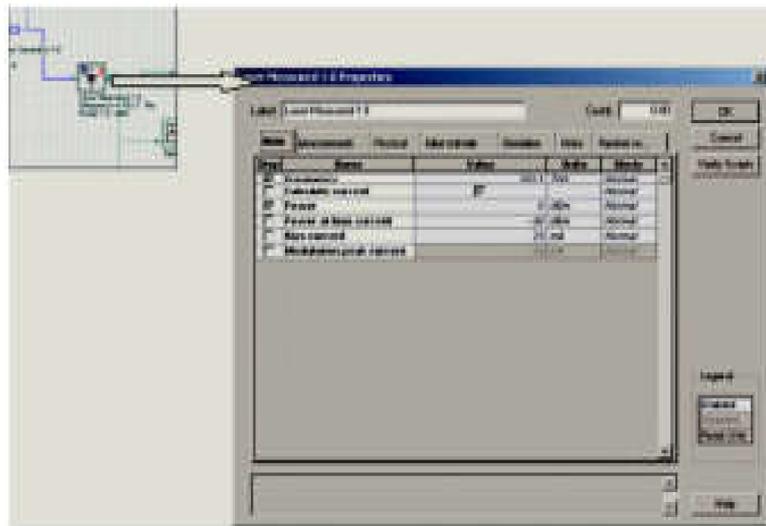


Figure 3.4. Paramétrage d'un composant.

Lorsque vous créez un nouveau design, vous devez définir les paramètres de simulation globale. Ces paramètres sont essentiels à la simulation. Pour obtenir ces paramètres il faut faire un simple double-clic dans le *layout*, voir la figure 3.5.

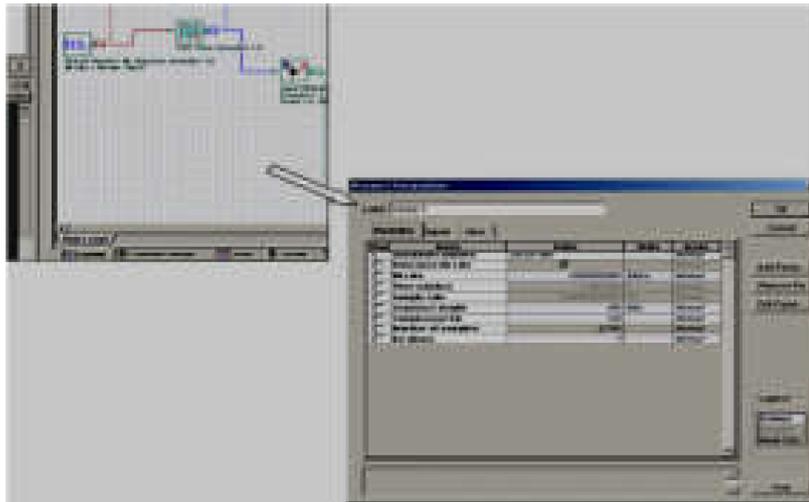


Figure 3.5. Modification des paramètres du *layout*.

Les trois paramètres essentiels dans cette fenêtre sont :

- Le débit binaire;
- Séquence longueur;
- Des échantillons par bit (samples per bit).

A partir de ces paramètres on peut calculer d'autres paramètres à savoir:

- Le temps de simulation (time window) = Séquence longueur \* (1/ Le débit binaire);
- Nombre des échantillons = Séquence longueur \* Des échantillons par bit;
- Fréquence d'échantillonnage = Nombre des échantillons/ Le temps de simulation;

Pour lancer la simulation, il suffit de saisir ou bien appuyer simultanément Ctrl+F5 (voir la figure 3.6) ou bien accéder directement par le menu fichier puis Calculate...

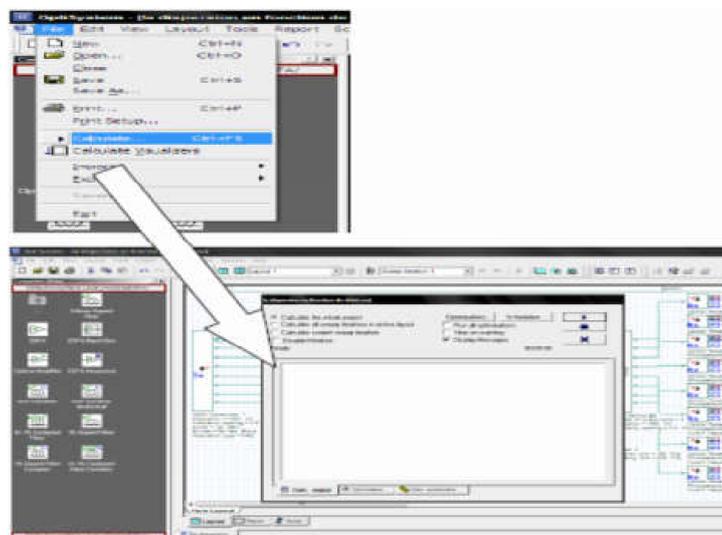


Figure 3.6. Démarrage de la simulation.

Enfin, pour visualiser les diverses analyses, un double-clic sur l'appareil de mesure pour afficher la simulation en 2D ou en 3D, voir la figure 3.7.

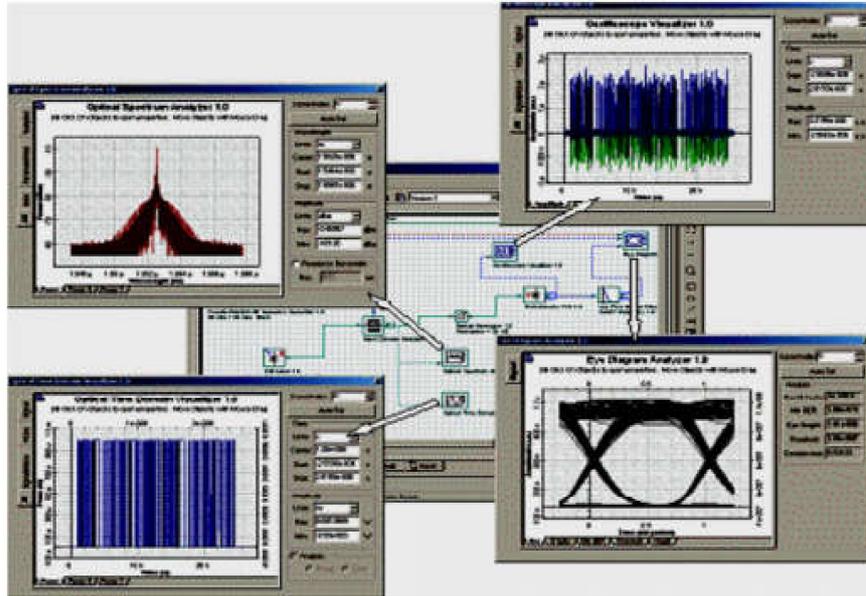


Figure 3.7. Affichage des résultats de la simulation.

### 3.3 Analyse d'une chaîne de transmission optique

Pour définir la qualité d'une transmission optique, il existe plusieurs paramètres utilisés dans la conception et l'analyse d'une liaison donnée. Ces paramètres définissent la qualité et l'efficacité de transmission optique.

#### 3.3.1 Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est un mode de représentation temporelle d'un signal optique. Il consiste en une superposition de l'ensemble des symboles de la séquence temporelle sur une fenêtre de largeur égale à un ou quelques temps-bits. Il est obtenu à partir d'un oscilloscope synchronisé sur la fréquence d'horloge du signal. Ainsi, le diagramme de l'œil permet d'avoir un aperçu rapide et global de la qualité du signal, notamment en permettant de visualiser simultanément tous les états qu'il peut prendre et toutes les transitions entre ces différents états. Le diagramme de l'œil permet donc de juger l'état de pureté ou de dégradation du signal, et même de le quantifier au moyen de mesures d'ouverture de l'œil, voir la figure 3.8.

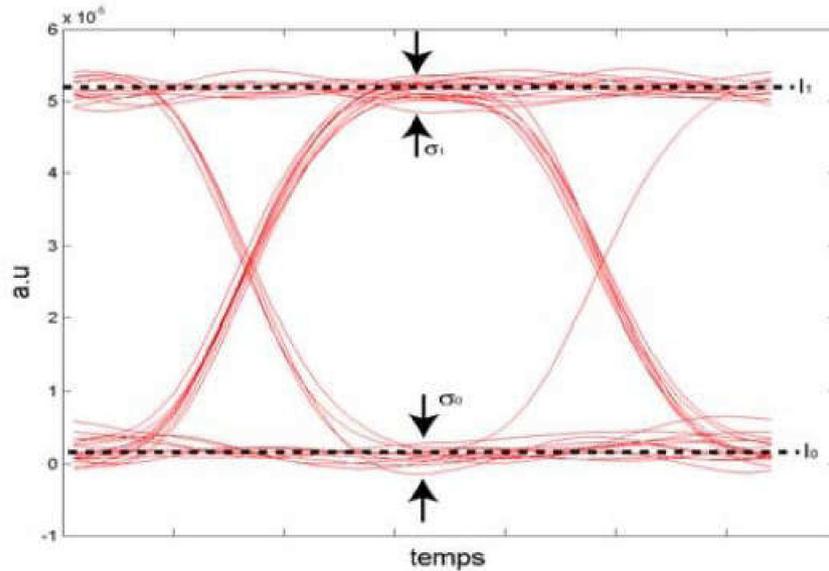


Figure 3.8. Diagramme de l'oeil [44,28].

### 3.3.2 Taux d'erreur binaire « TEB ou BER »

Lorsque nous transmettons des données numériques, le critère le plus intuitif quant à la caractérisation de la qualité du signal transmis est le taux d'erreurs binaires, ou BER (Bit Error Ratio) [31]. Des appareils spécialisés engendrent des séquences aléatoires et comparent le signal en sortie de la liaison optique avec le signal d'entrée. Le TEB est obtenu en divisant le nombre d'erreurs par le nombre total de bits. Compte tenu de la haute qualité des transmissions optiques, on spécifie des TEB jusqu'à  $10^{-12}$  ce qui correspond à un bit erroné pour mille milliards de bits transmis. Il faut donc effectuer les mesures pendant un intervalle du temps suffisamment long afin d'obtenir une mesure fiable [28,38]. Il se définit comme suit :

$$\text{TEB} = \frac{\text{Nombre de bit erronés}}{\text{Nombre de bit transmis}} \quad (3.1)$$

Un système est généralement considéré sans erreur, si ce BER est inférieur à une valeur d'au plus  $10^{-9}$ ,  $10^{-12}$  ou  $10^{-15}$  suivant les systèmes présentés [31].

### 3.3.3 Le Facteur de qualité « Q »

Le facteur Q, ou facteur de qualité, est un autre critère de qualité d'un signal optique. Il est obtenu à partir des statistiques de bruit (moyennes et écarts-types) des niveaux « 1 » et « 0 » du signal à détecter [28,31]. Le facteur Q est défini par :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.2)$$

Où  $I_1$  et  $I_0$  désignent les valeurs moyennes des niveaux « 1 » et « 0 » du signal, et  $\sigma_1$  et  $\sigma_0$  désignent leurs écarts-types respectifs (voir la figure 3.8). En effet, dans le cas du bruit gaussien, le BER est relié au facteur Q par la formule suivante :

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q} \quad (3.3)$$

Où  $\operatorname{erfc}$  désigne la fonction d'erreur complémentaire, soit :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-y^2} dy \quad (3.4)$$

Le facteur Q est usuellement exprimé en dB en utilisant la formule suivante :

$$Q_{\text{dB}} = 20 \log_{10}(Q) \quad (3.5)$$

### 3.4 Performances d'une liaison FSO à haut débit

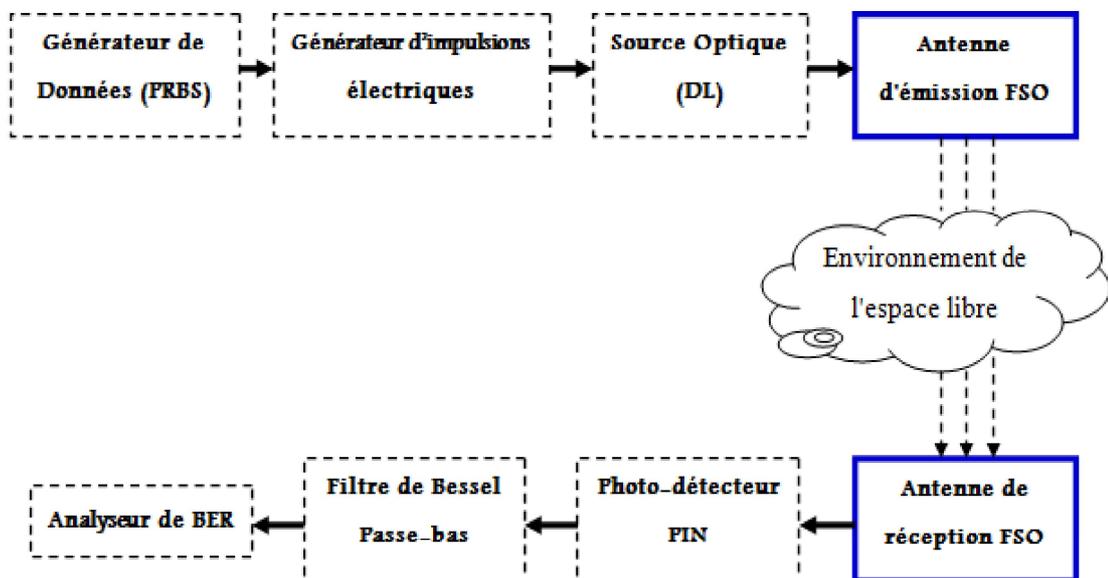
La figure 3.9 ci-dessous présente la configuration de simulation d'une liaison optique simple à haut débit FSO. Dans une liaison optique FSO, les émetteurs-récepteurs optiques sont communiqués à travers l'air afin de former des liaisons directes point à point. L'émetteur optique (voir la figure 3.9) convertit le signal électrique en un signal optique et envoie à travers l'atmosphère (espace libre). D'autre côté, le récepteur optique convertit le signal optique en un signal électrique (voir la figure 3.9). La performance de la liaison FSO est estimée via deux métriques : le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur de qualité Q.

Cependant, la partie d'émission se compose de : générateur de données (PRBS), générateur d'impulsions électriques et une source optique (DL). Le générateur d'impulsions électriques fournit un format de modulation sur des données numériques qui sont distribuées par un générateur binaire pseudo-aléatoire PRBS (Pseudo-random Binary Sequence), où le débit de données entier est émis au format numérique 0 et 1. La puissance optique de l'émetteur est de 10 mW avec une longueur d'onde de 1552.524 nm. En outre, les caractéristiques de la liaison FSO sont résumées dans le Tableau 3.1. À la fin de la liaison FSO, nous trouvons un récepteur optique qui se compose d'un détecteur PIN à haute sensibilité pour effectuer l'opération inverse de l'émetteur optique. Après celui-ci, nous trouvons un filtre de Bessel passe bas avec une fréquence de coupure 0.75 fois la fréquence de rythme, ce filtre est utilisée pour passer les basses fréquences limitées. Les données transmettent dans le domaine numérique 0 et 1 pouvant

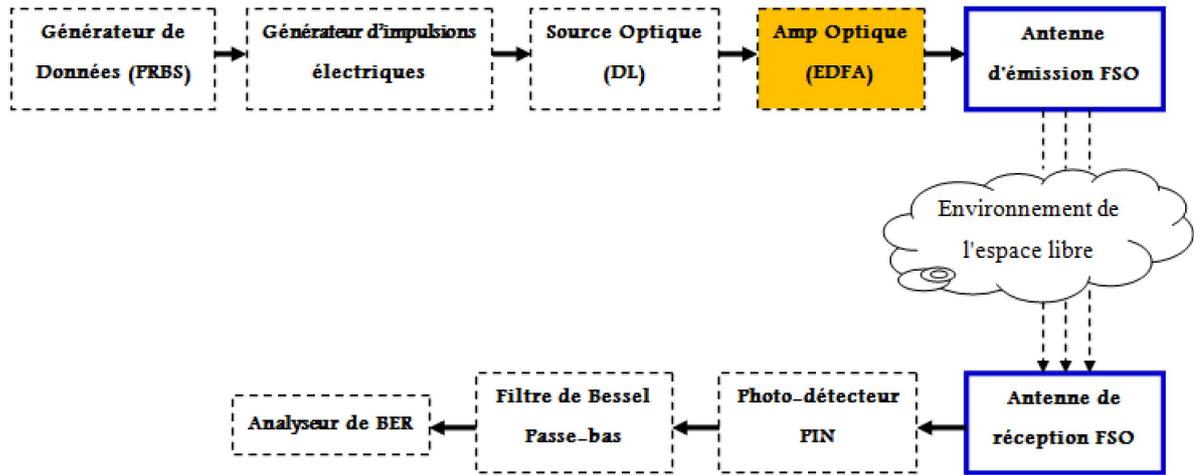
affectées par un bruit, et par conséquent l'interférence inter-symbole peut se produire. Pour mesurer les erreurs de transmission, nous utilisons un analyseur de BER.

	Paramètres	Descriptions
Paramètres du signal transmis	Débit de transmission variable	2.5 à 10 Gbits/s
	Longueur des séquences	128 bits
	Nombre d'échantillons par bit	64 échantillons
Canal FSO	Distance de la liaison FSO	3 000 m
	Diamètre d'ouverture d'émetteur FSO	5 cm
	Diamètre d'ouverture de récepteur FSO	13.5 cm
	Angle de divergence	0.25 mrad
	Atténuation	3.5 dB/km
	Perte d'émetteur	1 dB
	Perte de récepteur	1 dB
	Pertes supplémentaires	1 dB
	Délai de propagation	0 ps/km
Perte géométrique	Oui	

Tableau 3.1. Paramètres de simulation pour le premier scénario.



(a) Liaison FSO sans amplification



(b) Liaison FSO avec amplification

Figure 3.9. Configuration d'une liaison optique simple à haut débit FSO : premier scénario.

### 3.4.1 Impact du débit de données sur une liaison FSO simple à haut débit.

#### A. Modulation directe avec différents formats de modulation

La figure 3.10 ci-dessous illustre la performance de BER en fonction de débit de données avec une liaison de 3000 m. Dans l'analyse, nous avons observé que, si le débit de données augmente, le BER également augmente. Dans ce cas-là, nous constatons que, la liaison FSO présente une dégradation en termes de performances et de fiabilités. Par exemple, avec les débits de données spécifiques suivants : 2.5, 6.25 et 10 Gbit/s. Les valeurs de BER obtenues avec un format de modulation NRZ sont :  $1.44 * 10^{-22}$ ,  $3.42 * 10^{-10}$ ,  $5.08 * 10^{-07}$ , respectivement.

En outre, nous observons aussi que les performances du système s'améliorent lorsque le format de modulation GPG utilisé, voir la figure 3.10. À titre d'exemple, pour un débit de données de 7.5 Gbit/s, les valeurs de BER obtenues avec différents formats de modulation, selon leurs degrés de performance, sont :  $1.03 * 10^{-06}$  (RZ),  $1.03 * 10^{-07}$  (RCPG),  $2.69 * 10^{-08}$  (HPG),  $1.18 * 10^{-08}$  (NRZ),  $5.39 * 10^{-09}$  (GPG), respectivement.

La figure 3.11 illustre le facteur de qualité Q en fonction de débit de données pour une liaison de 3000 m. Selon la figure 3.11, nous observons que la qualité du système FSO se détériore aussi de manière significative lorsque le débit de données augmente. Par exemple, pour les débits de données spécifiques suivants : 2.5, 6.25 et 10 Gbits/s. Les valeurs de facteur-Q avec un format de modulation NRZ sont : 9.70, 6.16 et 4.88, respectivement. En outre, la qualité du signal reçu au niveau Rx s'améliore lorsque le format de modulation GPG est utilisé. À titre d'exemple, pour un débit de données de 7.5 Gbit/s, les valeurs de facteur-Q obtenues avec différents formats de

modulation, selon leurs degrés de performance, sont : 4.74 (RZ), 5.19 (RCPG), 5.43 (HPG), 5.58 (NRZ), 5.71 (GPG), respectivement.

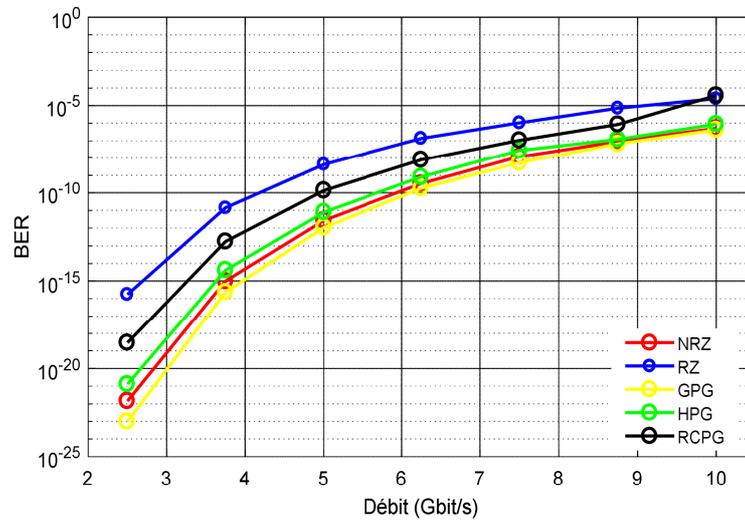


Figure 3.10. BER vs débit de données sans amplification.

Comme conclusion, nous avons enregistré que, lorsque nous utilisons le format de modulation GPG, la performance de la liaison FSO avec l'utilisation de modulation directe présente une bonne fiabilité.

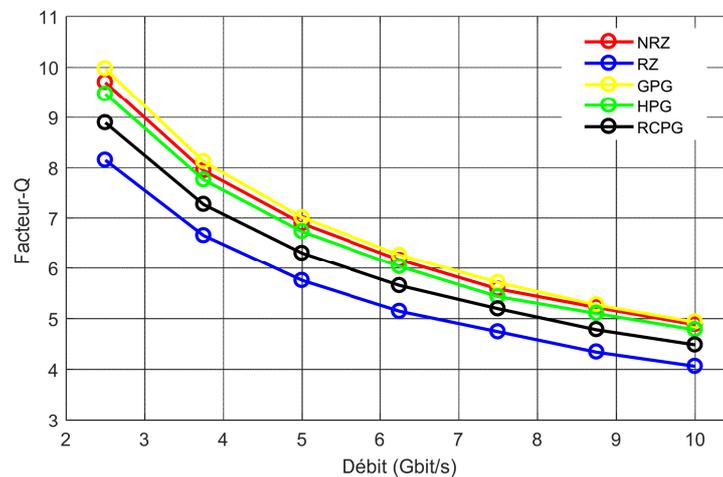


Figure 3.11. Facteur-Q vs débit de données sans amplification.

L'atténuation du signal optique au cours de la propagation représente un défi majeur dans le contexte des systèmes de communication optique à haut débit. De ce fait, nous avons proposé d'ajouter un amplificateur optique de type EDFA (gain : 5 dB et facteur de bruit : 6 dB) à la liaison FSO qui a été précédemment présentée. Cependant, les figures 3.12 et 3.13 illustrent la

performance de BER et facteur de qualité en fonction de débit de données pour une liaison de 3 000 m, respectivement. D'après les résultats obtenus, nous avons observé que, la liaison FSO présente de bonnes performances, en termes de BER et facteur-Q, et ceci lorsque nous avons utilisé un amplificateur optique EDFA, voir le tableau 3.2 ci-dessous.

Formats de modulation	Facteur-Q sans EDFA	Facteur-Q avec EDFA	BER sans EDFA	BER avec EDFA
NRZ	4.88	13.22	$5.08 * 10^{-07}$	$3.19 * 10^{-40}$
RZ	4.06	14.11	$2.41 * 10^{-05}$	$1.51 * 10^{-45}$
GPG	4.93	14.29	$4.06 * 10^{-07}$	$1.14 * 10^{-46}$
HPG	4.78	14.80	$8.62 * 10^{-07}$	$6.55 * 10^{-50}$
RCPG	4.48	12.48	$3.65 * 10^{-05}$	$4.70 * 10^{-36}$

Tableau 3.1. Performance de la liaison FSO à 10 Gbit/s.

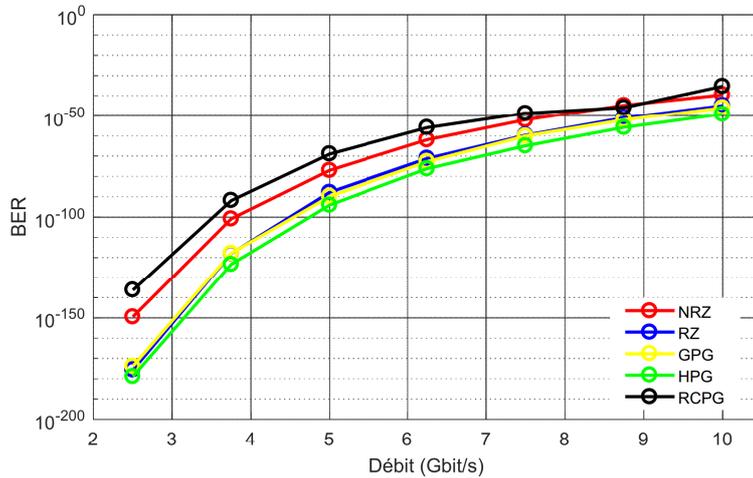


Figure 3.12. BER vs débit de données avec amplification.

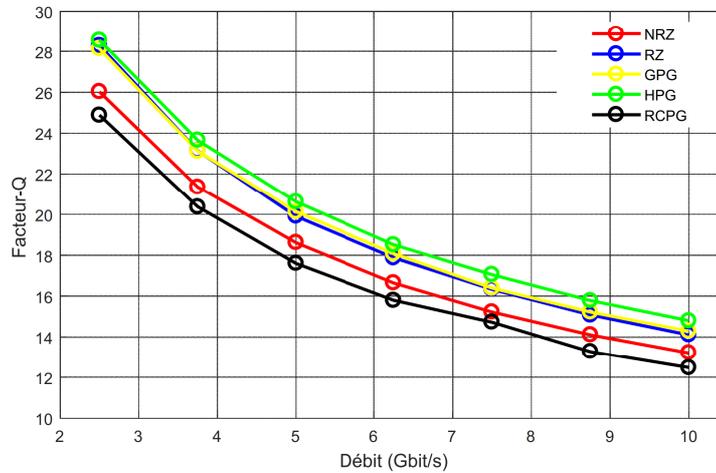


Figure 3.13. Facteur-Q vs débit de données avec amplification.

Comme conclusion, nous avons enregistré que, lorsque nous utilisons le format de modulation HPG, la performance de la liaison FSO en utilisant la modulation directe présente une bonne fiabilité, mais à condition que nous utilisons un amplificateur optique EDFA. En plus, nous avons conclu que la portée de liaison FSO peut être augmentée jusqu'à 3 600 m, puisque la valeur du BER obtenu, est autour de  $10^{-11}$ , et cela, avec tous les formats de modulation proposée.

### B. Modulation Externe avec deux formats de modulation GPG et HPG

Dans cette partie, nous visons à analyser la performance d'une liaison FSO, avec l'utilisation de modulation externe, tels que : modulateur mach-zehnder (MZM) et modulateur électro-absorbant (EAM), où nous avons sélectionné deux formats de modulation, qui ont été étudiés et évalués dans le cas précédent, tels que : GPG et HPG. Cependant, le système utilisé dans cette partie est le même qui a été présenté dans la première partie, sauf que nous avons changé le type de modulation, plus, la portée de la liaison FSO est fixée à 3 600 m, voir la figure 3.14.

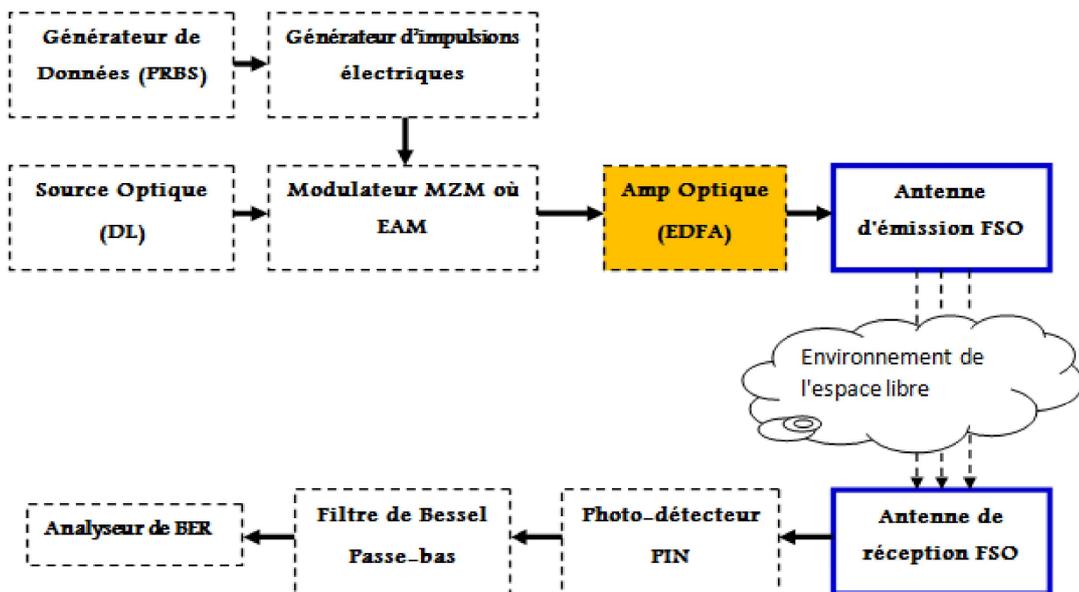


Figure 3.14. Configuration d'une liaison optique simple à haut débit FSO en utilisant une modulation externe : deuxième scénario.

Dans cette étude, la figure 3.15 présente une comparaison entre deux modulations externes MZM et EAM en termes de BER, où deux formats de modulation GPG et HPG sont utilisés. Selon, les résultats obtenus, nous observons que la performance de la liaison FSO est mieux lorsque nous utilisons la modulation externe MZM, surtout si le format de modulation GPG est effectué. À titre d'exemple, pour un débit de données de 7.5 Gbit/s, les valeurs de BER obtenues avec l'utilisation de la modulation MZM, sont :  $8.527 * 10^{-11}$  (HPG),  $1.337 * 10^{-14}$

(GPG), respectivement. Par contre, si la modulation EAM est utilisée, les valeurs de BER obtenues, sont :  $9,908 \times 10^{-07}$  (HPG),  $4,443 \times 10^{-11}$  (GPG), respectivement.

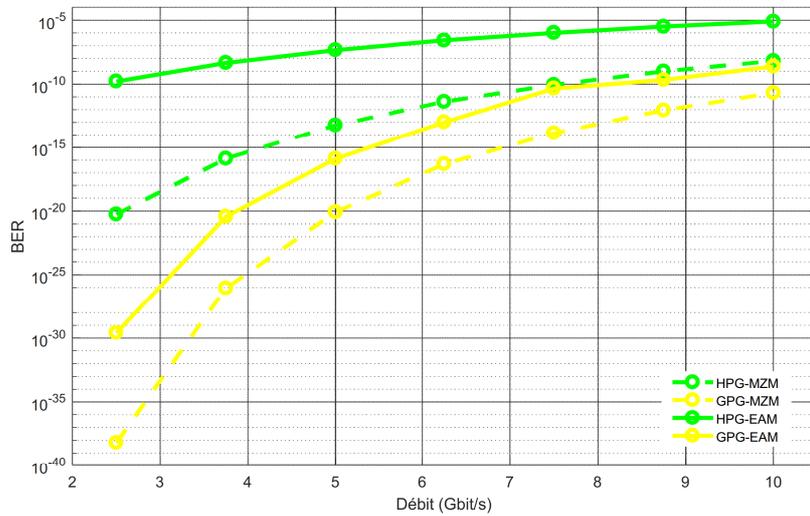


Figure 3.15. BER vs débit de données avec amplification, en utilisant un modulateur externe.

De plus, nous avons conclu la même observation concernant la qualité de la liaison FSO, que la modulation MZM et le format de modulation GPG fournissent une bonne fiabilité pour un système FSO, et cela, selon les résultats obtenus du facteur de qualité (voir la figure 3.16). Par exemple, avec même débit de données, mentionné précédemment, les valeurs de facteur-Q avec l'utilisation de la modulation MZM, sont : 6.384 (HPG), 7.613 (GPG), respectivement. Par contre, si la modulation EAM est utilisée, les valeurs de facteur-Q sont : 4.755 (HPG), 6.685 (GPG), respectivement.

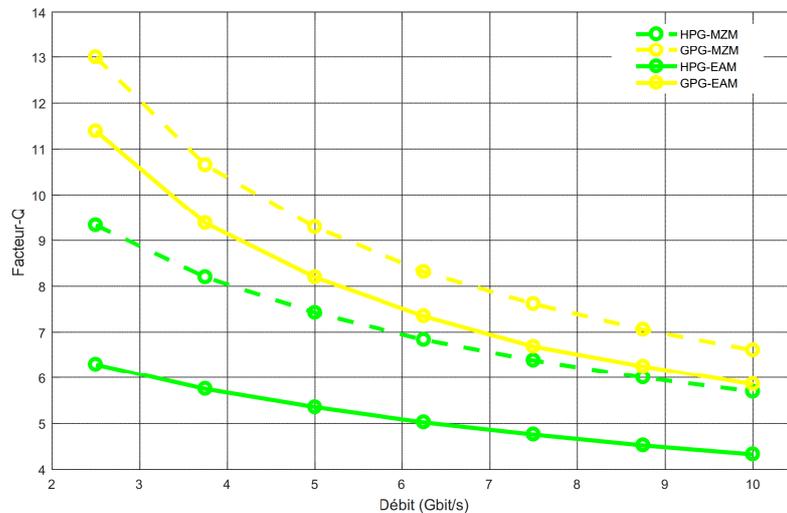


Figure 3.16. Facteur-Q vs débit de données avec amplification, en utilisant un modulateur externe.

Comme conclusion, nous avons enregistré que, même si nous utilisons un modulateur EAM pour le format de modulation GPG, la performance de la liaison FSO est meilleure par rapport au HPG-MZM et HPG-EAM. De ce fait, le format de modulation GPG est parfaitement adapté avec la modulation externe, soit avec MZM ou EAM.

### 3.4.2 Impact de la puissance optique de Tx sur une liaison FSO simple à haut débit

#### A. Modulation Externe avec deux formats de modulation GPG et HPG

Après les résultats obtenus précédemment à propos de l'impact de la variation de débit de données sur la liaison FSO, nous avons constaté qu'à partir de 10 Gbit/s, la performance de système FSO présente une dégradation significative en termes de qualité de transmission. Et ceci, pour les deux types de modulation MZM et EAM qui ont été utilisés. Pour cela, nous avons pensé à fixer la portée de liaison FSO à 3 600 m, avec un débit de données de 10 Gbit/s, et nous varions la puissance optique de Tx à partir de 10 mW jusqu'à 50 mW, pour étudier l'impact de la variation de la puissance optique de Tx sur la liaison FSO.

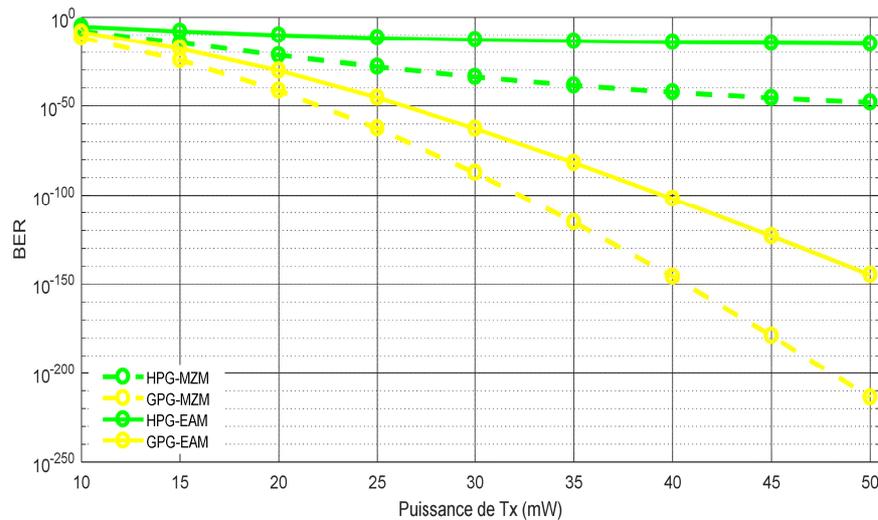


Figure 3.17. BER vs puissance optique de Tx avec amplification, en utilisant un modulateur externe.

Dans cette étude, les figures 3.17 et 3.18 présentent l'effet de variation de la puissance optique de Tx sur la liaison FSO, où nous comparons deux types de modulation externe, à savoir : MZM et EAM, avec l'utilisation de deux formats de modulation GPG et HPG.

Cependant, la figure 3.17 montre la performance de BER en fonction de la puissance optique de Tx. D'après les résultats obtenus dans la figure 3.17, nous observons que, la performance de la liaison FSO est meilleure lorsque la puissance optique de Tx s'augmente. En outre, nous notons que, toujours MZM-GPG donne des meilleurs résultats. Comme exemple, les valeurs de BER obtenues avec l'utilisation de MZM-GPG, sont :  $2.21 \times 10^{-12}$  (10 mW),  $3.57 \times$

$10^{-42}$  (20 mW),  $4.23 * 10^{-88}$  (30 mW),  $1.59 * 10^{-146}$  (40 mW) et  $1.9 * 10^{-214}$  (50 mW), respectivement. Par contre, si EAM est utilisé pour le même format de modulation GPG, les valeurs de BER obtenues sont :  $2.78 * 10^{-09}$  (10 mW),  $5.77 * 10^{-31}$  (20 mW),  $2.52 * 10^{-63}$  (30 mW),  $1.11 * 10^{-102}$  (40 mW) et  $1.72 * 10^{-145}$  (50 mW), respectivement. En parallèle, la figure 3.18 ci-dessous montre les résultats du facteur de qualité en fonction de la puissance optique de Tx. Il est tout à fait clair que, MZM-GPG donne des meilleurs résultats, par rapport au MZM-HPG, EAM-GPG et EAM-HPG. À titre d'exemple, les valeurs de facteur-Q obtenues avec l'utilisation de MZM-GPG, sont : 6.92 (10 mW), 13.55 (20 mW), 19.86 (30 mW), 25.75 (40 mW) et 31.23 (50 mW), respectivement. En revanche, si EAM est utilisé pour le même format de modulation GPG, les valeurs de facteur-Q obtenues, sont : 5.82 (10 mW), 11.51 (20 mW), 16.76 (30 mW), 21.48 (40 mW) et 25.65 (50 mW), respectivement.

On note que généralement un système de communication optique doit avoir un BER compris entre  $10^{-9}$  et  $10^{-12}$ . Pour cela, nous citons quelques puissances optiques de Tx avec des valeurs de BER allant de  $10^{-9}$  jusqu'à  $10^{-12}$ , voir le tableau 3.3.

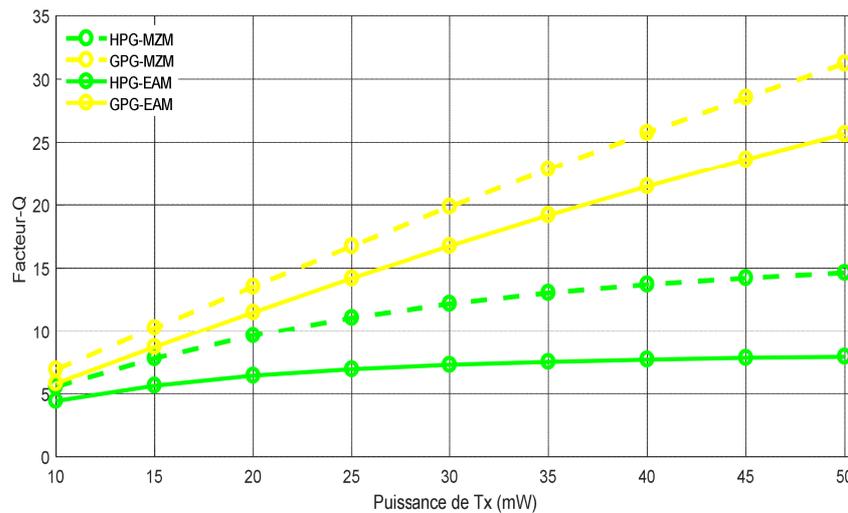


Figure 3.18. Facteur-Q vs puissance optique de Tx avec amplification, en utilisant un modulateur externe.

	BER	Puissance optique de Tx
MZM-GPG	$2.21 * 10^{-12}$ à $1.032 * 10^{-12}$	10.00 à 10.13 (mW)
EAM-GPG	$2.78 * 10^{-9}$ à $1.069 * 10^{-12}$	10.00 à 11.84 (mW)
MZM-HPG	$9.941 * 10^{-9}$ à $1.004 * 10^{-12}$	10.11 à 13.08 (mW)
EAM-HPG	$9.932 * 10^{-9}$ à $1.018 * 10^{-12}$	14.85 à 26.25 (mW)

Tableau 3.3. Valeurs de BER vs puissance optique de Tx.

### 3.4.3 Impact de la longueur d'onde et du débit de données sur une liaison hybride FSO-FO-FSO à haut débit.

Dans cette partie, nous avons proposé une chaîne de transmission optique hybride, qui se compose de trois milieux de propagation : FSO-FO-FSO, voir la figure 3.19. Dans la partie d'émetteur et de récepteur optiques, nous avons utilisé, les mêmes configurations qui ont été déjà utilisées dans la figure 3.14. Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau 3.4.

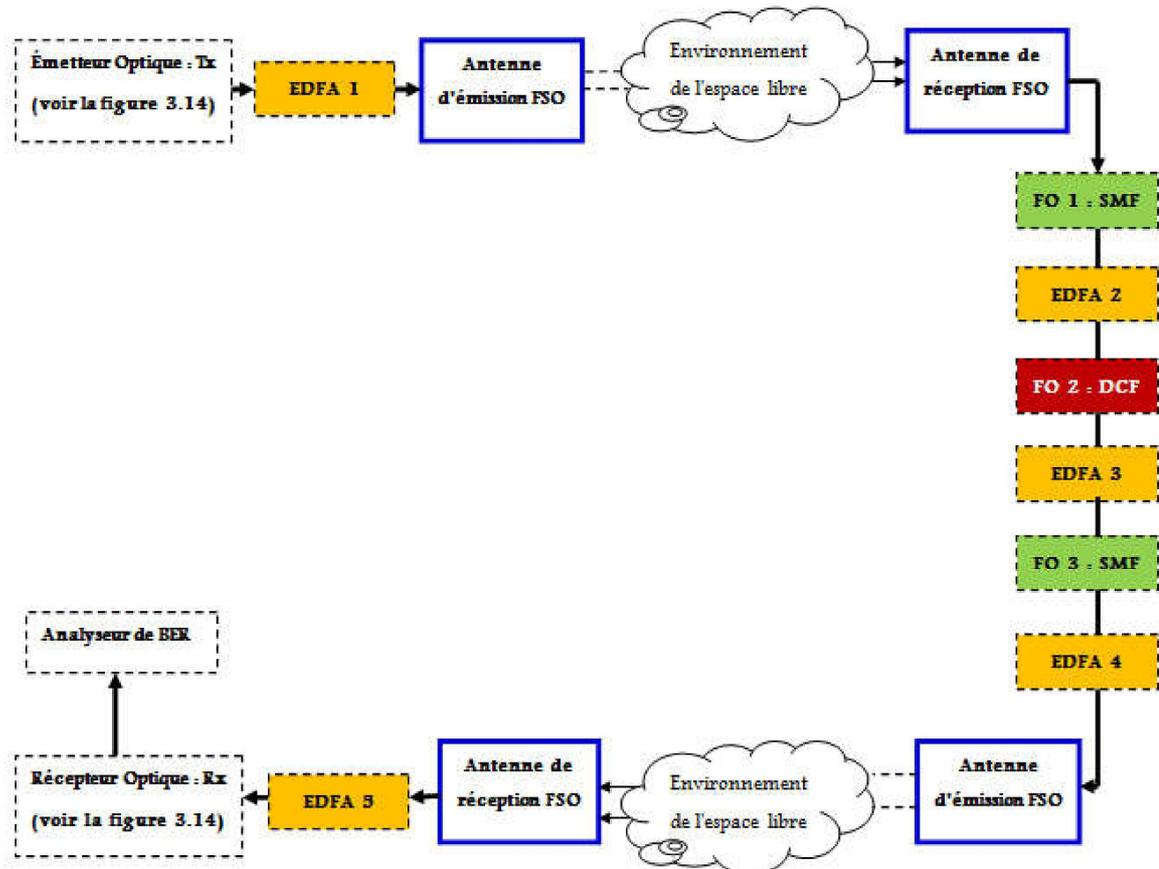


Figure 3.19. Architecture proposée : FSO-FO-FSO : troisième scénario.

L'objectif d'analyser la configuration proposée dans la figure 3.19, est de voir l'impact du débit de données, lorsque nous utilisons trois milieux de propagation en cascade, où nous exploitons des différentes longueurs d'onde qui sont situées dans la bande C, à savoir : 1560.606 nm, 1562.232 nm, 1563.862 nm et 1565.495 nm. À chaque fois, ces signaux monochromatiques sont injectés dans un modulateur externe de type MZM, ce dernier génère des signaux GPG avec des longueurs de séquence 128 bit.

	Paramètres	Descriptions
Paramètres du signal transmis	Débit de transmission variable	15 Gbits/s
	Longueur des séquences	128 bits
	Nombre d'échantillons par bit	64 échantillons
Canal FSO 1 et FSO 2	Distance de la liaison FSO	2 950 m
	Diamètre d'ouverture d'émetteur FSO	5 cm
	Diamètre d'ouverture de récepteur FSO	13.5 cm
	Angle de divergence	0.25 mrad
	Atténuation	3.5 dB/km
	Perte d'émetteur	1 dB
	Perte de récepteur	1 dB
	Pertes supplémentaires	1 dB
	Délai de propagation	0 ps/km
	Perte géométrique	Oui
Amplificateur Optique	EDFA 1 : gain / facteur de bruit	16 dB / 6 dB
	EDFA 2 : gain / facteur de bruit	5 dB / 6 dB
	EDFA 3 : gain / facteur de bruit	5 dB / 6 dB
	EDFA 4 : gain / facteur de bruit	5 dB / 6 dB
	EDFA 5 : gain / facteur de bruit	32 dB / 4.5 dB
FO SMF 1 et SMF 2	Distance de la liaison SMF	25 000 m
	Dispersion chromatique	17 ps/nm/km
	Atténuation	0.2 dB/km
FO DCF	Distance de la liaison DCF	10 000 m
	Dispersion chromatique	-85 ps/nm/km
	Atténuation	0.5 dB/km

Tableau 3.4. Paramètres de simulation pour le troisième scénario.

Les figures 3.20 et 3.21 montrent respectivement les variations de BER et de facteur de qualité en fonction de débit de données dans la bande simulée C.

Nous avons observé que, l'augmentation de débit a une nette influence sur la qualité de transmission de système proposé, plus le débit augmente, plus nous avons une dégradation du facteur de qualité, voir la figure 3.21. Par exemple, à une longueur d'onde de 1565.495 nm, les valeurs du facteur de qualité obtenues, sont : 20.35 (2.5 Gbit/s), 11.73 (6.25 Gbit/s), 7.89 (10 Gbit/s) et 5.93 (15 Gbit/s), respectivement. Le BER subit un changement considérable et nous avons enregistré une augmentation de BER vu que la qualité de transmission est dégradée, voir la figure 3.20. Par exemple, à une longueur d'onde de 1565.495 nm, les valeurs de BER obtenues, sont :  $1,6 * 10^{-92}$  (2.5 Gbit/s),  $3,98 * 10^{-32}$  (6.25 Gbit/s),  $1,34 * 10^{-15}$  (10 Gbit/s) et  $1,42 * 10^{-09}$  (15 Gbit/s), respectivement. En outre, la configuration du système proposé reste comme un système de communication optique appropriée à un débit de 15 Gbit/s, puisque le BER est autour de  $10^{-09}$ . A titre d'exemple, à un débit de 15 Gbit/s, les valeurs de BER obtenues, sont :  $1,92 *$

$10^{-08}$  (1560.606 nm),  $5.26 * 10^{-10}$  (1562.232 nm),  $2.86 * 10^{-09}$  (1563.862 nm),  $1.42 * 10^{-09}$  (1565.495 nm).

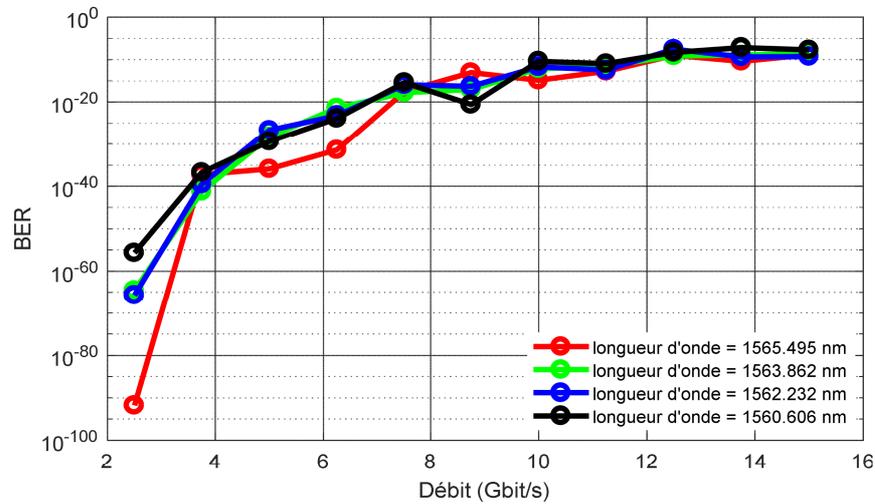


Figure 3.20. BER vs débit de données dans la bande C.

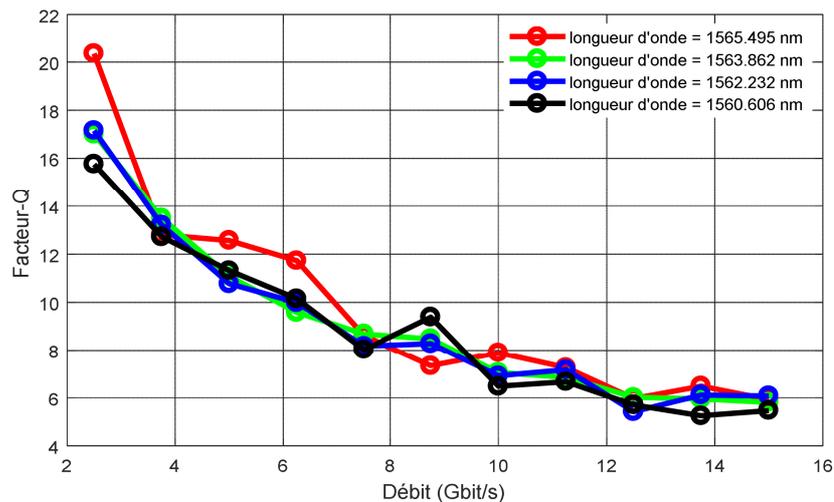


Figure 3.21. Facteur-Q vs débit de données dans la bande C.

À partir des résultats obtenus sur les figures 3.20, 3.21 et 3.22, nous avons constaté que le système proposé dans la figure 3.19 présente une performance robuste autour de la longueur d'onde de 1565.495 nm. Comme une note, cette dernière elle s'approche de la bande L. De ce fait, l'étude suivante vise à évaluer la performance du système proposé dans la figure 3.19, mais cette fois-ci, nous utilisons une longueur d'onde qui située dans la bande L, à savoir : 1616.245 nm. Dans ce scénario, nous allons varier la portée de deux liaisons FSO en même temps, pour voir l'influence de cette dernière sur le BER et le facteur de qualité, le débit utilisé ici est de 15 Gbit/s.

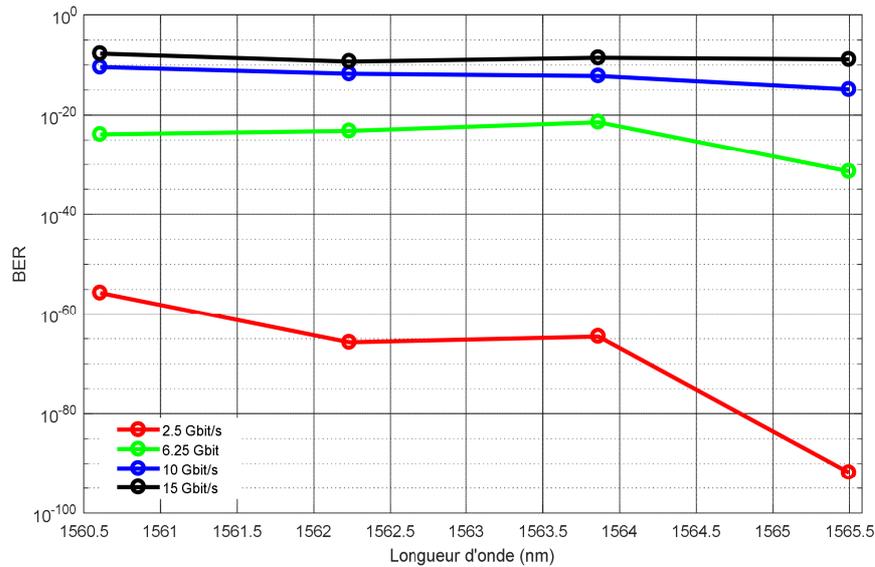


Figure 3.22. BER vs longueurs d'onde dans la bande C.

Les figures 3.23 et 3.24 illustrent respectivement les variations de BER et de facteur de qualité en fonction de distance de la liaison FSO, autour de la longueur d'onde 1616.245 nm.

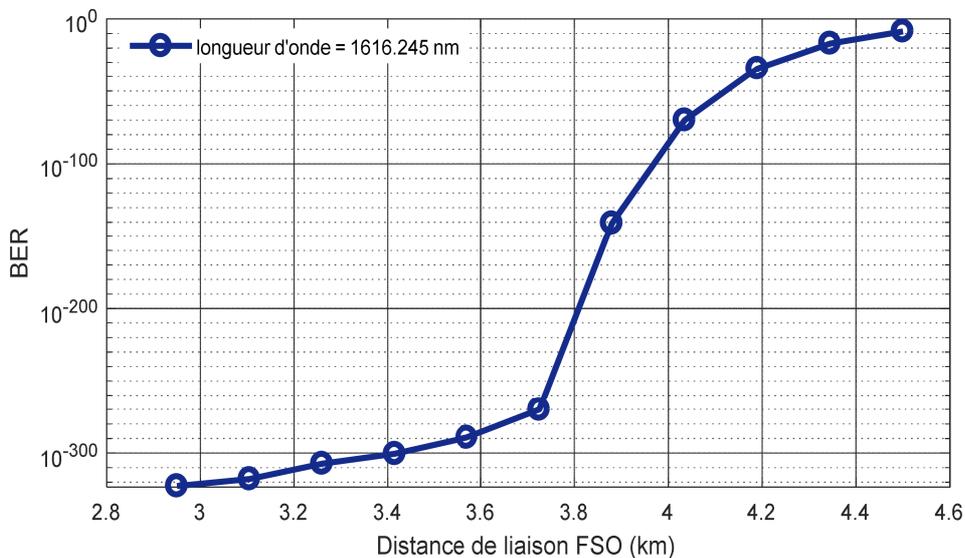


Figure 3.23. BER vs distance de liaisons FSO autour de la bande L.

À partir de la figure 3.23 et la figure 3.24, nous avons noté que, l'augmentation de la distance de la liaison FSO a une nette influence sur la qualité de transmission, le BER subit un changement considérable et nous avons enregistré une augmentation de BER. A titre d'exemple, à une longueur d'onde de 1616.245 nm et un débit de 15 Gbit/s, les valeurs de BER obtenues, sont :  $1.976 \times 10^{-323}$  (2.95 km),  $7.64 \times 10^{-271}$  (3.725 km),  $8.33 \times 10^{-71}$  (4.035 km) et  $3.06 \times 10^{-9}$

(4.5 km), respectivement. En outre, nous avons aussi enregistré une diminution du facteur de qualité vu que le BER augmente. À titre d'exemple, à une longueur d'onde de 1616.245 nm et un débit de 15 Gbit/s, les valeurs du facteur de qualité obtenues, sont : 86,41 (2.95 km), 35,14 (3.725 km), 17,75 (4.035 km) et 5,812 (4.5 km),

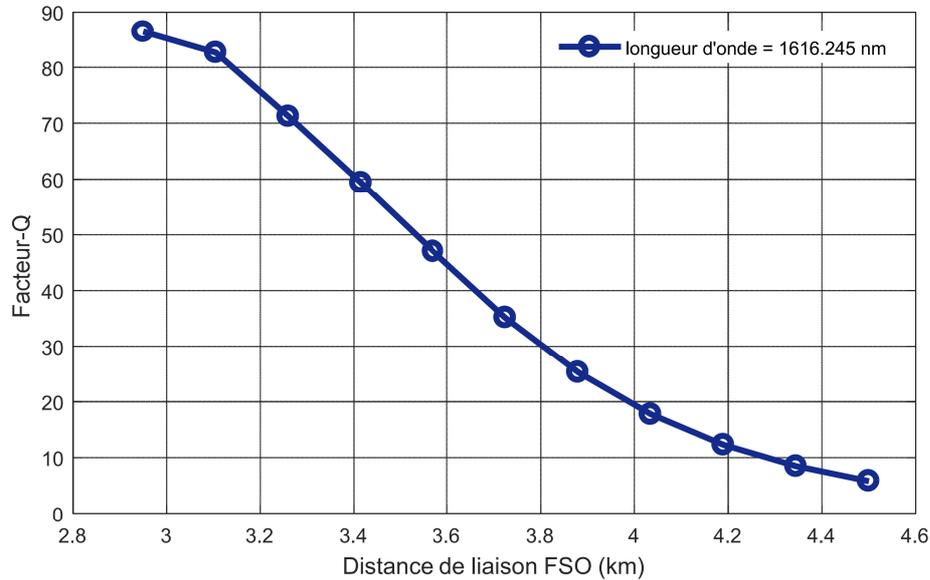
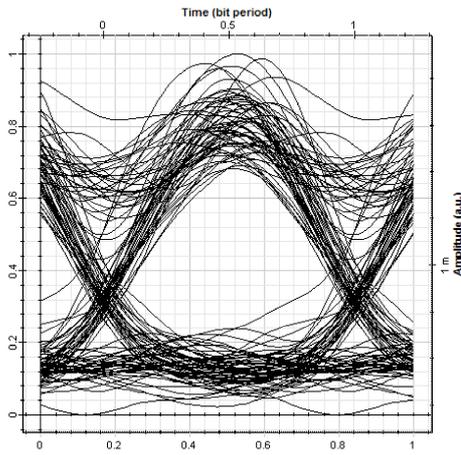


Figure 3.24. Facteur-Q vs distance de liaisons FSO autour de la bande L.

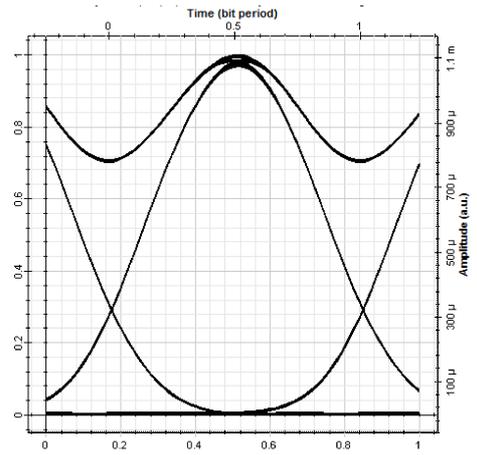
À l'aide du diagramme de l'œil autour de deux bandes simulées C et L, nous avons remarqué que, si nous utilisons la bande C, le système proposé FSO-FO-FSO (voir la figure 3.19) montre une bonne performance pour des distances de liaison FSO ci-dessous de 2.95 km. Par contre dans la bande L, le système FSO-FO-FSO donne de meilleure performance pour des distances de 2.95 km jusqu'à 4.5 km, voir la figure 3.25.

Comme conclusion, l'étude du diagramme de l'œil illustre que l'architecture proposée de la figure 3.19 est bien adaptée lorsque nous exploitons des longueurs d'onde qui situent dans la bande L.



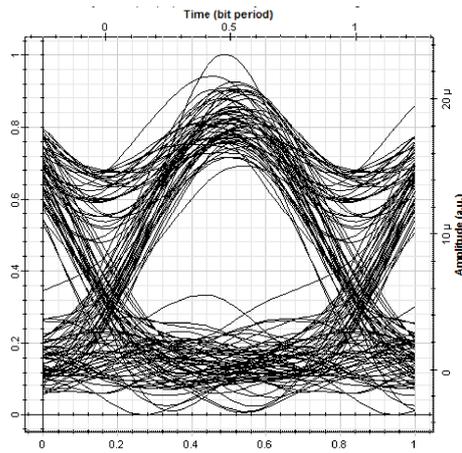
$\lambda = 1565.495 \text{ nm}$   
 Débit est de 15 Gbit/s  
 Portée de la liaison FSO est de 2.95 km

\*\*\*\*\*  
 $\text{BER} = 1,42 * 10^{-09}$   
 Facteur-Q = 5,93



$\lambda = 1616.245 \text{ nm}$   
 Débit est de 15 Gbit/s  
 Portée de la liaison FSO est de 2.95 km

\*\*\*\*\*  
 $\text{BER} = 1,976 * 10^{-323}$   
 Facteur-Q = 86,41



$\lambda = 1616.245 \text{ nm}$   
 Débit est de 15 Gbit/s  
 Portée de la liaison FSO est de 4.5 km

\*\*\*\*\*  
 $\text{BER} = 3,06 * 10^{-09}$   
 Facteur-Q = 5,812

Figure 3.25. Diagrammes de l'œil autour de deux bandes simulées C et L.

### 3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats et interprétations de simulation des chaînes de transmission optiques avec l'utilisation de cinq formats de modulation, à savoir : NRZ, RZ, GPG, HPG et RCPG, où nous avons utilisé deux types de modulateur, tels que : direct et externe (Mach-Zehnder et Electro-Absorbant).

D'après les résultats de simulation obtenus, nous avons conclu que le format de la modulation HPG est la plus performante lorsque nous utilisons la modulation directe, avec l'amplification de signal optique de Tx. Par contre, le format de modulation GPG est bien adapté avec le modulateur externe « Mach-Zehnder », soit dans la bande C ou bien dans la bande L, mais nous avons enregistré que la bande L donne de meilleurs résultats pour les systèmes de communication FSO.

# Conclusion générale

En un peu, plus d'une décennie, la transmission optique s'est affirmée comme la technologie clé des réseaux de transport à grande capacité, remplaçant toutes celles qui existaient auparavant, en termes de capacité et qualité de transmission. La transmission en espace atmosphérique FSO, les techniques de modulation et l'amplification du signal dans le domaine optique sont évidemment les raisons majeures de cette suprématie. Cependant, le présent projet consiste à l'étude et à la simulation des différents systèmes FSO, en utilisant le logiciel OptiSystem.

Les simulations de ce projet nous ont bien amenés aux conclusions suivantes :

La performance de la liaison FSO est étudiée et analysée, en prenant le BER et facteur-Q comme des mesures de performance. Cependant, les performances de BER et facteur-Q du système FSO en utilisant divers formats de modulation RZ, NRZ, GPG, HPG et RCPG ont été analysés et comparés. Il a été observé que GPG sans amplification du signal optique Tx, offre la meilleure performance de BER, par rapport à d'autres formats de modulation. En revanche, lorsque la puissance du signal optique Tx est amplifiée, nous avons observé que le format de modulation HPG donne la meilleure performance de BER. Aussi, l'impact de la modulation directe et externe a été analysé et comparé. Il a été noté que la modulation externe nous donnait de meilleures performances par rapport à la modulation directe, car le spectre GPG direct a une forte composante de la porteuse, par rapport à la modulation externe GPG. Nous voyions aussi que la longueur d'onde de 1616.245 nm (bande L) donne les meilleures performances pour un système FSO, par rapport à la bande C.

Les paramètres conçus sont également variés et simulés pour analyser l'impact de débit et de la puissance optique de Tx sur la performance de BER et le facteur de qualité de la liaison FSO. En outre, la qualité de transmission d'un système FSO montre une relation linéaire avec le débit, la puissance optique de Tx et la distance de liaison FSO, lorsque la puissance optique de Tx augmente, le facteur de qualité augmente. De plus, avec l'augmentation du débit de données pour une distance donnée, la performance de BER de la liaison FSO diminue de manière significative.

En résumé, pour augmenter la capacité d'un système de communication FSO, nous devons exploiter la technologie DWDM (Dense Wave Division Multiplexing). Pour cela, trois axes d'investigations sont possibles à incorporer au système hybride FSO-FO-FSO que nous avons proposé en dernière partie de ce projet :

- Exploiter les deux bandes L et U, respectivement : 1565 à 1625 nm et 1625 à 1675 nm ;
- Augmenter le débit de données par longueur d'onde ;
- Augmenter le nombre de longueurs d'onde.

# Références Bibliographiques

- 
- [1] <http://www.eurosro.cz/fr/products/free-space-optics>.
- [2] Marie-Thérèse Velluet, "Optique Adaptative appliquée aux Télécommunications Laser en Espace Libre". Thèse de doctorat à l'université de Aix-Marseille III, France, 2012.
- [3] <http://www.4gon.co.uk>.
- [4] <http://web.mst.edu/~mobildat/Free%20Space%20Optics/index.html>.
- [5] Rapport UIT-R F.2106, "Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre".
- [6] <http://www.rudrasoftech.com/blog/introduction-to-free-space-optical-communication-fso>.
- [7] Ali Mahdi Hammadi, Entidhar Mhawes Zghair, "Transmission Performance Analysis of Three Different Channels in Optical Communication Systems". International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 2, 2014, ISSN 2229-5518.
- [8] Hemani Kaushal, Georges Kaddoum, "Free Space Optical Communication: Challenges and Mitigation Techniques", Published 2015 in ArXiv.
- [9] Vincent Foucal, "Conception d'interconnexions optiques haut débit courte distance en espace libre. Prototypage de modules de communication pour applications embarquées". FOUCAL\_Vincent\_2010.
- [10] <http://www.mrv.com>.
- [11] D. Killinger, "Free space optics for laser communication through the air", Optics & Photonics News, vol. 13, pp. 36-42, Oct. 2002.
- [12] ROUISSAT Mehdi, "Etude et Modélisation d'une Liaison Optique Sans Fil", Thèse de Doctorat, l'université de Tlemcen, 2013.
- [13] G. Shaulov, J. Patel, B. Whitlock, P.Mena, and R. Scarmozzino, "Simulation-assisted design of free space optical transmission systems", in Proceedings of the Military Communications Conference(MILCOM'05), vol. 2, pp. 918-922.
- [14] Abdulsalam Ghalib Alkholidi and Khaleel Saeed Altowij, "Free Space Optical Communications — Theory and Practices", <http://dx.doi.org/10.5772/58884>.
- [15] Hervé SIZUN, Maher AL NABOULSI, Frédérique De FORNEL, "La propagation des ondes optiques visibles et infrarouges dans l'atmosphère terrestre", ÉLECTROMAGNÉTISME.
- [16] 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.
- [17] Y. S. S. Torkestani, "Contribution à l'étude d'un réseau de communications optiques sans fils indoor-application à la télésurveillance en milieu hospitalier", Thèse de l'université de Limoges, France, 2012.

- [18] A. K. Majumdar, «Free space laser communication performance in the atmospheric channel », Science Business Media LLC, pp. 61, Springer, 2008.
- [19] Mohammed. 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.
- [20] H. Henniger, O. Wilfert, «An Introduction to Free-space Optical Communications », Radioengineering, Vol. 19, no. 2, Jun., 2010.
- [21] B. R. Mahafza " Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB ", Chapman and Hall-CRC, 2000.
- [22] 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.
- [23] A. BEHLOULI, "Simulation du canal optique sans fil. Applications aux communications optiques sans fil", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 7 Décembre 2016.
- [24] L. PAVESTI, G. GUILLOT, " Optical interconnects: the silicon approach. Birhäuser ", springer series in optical series, 2006.
- [25] O. RINGAR, "Utilisation des techniques avancées d'Emission/Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande", Thèse de doctorat, Université Cheick anta diop, 23 Octobre 2015.
- [26] <http://www.cablefree.net/cablefree-free-space-optics-fso/>.
- [27] W. HEINZ, D. PH, B.S. GHUMAN, "Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks", 800 East 96th St., Indianapolis, Indiana 46240 USA.
- [28] K. BENARBIA, "Etude des performances d'un système de communication optique dans l'espace libre (FSO) en utilisant la technologie DWDM ", Mémoire Pour l'obtention du diplôme de MASTER en Télécommunication, l'université d'Abou Bekr Belkaid, Algérie, 08 Juin 2017.
- [29] H. SAYEH, A. DEGDEG, "les différents formats de modulation dans une liaison optique à haut débit", Institut des télécommunications Abdelhafid Boussouf, Oran, Juin 2006.
- [30] H. BRAHIMI, "Etude en bruit de système optique hyperfréquences modélisation caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence", Thèse de l'université de Toulouse, France, 23 Octobre 2010.
- [31] W. BENALI MEDJAIHED, II. ABDELLAOUI, "Etude de l'effet de la modulation sur une liaison SMF à 40Gb/s", l'université d'Abou Bekr Belkaid, Algérie, 30 Juin 2013.
- [32] H. KAUSHAL, V.K. JAIN, S. KAR, "Free Space Optical Communication", Biswanath Mukherjee, Davis, California, USA.
- [33] <http://philpetitpa.890m.com/modul1.pdf>.

- 
- [34] I. DJODJEVIC, W. RYAN, B.VASIC, "coding for optical channels", University of Arizona Tucson, AZ 85721, USA.
- [35] T. S. HANZRA, G. SINGH. "Performance of Free Space Optical Communication System with BPSK and QPSK Modulation", IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSRJECE) ISSN: 2278-2834 Volume 1, Issue 3 (Mai-Juin 2012).
- [36] R. G. CHARU, G. KAUR, "Performance Analysis of Different Modulation Techniques on Free Space Optical System under Fog Weather Condition", International Journal of Control Theory and Applications, 22 Novembre 2017.
- [37] C. M. FOUATIH, A. TCHENEM, A. BOUYEDDA, S. ABED, D. AZZAOU, "Les formats de modulation dans les communications par fibre optique", Université de limoges, Mini-Projet.
- [38] M. LEFRANÇOIS, "Étude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40Gbit/s", Thèse de Doctorat, L'université PARIS-SUD, 6 décembre 2007.
- [39] <http://www.lafibrelyonnaise.fr/amplificateur-optique/>
- [40] Transmission Haut Débit, 3ème année licence Réseau de l'ISITCOM, HAMMAM Sousse, <http://www.slideplayer.fr/slide/8973579/>
- [41] Y. COJAN, J. C. FONTANELLA, " Propagation du rayonnement dans l'atmosphère", Techniques de l'ingénieur, Traité Electronique, Paris, Décembre 1995.
- [42] A.K. MAJUMDAR, J.C. RICKLIM, "Free Space Laser Communication", Springer ed., 2008.
- [43] R. BENAHMED, "COMPOSANTS OPTOELECTRONIQUES", Université de Saïda.
- [44] C.E. PEREZ VALENZUELA, "FORMATS DE MODULATION POUR LES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES ", Thèse de ENST, France, 2006.

## Résumé

Aujourd'hui, les chercheurs se concentrent sur l'utilisation des systèmes de communication optique en espace libre inter-bâtiments. Dans ce mémoire, l'analyse des performances de la liaison de communication FSO dans un environnement atmosphérique a été étudiée dans deux bandes C et L en utilisant différents formats de modulation : RZ, NRZ, GPG, HPG et RCPG. Les performances de la liaison FSO ont été étudiées en faisant varier la distance entre l'émetteur et le récepteur optiques, le débit de données, la puissance optique de Tx et la longueur d'onde de transmission.

En outre, l'analyse a été exécutée sous l'environnement OptiSystem, en utilisant le taux d'erreur binaire (BER) et facteur de qualité (Q) comme des métriques de performances.

**Mots clés :** FSO, performances de BER et facteur de Qualité, OptiSystem.