

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

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

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Réseaux Mobiles et Services de Télécommunications

**Par** : **BENARBIA Khalida**

### **Sujet**

Etude des performances d'un système de communication optique  
dans l'espace libre (FSO) en utilisant la technologie DWDM

Soutenu publiquement, le **08 / 06 / 2017** , devant le jury composé de :

Mr S.H.IRID	Maître Assistant	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 A.R. BORSALI	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Examineur

*A mes parents,*

*A toute la famille...*

# Remerciements

---

*Ce travail de recherche 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 Belkaid Tlemcen.*

*On voudrait tout d'abord remercier sincèrement notre Encadreur 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 Sidi Mohammed IRID, Maître Assistant classe A à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de présider le jury de ce Mémoire.*

*Nous exprimons également notre reconnaissance à Monsieur BORSALI Ahmed Riad, Maître de Conférences classe A 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**

Au cours des dernières décennies, la communication optique dans l'espace libre (FSO) est préférée à la communication radio fréquence car elle présente une licence libre et une transmission longue portée avec une bande passante élevée. Dans ce travail, on va étudier les performances d'un système de communication optique en espace libre (FSO) en utilisant la technologie DWDM (multiplexage en longueur d'onde dense). Il est à noter que le DWDM est très efficace pour assurer la transmission de données à haut débit avec un taux d'erreur binaire très faible (BER).

Le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur de qualité Q sont les indicateurs qui permettant de suivre les performances d'un réseau optique et de constater toute dégradation pouvant affecter la qualité de service de réseau.

**Mots clés :** Transmission optique, FSO, DWDM, BER et facteur de Qualité.

# Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé .....	ii
Table des matières.....	iii
Sigles et abréviation .....	v
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux.....	x

## Chapitre I : Introduction Générale

I.1 Contexte général et problématiques .....	2
I.2 Outline de mémoire .....	3

## Chapitre II : Présentation générale sur la technologie FSO

II.1 Introduction .....	5
II.2 Technologie FSO.....	5
II.2.1 Principe de fonctionnement de FSO .....	5
II.2.2 Caractéristique des dispositifs FSO .....	8
II.2.3 Les avantages et les limites des FSOs par rapport aux interconnexions fibrées.....	8
II.2.4 Les applications des FSOs.....	9
II.3 Composants Optoélectroniques pour une liaison FSO .....	9
II.3.1 L'émetteur .....	9
II.3.1.1 Source optique .....	10
II.3.1.2 Modulateurs .....	11
II.3.2 Canal de transmission.....	12
II.3.3 Récepteur optique.....	12
II.4 Choix d'une longueur d'onde .....	13
II.5 Les paramètres d'une liaison FSO .....	14
II.5.1 Intensité rayonnante .....	14
II.5.2 Puissance optique reçue.....	15
II.5.3 La densité de puissance optique .....	15
II.5.4 Perte en espace libre (PEL) .....	15
II.5.5 Marge d'une liaison optique atmosphérique.....	16
II.5.6 Bilan de liaison.....	17
II.5.7 Débit de transmission .....	17
II.5.8 Capacité du canal de transmission .....	18
II.6 Conclusion.....	18

### **Chapitre III : Multiplexage en longueur d'onde (WDM)**

III.1 Introduction .....	20
III.2 Principe d'une liaison optique .....	20
III.3 Techniques de multiplexage .....	20
III.3.1 Multiplexage temporel optique (OTDM) .....	21
III.3.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM) .....	22
III.3.2.1 Multiplexage dense (DWDM) .....	24
III.3.2.2 Multiplexage de canaux largement espacés (CWDM) .....	25
III.3.2.3 Les apports du WDM .....	26
III.4 Mesure de la performance d'une liaison optique .....	27
III.5 Conclusion .....	28

### **Chapitre IV : Résultats et Interprétations**

IV.1 Introduction .....	30
IV.2 Performance d'une liaison optique à haute débit .....	30
IV.3 Résultat de simulation et interprétation .....	33
IV.3.1 L'effet de la variation de la distance de liaison DWDM-FSO .....	36
IV.3.2 L'effet de la variation de débit (Gbps) de transmission d'une liaison DWDM-FSO .....	38
IV.3.3 L'effet de la variation de puissance optique d'un émetteur OLT-DWDM pour FSO .....	39
IV.3.4 L'effet de variation de l'atténuation (dB/Km) sous un canal FSO .....	41
IV.3.5 L'effet de variation de la divergence d'un faisceau optique sous un canal FSO .....	42
IV.3.6 L'effet de variation du diamètre de l'ouverture d'un récepteur FSO .....	44
IV.3.7 L'effet de variation du diamètre de l'émetteur FSO .....	45
IV.4 Conclusion .....	46

### **Chapitre V : Conclusion Générale**

Conclusion Générale .....	48
---------------------------	----

### **Chapitre VI : Bibliographie**

Références Bibliographiques .....	51
-----------------------------------	----

## *Sigle & abréviation*

---

---

### **A**

<b>APD</b>	<b>Avalanche Photodiode.</b>
<b>ATM</b>	<b>Asynchronous Transfer Mode.</b>
<b>AWGN</b>	<b>Additive White Gaussian Noise</b>

### **B**

<b>BER</b>	<b>Bit Error Rate.</b>
------------	------------------------

### **C**

<b>CWDM</b>	<b>Coarse Wavelength Division Multiplexing.</b>
-------------	---

### **D**

<b>DEL</b>	<b>Diode Electroluminescent.</b>
<b>DL</b>	<b>Diode Laser.</b>
<b>DSF</b>	<b>Dense Wavelength Division Multiplexing.</b>
<b>DSL</b>	<b>Digital Subscriber Line.</b>

### **E**

<b>EDFA</b>	<b>Erbium Doped Fiber Amplifier.</b>
<b>ETDM</b>	<b>Electronic Time Division Multiplexing.</b>

### **F**

<b>FDM</b>	<b>Frequency Division Multiple.</b>
<b>FSO</b>	<b>Free Space Optical.</b>

**FTTx**                    **Fiber To The...**

## **G**

**GSM**                    **Global System for Mobile.**

## **I**

**IMZ**                    **Interferometers Mach-Zehnder.**

**ITU**                    **International Telecommunication Union.**

## **L**

**LAN**                    **Local Area Network.**

**LOS**                    **Line-Of-Sight.**

## **M**

**MAC**                    **Media Access Control.**

**MEA**                    **Modulateur électro-absorbant.**

**MRT**                    **Modulateur à Répartition Temporel.**

## **N**

**NRZ**                    **Non Return to Zero.**

**NRZI**                    **Non Return to Zero Inverted.**

## **O**

**OLT**                    **Optical Line Termination.**

**OTDM**                    **Optical Time Division Multiplexing.**

**ONU**                    **Optical Network Unit.**



## **P**

<b>PDH</b>	<b>P</b> lesiochronous <b>D</b> igital <b>H</b> ierarchy.
<b>PEL</b>	<b>P</b> erte en <b>E</b> space <b>L</b> ibre.
<b>PIN</b>	<b>P</b> ositive <b>I</b> ntrinsic <b>N</b> egative <b>P</b> hotodiodes.
<b>PN</b>	<b>P</b> ositive <b>N</b> egative <b>P</b> hotodiodes.
<b>PON</b>	<b>P</b> assive <b>O</b> ptical <b>N</b> etwork.

## **R**

<b>RZ</b>	<b>R</b> eturn to <b>Z</b> ero.
-----------	---------------------------------

## **S**

<b>SDH</b>	<b>S</b> ynchronous <b>D</b> igital <b>H</b> ierarchy.
<b>SNR</b>	<b>S</b> ignal-to-Noise <b>R</b> atio.
<b>STM</b>	<b>S</b> ynchronous <b>T</b> ransport <b>M</b> odule.

## **T**

<b>TDM</b>	<b>T</b> ime <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple.
<b>TEB</b>	<b>T</b> aux <b>E</b> rrer <b>B</b> inaire.

## **W**

<b>WDM</b>	<b>W</b> avelength <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing.
------------	---

# Liste des Figures

---

## Chapitre II

---

Figure II.1. Structure d'une liaison FSO utilisée pour raccorder deux réseaux locaux.....	5
Figure II.2. Configuration de base d'une liaison optique en espace libre. ....	6
Figure II.3. Exemple de terminal de transmission optique en espace libre. ....	6
Figure II.4. Communication FSO.....	7
Figure II.5. Topologies de réseaux optiques en espace libre.....	7
Figure II.6. Synoptique d'un module d'émetteur FSO.....	10
Figure II.7. Spectre d'émission d'une source optique.....	10
Figure II.8. Principe de base d'une transmission optique à modulation direct.....	11
Figure II.9. Principe de base d'une émission à modulation externe en utilisant Match-Zehnder ou un modulateur électro-absorbant.....	11
Figure II.10. Module de réception optique.....	12
Figure II.11. Fenêtre de transmission des longueurs d'onde.....	14

## Chapitre III

---

Figure III.1. Structure d'une liaison optique simple.....	20
Figure III.2. Multiplexage TDM pour 2 utilisateurs.....	21
Figure III.3. Architecture PON basée sur le multiplexage temporel.....	22
Figure III.4. Schéma de principe du multiplexage WDM.....	23
Figure III.5. Atténuation vs longueur d'onde, incluant les fenêtres de transmission.....	24
Figure III.6. Grille UIT pour DWDM avec un espacement 0.8 nm.....	25
Figure III.7. Grille UIT pour CWDM avec un espacement 20 nm.....	26
Figure III.8. Diagramme de l'œil.....	28

## Chapitre IV

---

Figure IV.1. Configuration d'une liaison optique simulée.....	30
Figure IV.2. Configuration de OLT.....	31
Figure IV.3. Configuration de ONU.....	33
Figure IV.4. Les 8 longueurs d'ondes sous un canal FSO.....	33
Figure IV.5. Diagramme de l'œil en sortie de 4 récepteurs pour un format de modulation NRZ à 4 km.....	35
Figure IV.6. Diagramme de l'œil en sortie de 4 récepteurs pour un format de modulation RZ à 4 km.....	36

Figure IV.7. BER vs distance pour un format de modulation NRZ.....	37
Figure IV.8. Facteur-Q vs distance pour un format de modulation NRZ.....	37
Figure IV.9. BER vs longueurs d'ondes pour différents débits de données à 4 Km. ....	38
Figure IV.10. BER vs puissance optique pour un format de modulation NRZ à 4 Km. ....	39
Figure IV.11. Facteur-Q vs puissance optique pour un format de modulation NRZ à 4 Km.....	40
Figure IV.12. BER vs atténuation pour un format de modulation NRZ à 4 Km.....	41
Figure IV.13. Facteur-Q vs atténuation pour un format de modulation NRZ à 4 Km.....	42
Figure IV.14. BER vs distance pour # divergence de faisceau optique avec un format de modulation NRZ à 4 km.....	43
Figure IV.15. Facteur-Q vs distance pour # divergence de faisceau optique avec un format de modulation NRZ à 4 km.....	43
Figure IV.16. BER vs diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO avec un format de modulation NRZ à 4 km.....	44
Figure IV.17. Facteur-Q vs diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO avec un format de modulation NRZ à 4 km.....	45
Figure IV.18. BER vs diamètre d'un émetteur FSO avec un format de modulation NRZ à 4 km.....	45

# Liste des Tableaux

---

Tableau II.1. Caractéristiques de base pour des Systèmes FSOs .....	8
Tableau III.1. Comparaison entre CWDM et DWDM .....	26
Tableau IV.1. Paramètres de simulation .....	32
Tableau IV.2. Valeurs de BER et facteur-Q pour # longueurs d'ondes avec un format de modulation NRZ à 4 km. ....	34
Tableau IV.3. Valeurs de BER et facteur-Q pour # longueurs d'ondes avec une modulation RZ à 4 km. ...	35
Tableau IV.4. Valeurs de BER et de puissance optique pour # longueurs d'ondes avec une modulation NRZ à 4 km .....	40

---

## CHAPITRE I

---

### Introduction Générale

## I.1 Contexte général et problématiques

La grande quantité d'informations véhiculées à travers le monde a donné naissance, depuis quelques années, à un besoin croissant en débit de transmission dans les systèmes de télécommunications. De nombreux services et applications multimédias se sont développés, et nécessitent aujourd'hui d'importantes capacités de transmission. Un besoin d'autant plus important que les informations échangées grâce à ces applications (données, voix IP, vidéo, ...) ont souvent besoin d'être transmises simultanément via une technique de multiplexage.

Les avantages de la fibre optique en tant que support de transmission (grande bande passante, faibles pertes de propagation, immunité aux ondes électromagnétiques) justifient l'important développement des systèmes de transmission optiques durant la dernière décennie.

Ces systèmes ont permis d'accroître les débits de transmission grâce à des techniques de multiplexage en temporel (TDM), en code (CDM), ou encore en longueur d'onde (WDM).

Outre la transmission par fibre optique, ces dernières années ont vu le développement des transmissions optiques de signaux numériques en espace libre dans le vide intersidéral (communication entre deux satellites) ou dans l'atmosphère terrestre (communication entre deux bâtiments en vue l'un de l'autre). Cette technologie, répondant à l'acronyme FSO pour Free Space Optics, permet des liaisons sur des distances allant de quelques mètres à quelques kilomètres dans l'atmosphère terrestre. Elle est particulièrement bien adaptée :

- à la desserte locale des abonnés à Internet, notamment dans les environnements urbains à forte densité de population, lorsque des liaisons en fibre optique ne peuvent être déployées pour des raisons matérielles ou de coût ;
- à l'établissement rapide de connexions haut débit (catastrophe naturelle, zone de conflit) ;
- à la redondance des données transférées par fibres optiques pour sécuriser la liaison.

Ces facteurs constituent le point de départ de ce travail de mémoire, dont l'objectif est de réaliser une liaison optique FSO en utilisant la technique de multiplexage en longueur d'onde DWDM. La liaison conçu ici permet la transmission des données de 8 utilisateurs à un débit de 5 Gbps chacun, avec un débit global de 40 Gbps après multiplexage. Nous avons utilisé un espacement de 0.8 nm, puis le démultiplexage pour la restitution des données de chacun des utilisateurs.

Note : nous nous basons sur le logiciel OPTISYSTEM pour simuler notre liaison proposée DWDM-FSO.

Notre étude dans ce mémoire est consacrée à évaluer toutes les métriques qui peuvent être affectées la performance de la liaison DWDM-FSO sans compensation.

## **I.2 Outline de mémoire**

Ce mémoire est organisé dans un document comportant trois chapitres en plus d'une introduction générale, une conclusion générale et une recherche bibliographique :

### ***Chapitre II : Présentation générale sur la technologie FSO***

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une description générale sur la transmission optique en espace libre (FSO). Dans un premier temps, nous décrivons brièvement le concept de la technologie FSO, ainsi que leur avantage et leur limite, ensuite nous présentons les différents composants optoélectroniques constituant une liaison optique atmosphérique.

### ***Chapitre III : Multiplexage en longueur d'onde (WDM)***

Le multiplexage est une technique prometteuse pour augmenter la capacité de transmission d'un réseau optique. Dans ce chapitre, nous allons présenter deux types de multiplexages optiques existants afin de déterminer lequel est le plus adapté pour une utilisation dans un système FSO.

### ***Chapitre IV : Résultats et Interprétations***

Les résultats et les interprétations font l'objet du quatrième chapitre. Dans ce cadre, ce chapitre décrit les résultats de la simulation et la conception d'une liaison DWDM-FSO destinée aux réseaux d'accès optiques à très hauts débits à l'aide de logiciel OPTISYSTEM. Pour cela, nous discutons l'évaluation des performances de la liaison DWDM-FSO via les indicateurs suivants : le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur de qualité (Facteur-Q).

Nous finalisons notre mémoire par une conclusion générale où nous résumons le travail proposé. Ensuite, nous proposons quelques directions de recherche possibles visant des perspectives à être étudiées.

---

## CHAPITRE II

---

Présentation générale sur la technologie FSO

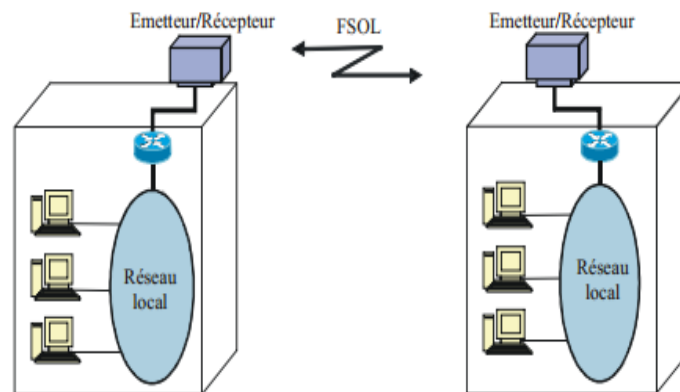


## II.1 Introduction

La transmission optique en espace libre (FSO) est devenue une technique courante et éprouvée dans le domaine des télécommunications. Elle est semblable aux communications par fibre optique en raison de leurs avantages. La technologie FSO présente une grande capacité de transmission, un débit de données élevé et en plus, le facteur de sécurité dans cette technologie est très robuste par rapport aux transmissions radio. Dans ce chapitre, nous allons évoquer la technologie FSO, en présentant son principe, ses avantages et ses limites. Par la suite, nous allons présenter les différents composants optoélectroniques constituant une liaison optique atmosphérique.

## II.2 Technologie FSO

Ces dernières années, les réseaux optiques sans fils utilisant la technologie FSO sont apparus d'une manière significative. Par opposition, cette technologie FSO, nous permet de répondre aux besoins des opérateurs de télécommunications. Les liaisons optiques en espace libre (FSOLs) constituent une technologie optique de communications qui fait appel à la propagation de la lumière en espace libre, à savoir de transmettre des données entre deux points distants (voir la figure II.1). En outre, elle présente un intérêt lorsqu'une connexion physique par le biais de câble ou de fibre optique est inadaptée, en particulier pour des raisons de coûts [1-3].

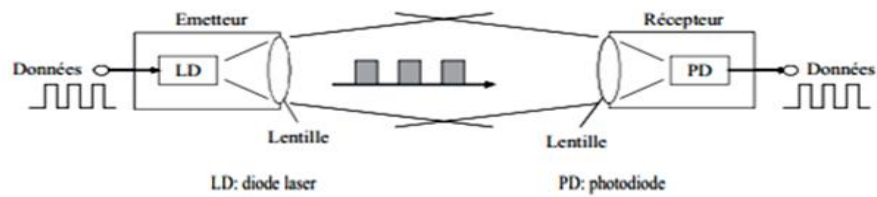


**Figure II.1.** Structure d'une liaison FSO utilisée pour raccorder deux réseaux locaux [3].

### II.2.1 Principe de fonctionnement de FSO

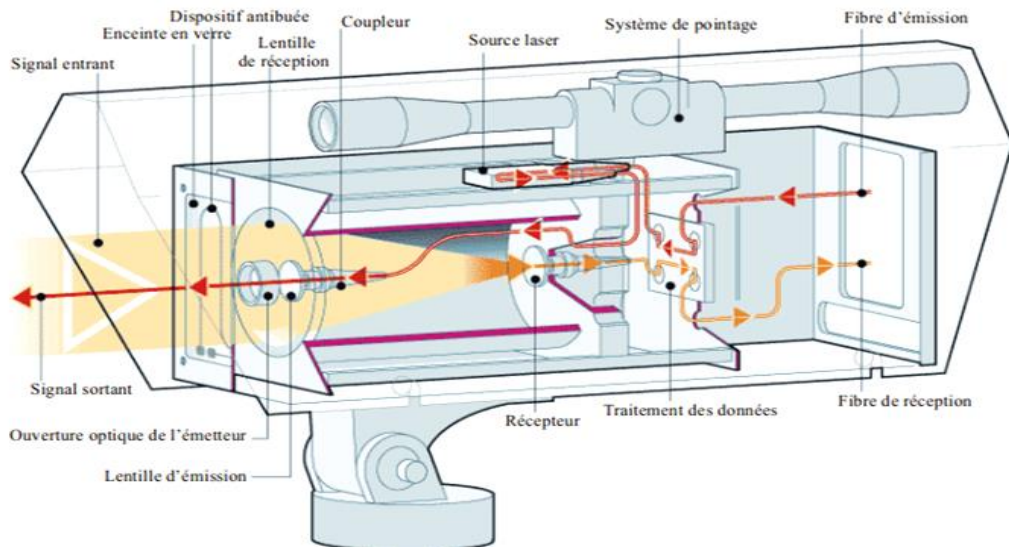
Le principe de base de la technologie FSO consiste en une transmission laser en espace libre dans une partie du spectre lumineux visible ou infrarouge. Les systèmes FSO sont conçus pour effectuer une connexion entre deux zones ou différentes zones, en visibilité directe LOS (Line-Of-Sight) à un débit très élevé. La FSO permet la transmission de tout type de données avec un débit égal à celui de la fibre optique tout en ayant la souplesse et les avantages d'un réseau radio sans fil.

En théorie, une liaison FSO nécessite un émetteur, un canal de propagation et un récepteur, comme il est illustré sur la figure II. 2 [1,2].



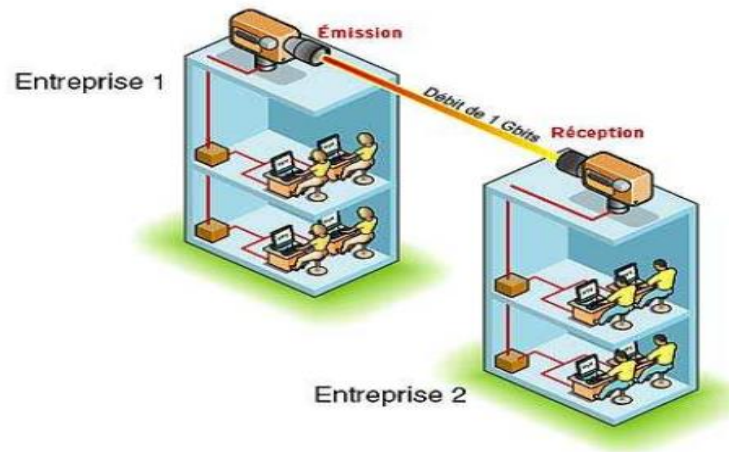
**Figure II.2.** Configuration de base d'une liaison optique en espace libre [3].

Une liaison FSO exploite en général une paire de dispositifs FSO transceiver (la figure II. 3 présente un transceiver de la société *LightPointe*), montés sur des toits, derrière des fenêtres ou bien encore fixés sur des poteaux chacun orienté vers l'autre [3].



**Figure II.3.** Exemple de terminal de transmission optique en espace libre [3].

C'est une interconnexion sans fil de type point à point (un seul émetteur vers un seul récepteur) qui permet de faire communiquer entre eux des réseaux numériques, téléphoniques, informatiques ou vidéo (voir la figure II. 4). Chaque élément est constitué d'un émetteur et d'un récepteur qui communiquent généralement en « *Full-Duplex* », la communication est bidirectionnelle et simultanée [1].



**Figure II.4.** Communication FSO [1].

Chaque équipement comporte plusieurs modules :

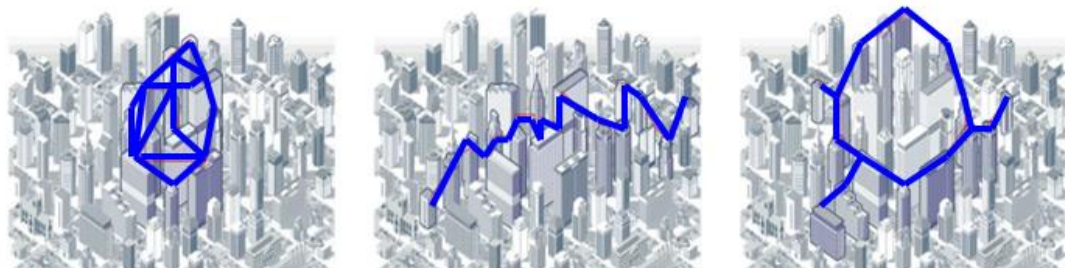
*Éléments d'émission :*

- 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.

*Éléments 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 [1,3].

Ce type de communication permet de créer un réseau flexible dont la topologie peut être diverse : point-à-point, point-multipoints, anneau, maillage (voir la figure II. 5).



**Figure II.5.** Topologies de réseaux optiques en espace libre [1].

## II.2.2 Caractéristique des dispositifs FSO

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. De plus, les faisceaux laser présentent davantage de risques pour la sécurité oculaire dans le domaine visible que pour des longueurs d'onde de l'ordre de 1550 nm. En effet, la lumière à 1550 nm est absorbée par la cornée et le cristallin et ne focalise pas sur la rétine contrairement aux faisceaux laser dans le visible et le proche infrarouge qui peuvent engendrer des dommages irréversibles sur la rétine. C'est un facteur à ne pas négliger pour une transmission optique en espace libre où la puissance optique est élevée et où le faisceau est accessible à l'utilisateur. Le simple fait de choisir des lasers à 1550 nm permet d'assurer que le système est sans danger même si la puissance du faisceau laser est importante [1]. Le tableau II.1 ci-dessous qui présente les caractéristiques de base pour des systèmes FSOs commercialisés [1].

	Min	Max	Remarques
<b>Débit</b>	1.5 Mbps	1.6 Gbps	Jusqu'à 10 Gbps avec correction des turbulences atmosphériques
<b>Portée</b>	10 m	7700 m	Temps clair
<b>Longueur d'onde</b>	780 nm	1550 nm	
<b>Puissance optique émise</b>	4 mW	650 mW	

**Tableau II.1.** Caractéristiques de base pour des Systèmes FSOs [1].

## II.2.3 Les avantages et les limites des FSOs par rapport aux interconnexions fibrées

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

*Les avantages des FSOs :*

Les FSOs ont leurs propres avantages et qui sont comme suit :

- large bande ou débit de données élevé ;
- équipements petits et simples ;
- fonctionnement sans licence ;
- coût avantageux ;
- facilité et rapidité de déploiement ;
- rapidité de déplacement et de réutilisation des liaisons ;
- protocole de communication transparent ;

- la sécurité intrinsèque des dispositifs FSO, plus élevée que celle des liaisons radioélectriques.

*Les limites des FSOs :*

Les FSOs ont leurs propres limitations. Comme cette technologie nécessite une visée directe entre l'émetteur et le récepteur, la liaison est vulnérable à un certain nombre de facteurs :

- disponibilité par rapport à la distance ;
- condition de visibilité directe.

En outre, pour la transmission des ondes optiques en espace libre, il faut surmonter certains problèmes liés à la propagation, comme l'atténuation du signal à la réception, conduisant ainsi à une augmentation du taux d'erreurs [1,3].

#### **II.2.4 Les applications des FSOs**

Pour certaines applications, les FSOs offrent plusieurs avantages supplémentaires par rapport à ceux offerts par les liaisons fixes traditionnelles ou à ceux offerts par les liaisons à fibres optiques. Ces applications peuvent par exemple être les suivantes :

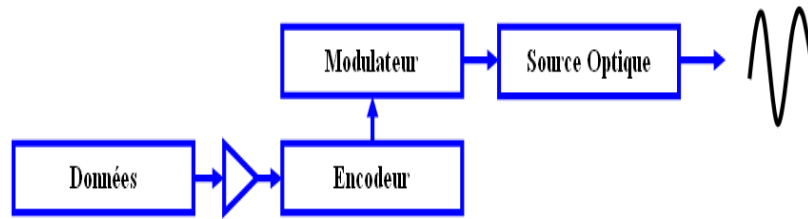
- interconnecter des réseaux LANs dans des villes ou des campus universitaires en économisant le coût très élevé de l'installation des fibres optiques ;
- liaison pour une manifestation particulière ;
- liaison temporaire : installation rapide pour une durée limitée dans l'attente d'une liaison traditionnelle définitive ;
- liaison d'urgence : installation d'une liaison d'urgence en cas de panne d'une liaison ;
- liaison entre sites, réseau indépendant (PDH, SDH, ATM, Ethernet 10/100/1 000) ;
- fermeture d'anneau optique ;
- liaison de secours ;
- réseau dense ;
- infrastructure mobile, par exemple liaison pour des nano-cellules ou des pico-cellules GSM ou IMT-2000 [1,3].

### **II.3 Composants optoélectroniques pour une liaison FSO**

#### **II.3.1 L'émetteur**

Le module d'émetteur, généralement noté Tx, assure la modulation d'une source des données sur une porteuse optique. Il convertit le signal électrique modulé en un signal optique, il est constitué d'un driver et d'une source laser ou d'une DEL. Cependant, le signal se propage ensuite à travers l'atmosphère vers le récepteur. Le récepteur détecte l'onde modulée et récupère les données émises. La majorité des systèmes FSO sont conçus pour fonctionner dans les fenêtres de 780 – 850 nm et 1520 - 1600 nm, ce qui

correspond à des fréquences de transmission des données autour de 200 THz. La figure II.6 présente un schéma d'un module émetteur de transmission optique en espace libre [4,5].

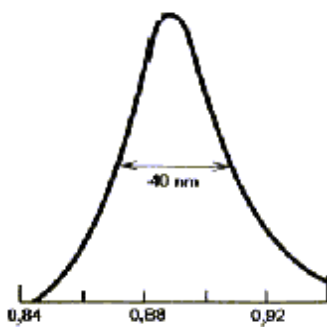


**Figure II.6.** Synoptique d'un module d'émetteur FSO [4,5].

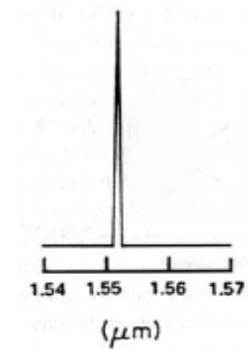
### II.3.1.1 Source optique

Comme nous avons souligné dans le paragraphe précédent, on a deux types de source optique à savoir :

La DL (Diode Laser) est une source cohérente, et monochromatique. Elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance (faible largeur spectrale  $\Rightarrow$  bande passante importante). La cohérence exprime l'étroitesse du spectre de fréquence (voir la figure II.7).



(a) Spectre d'émission d'un DEL



(b) Spectre d'émission d'un DL

**Figure II.7.** Spectre d'émission d'une source optique [6,7].

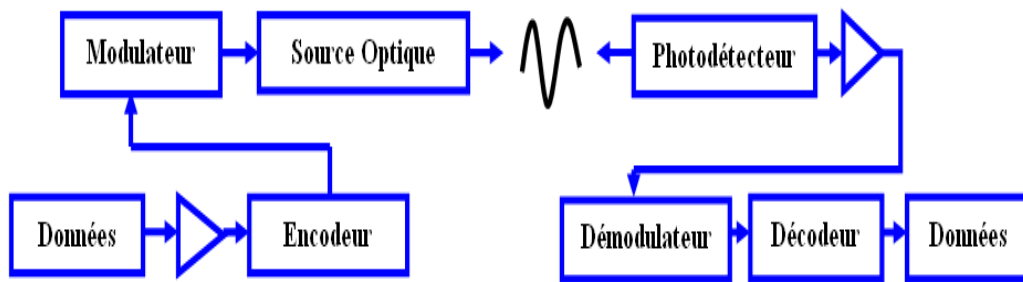
La DEL (Light Emitting Diode) est une source incohérente, et polychromatique. Elle présente contrairement au laser un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grande bande passante (voir la Figure II.7).

Afin de pouvoir transmettre un plus grand nombre d'informations par unité de temps, le signal numérique peut être codé. Il existe un grand nombre de types de codage, les plus courants étant les codages NRZ, RZ, NRZI, Manchester, Biphase-M [6,7].

### II.3.1.2 Modulateurs

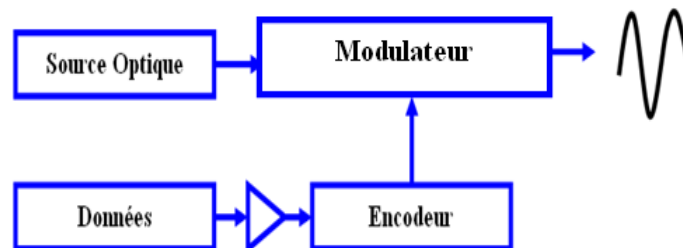
Un modulateur est un dispositif capable de modifier les paramètres d'onde optique. Deux méthodes sont utilisées pour moduler les ondes optiques ; la modulation directe et la modulation externe.

Les systèmes actuels de transmission FSO s'appuient sur les technologies de détecteurs et démodulateurs développés pour les communications optiques. Dans la plupart des cas, le système FSO utilise la modulation d'intensité et la détection directe. 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. En réception, le signal lumineux est focalisé sur un détecteur. La puissance optique reçue est convertie en un courant électrique. Ainsi, il ne contient aucune information sur la fréquence et sur la phase. La figure II.8 présente une chaîne de transmission optique utilisant une modulation directe [4,5,8].



**Figure II.8.** Principe de base d'une transmission optique à modulation direct [4,5,8].

En outre, il existe aussi la modulation externe. Dans ce type de modulation, la diode laser n'est plus modulée, mais elle reçoit une puissance électrique continue et elle est suivie d'un dispositif qui réalise lui-même la modulation de l'intensité optique. On peut citer l'interféromètre de Mach-Zehnder (IMZ) ou un modulateur électro-absorbant (MEA) (voir la figure II.9) [4,5,8].



**Figure II.9.** Principe de base d'une émission à modulation externe en utilisant Match-Zehnder ou un modulateur électro-absorbant [4,5,8].

### II.3.2 Canal de transmission

Le canal de propagation constitue le milieu atmosphérique. C'est un milieu très complexe et dynamique pouvant affecter les caractéristiques du faisceau laser émis. En plus, 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 d'une onde lumineuse dans l'atmosphère est affectée principalement par la diffusion et l'absorption du rayonnement des particules et les molécules composant le milieu. 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...) [9].

### II.3.3 Récepteur optique

De même que pour les modules d'émission, l'interface d'un module de réception est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation possible. Ce rôle est tenu par la photo détectrice qui se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. La première propriété requise pour un photodétecteur est la sensibilité à la longueur d'onde utilisée, la deuxième, la rapidité et la troisième, l'apport minimum de bruit. Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser. La figure II.10 illustre le principe général de la réception optique [4,5,8].

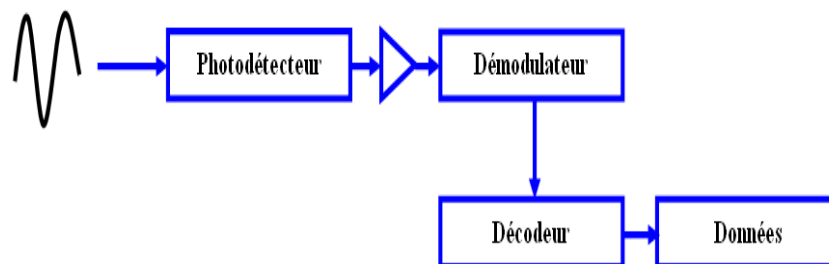


Figure II.10. Module de réception optique [4,5,8].



Le photodétecteur est un semi-conducteur de jonction PN polarisée en inverse permet la conversion du signal optique reçu (les photons) en signal électrique par l'effet photoélectrique [3].

Les photodiodes peuvent être classées en deux catégories : celles qui n'ont aucun gain interne PN et PIN, et celles qui ont un gain interne Avalanche (APD).

PIN (Positive Intrinsic Negative Photodiodes). Ce sont également des dispositifs 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. Lorsqu'il est polarisé en inverse, ce composant émet un courant proportionnel à la puissance optique incidente.

APD (Avalanche Photo Diode). Ce sont des composants semi-conducteurs qui réagissent à l'intrusion de photon dans la zone de jonction PN par le déclenchement d'une avalanche électronique. Ce phénomène crée un courant électrique conséquent à partir de très peu de photons incidents [6,7,10].

#### **II.4 Choix d'une longueur d'onde**

Le choix de la longueur d'onde est un paramètre important pour une liaison optique en espace libre. Cependant, deux plages de longueurs d'ondes sont utilisables, les plages infrarouges et visibles qui se répartissent dans des fenêtres de transmission optique. Dans ces fenêtres, les longueurs d'ondes émises ne souffrent pas beaucoup de phénomènes d'absorption atmosphérique. Un autre avantage de l'utilisation de ces longueurs d'ondes est qu'elles sont utilisées dans les composants utilisant les fibres optiques. Dans les fenêtres de transmission, les grandes longueurs d'ondes (infrarouge lointain) possèdent une meilleure transmission atmosphérique que les plus faibles longueurs d'ondes. Toutefois, il n'existe pas de fenêtre de transmission à toutes les longueurs d'ondes. En effet, l'absorption atmosphérique est un phénomène sélectif lié à la composition de l'atmosphère. Ainsi, la transmission spectrale de l'atmosphère va présenter des zones transparentes dites fenêtres de transmission atmosphérique et des zones opaques ou fenêtres de blocage atmosphérique. Ces fenêtres permettent les transmissions optiques en espace libre sans pertes excessives. La figure II.11 illustre les principales fenêtres de transmission pour la partie du spectre allant de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain [2,8].

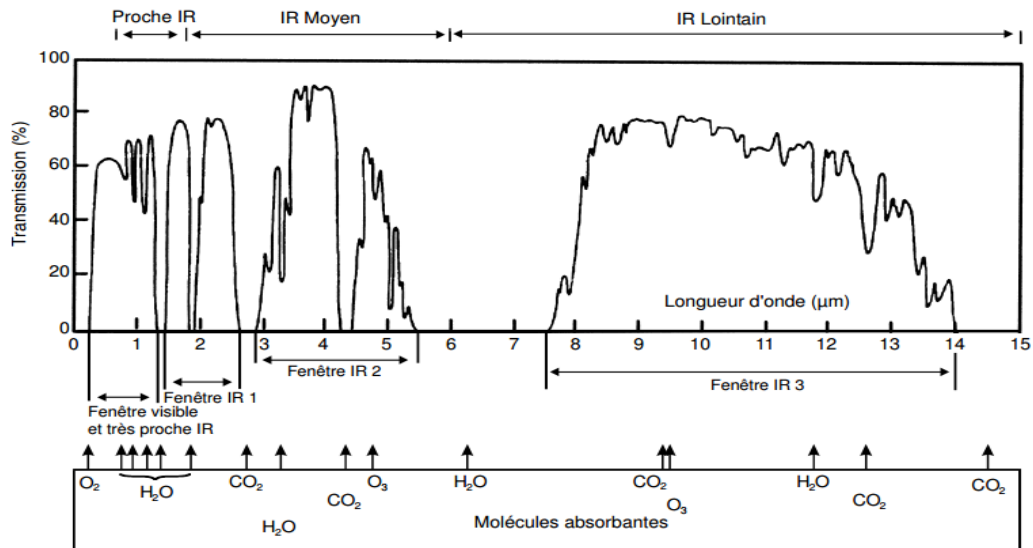


Figure II.11. Fenêtre de transmission des longueurs d'onde [8].

## II.5 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 de temps de leur fonctionnement dans des conditions acceptables.
- la fiabilité assure un débit d'informations par une qualité de service donnée [3].

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 [8].

### II.5.1 Intensité rayonnante

Le rayonnement optique de la plupart des émetteurs optiques peut être modélisé par un modèle Lambertien généralisé [8,11]. Un émetteur ayant un rayonnement de type Lambertien généralisé d'ordre "  $m$  " a un diagramme de rayonnement exprimé par la relation suivante :

$$R_0(\varnothing) = \left(\frac{m+1}{2\pi}\right) * \cos^m(\varnothing) \quad (\text{II.1})$$

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

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

$$I = P_T * R_0(\emptyset) \quad (\text{II.2})$$

### II.5.2 Puissance optique reçue

Elle se calcule comme pour les faisceaux hertziens terrestres, mais avec des ordres de grandeurs très différents [8,12]. La puissance optique reçue est donnée par la relation suivante :

$$P_R = P_T * G_T * G_L * G_R * \tau_T * \tau_L * \tau_{atm} \quad (\text{II.3})$$

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 :

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

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

### II.5.3 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 [8,12]. Pour une distance L séparant l'émetteur du récepteur, elle est donnée par la relation suivante :

$$P_D = \frac{P_T}{4\pi L^2} \quad (\text{II.5})$$

### II.5.4 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 [8,13]. Il existe plusieurs modèles basés sur la fréquence et la distance. Le calcul se fait à l'aide l'équation suivante :

$$PEL = 32.45 + 20 * \log(L) + 20 * \log(f) \quad (\text{II.6})$$

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 :

$$P_R(L) = P_T * G_T * G_L * G_R = \frac{P_T * G_T * G_R * \lambda^2}{(4\pi L)^2} \quad (\text{II.7})$$

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

$$P(L)[dB] = 10 \log \left( \frac{P_T}{P_R} \right) = -10 \log \left( \frac{G_T * G_R * \lambda^2}{(4\pi L)^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

### II.5.5 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 [8,14].

A 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 :

$$M_{Liaison}(dB) = P_T + |S_r| - Aff_{Atm}(dB) - P_{tot}(dB) \quad (\text{II.9})$$

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 représentée par l'équation suivante :

$$Aff_{Geo} = \frac{S_L}{S_{capture}} \quad (\text{II.10})$$

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 :

$$Aff_{Geo} = \frac{\pi(L\theta)^2}{4*S_{capture}} \quad (II.11)$$

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.

### II.5.6 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 de bruit des récepteurs, il est possible de définir le rapport signal sur bruit par :

$$\frac{P_R}{N} = \frac{P_T * G_T * G_L * G_R * \tau_T * \tau_L * \tau_{atm}}{N} \quad (II.12)$$

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

$$N = k * T * B \quad (II.13)$$

Où  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T$  la température système en Kelvin et  $B$  la bande de fréquence [8,15].

### II.5.7 Débit de transmission

Celui-ci se calcule à partir de rapport signal sur bruit et du rapport de l'énergie par bit [8,16]. Le rapport correspond à l'énergie par bit sur la densité de bruit. Cette valeur dépend du type de modulation choisi 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 :

$$\frac{E_b}{N} = \left(\frac{E_b}{N}\right)_{requis} + M_{Liaison}(dB) \quad (II.14)$$

Finalement, le débit de transmission est donné par la formule :

$$Débit = 10 \left( \frac{\left(\frac{P_R}{N}\right) - \left(\frac{E_b}{N}\right)}{10} \right) \quad (II.15)$$

### II.5.8 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 :

$$C_{(t)} = B \log_2(1 + SNR_{(t)}) \quad (\text{II.16})$$

La capacité d'un canal est exprimée en bit/s, la bande passante  $B$  en Hertz, et SNR représente le rapport signal-à-bruit [8].

### II.6 Conclusion

À la lecture de ce chapitre, nous pouvons dire que l'espace libre utilisé en tant que support de propagation pour la lumière est devenue un élément clé des systèmes des télécommunications optiques. Nous avons décrit également les différents composants optoélectroniques qui peuvent être utilisés dans d'un système FSO. Le chapitre suivant sera consacré sur la technique de multiplexage en longueur d'onde (WDM) et leurs avantages par rapport d'autres techniques.

---

## CHAPITRE III

---

### Multiplexage en longueur d'onde (WDM)

### III.1 Introduction

Afin d'augmenter la capacité totale des systèmes de transmission optique, une nouvelle technique de transmission permettant de mieux exploiter la bande passante offerte, qui est appelée le multiplexage en longueur d'onde (WDM). Ce chapitre présente deux types différents de multiplexages optiques existants afin de déterminer lequel est le plus adapté pour une utilisation dans un système FSO.

### III.2 Principe d'une liaison optique

Dans une liaison optique simple, nous pouvons distinguer trois éléments essentiels (voir la figure III.1) :

- l'émetteur reçoit les données à transmettre sous forme électrique et les transforme en variations optiques. Il comporte une source de lumière (une DL ou une LED) et éventuellement un modulateur ;
- la ligne de transmission qui véhicule les impulsions optiques entre le point de départ et d'arrivée (ici en utilisant une liaison FSO) ;
- le récepteur qui réalise l'opération inverse de celle de l'émetteur, c'est-à-dire transforme les signaux optiques en leur équivalent électronique afin de résulter les données de départ. Pour ce faire, des sous-systèmes de traitement du signal et de synchronisation sont nécessaires [17].



**Figure III.1.** Structure d'une liaison optique simple.

### III.3 Techniques de multiplexage

Dans cette section, nous discutons les deux techniques de multiplexage qui peuvent être utilisées dans des systèmes de transmission optique.

Le terme « multiplexage » [18,19] regroupe l'ensemble des techniques qui permettent de transmettre simultanément plusieurs signaux indépendants via un seul support de transmission.

De nombreuses techniques de multiplexage, développées à l'origine pour des communications RF ou bien filaires, ont été adaptées aux transmissions optiques afin de profiter de la large bande passante d'un support de transmission par exemple une fibre optique. L'objectif est de transférer un maximum de signaux sur un seul médium de communication (sur fibre ou en



espace libre : FSO). La difficulté étant, bien entendu, de pouvoir reconstituer correctement chaque signal en réception avec un minimum d'erreur.

À partir de  $N$  signaux à haut débit  $D$ , le multiplexage permet d'atteindre ainsi une transmission de très haut débit  $N * D$  sur un médium de communication qui serait complexe à réaliser directement en raison des limitations fréquentielles des composants optoélectroniques de pilotage [1,18].

### III.3.1 Multiplexage temporel optique (OTDM)

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing) [19], ou Multiplexage à Répartition Temporelle (MRT)) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un intervalle de temps, à tour de rôle pour chaque utilisateur (voir la figure III.2). L'allocation de cette bande passante se fait en divisant l'axe du temps en périodes de durée fixe, et chaque utilisateur ne va transmettre que pendant une de ces périodes déterminée. Le multiplexage TDM permet alors de regrouper plusieurs canaux de communication à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé (par exemple, conception d'un débit 40 Gbits/s, à partir de 4 séquences à 10 Gbits/s) [18,20,21].

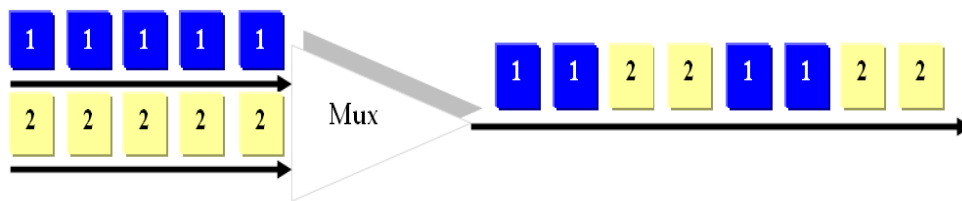
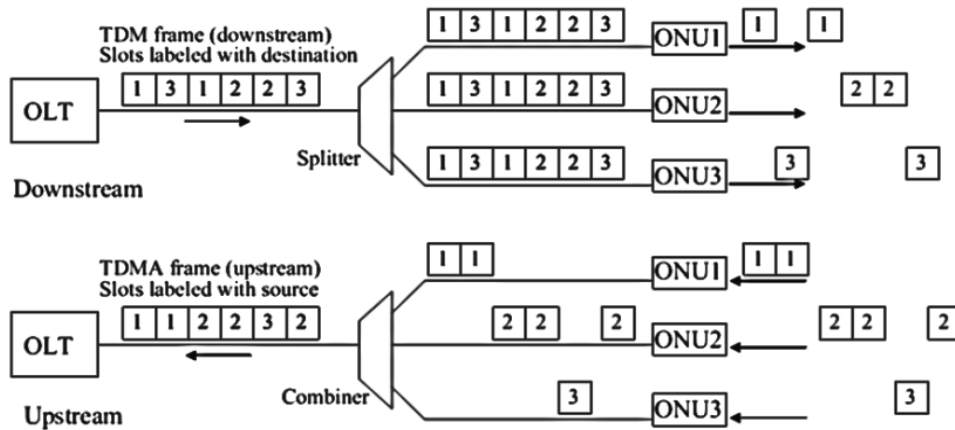


Figure III.2. Multiplexage TDM pour 2 utilisateurs [18].

Le multiplexage temporel peut être réalisé optiquement (OTDM, Optical Time Division Multiplexing). L'émetteur est constitué de  $N$  sources optiques en parallèle modulées au débit  $D_b$  bit/s. Cette technique nécessite un codage de type RZ pour que les impulsions codées aient une durée inférieure à  $T_b/N$  et que le multiplexage optique puisse se faire sans recouvrement optique. Le multiplexage optique temporel fournit une technique d'accès utilisable dans les réseaux locaux. Le temps est partagé entre les différents utilisateurs : chacun d'eux dispose d'une tranche temporelle pour émettre. Les différents signaux sont « assemblés » pour être transmis sur une porteuse optique unique [18,22].



- OLT : *Optical Line Termination*
- ONU : *Optical Network Unit*
- PON : *Passive Optical Network*

**Figure III.3.** Architecture PON basée sur le multiplexage temporel [18].

Le concept de déploiement d'une architecture du réseau PON, dans la majorité des opérations repose sur le partage temporel d'une seule longueur d'onde entre plusieurs utilisateurs. La figure III.3 illustre le principe du multiplexage temporel, TDM-PON.

Quelques limites du TDM-PON :

- avec la montée en débit, le coût des sous-systèmes émetteur-récepteur optiques devient très important ;
- la limite en vitesse de l'électronique pose problème à des débits élevés ;
- le multiplexage temporel TDM-PON rencontre des limites au niveau de la synchronisation et des modules de réception à l'OLT ;
- le défi est de concilier la montée en débit et la réutilisation de l'infrastructure existante.

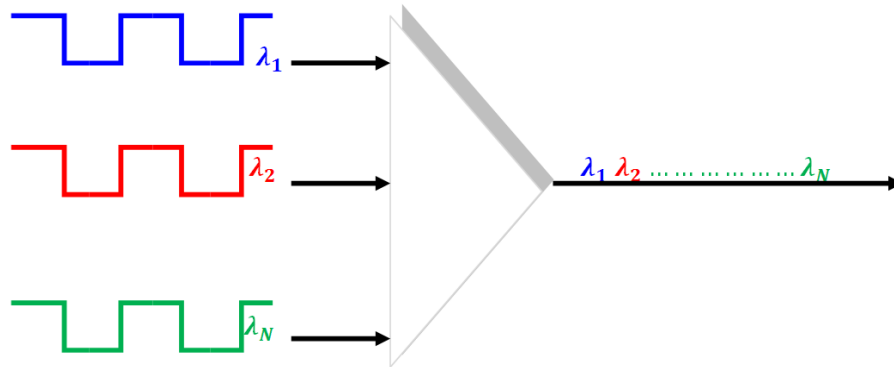
Le TDM-PON pourrait être considéré comme une solution attractive uniquement pour un débit inférieur ou égal à 10 Gbit/s. Par conséquent, l'utilisation de la longueur d'onde est envisagée pour un débit agrégé de 40 Gbit/s dans l'accès [18,21,23].

Le multiplexage en longueur d'onde du réseau optique passif ou WDM (pour Wavelength Division Multiplexing) est possiblement la prochaine génération de solution pour les réseaux d'accès. Nous nous intéressons dans la section qui suit à présenter l'architecture WDM et nous commençons par une présentation générale de la solution. Puis, les différents types possibles WDM pour réaliser une installation FSO en utilisant le multiplexage en longueur d'onde.

### III.3.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Pour le multiplexage à répartition de longueur d'onde WDM (voir la figure III.4), il permet de transmettre l'information sur plusieurs longueurs d'onde, et de multiplier ainsi le débit de la

liaison. Le signal lumineux composé de toutes ces longueurs d'onde va transiter sur un support de transmission optique (par exemple fibre ou une liaison FSO), et le récepteur ou le nœud de répartition n'aura qu'à démultiplexer le signal pour obtenir les différents canaux de départ [18].

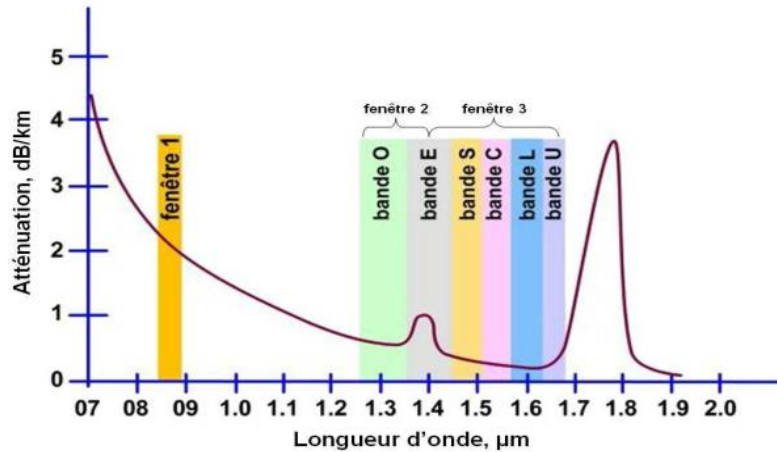


**Figure III.4.** Schéma de principe du multiplexage WDM [18].

L'utilisation du multiplexage WDM nécessite un ensemble de diodes laser émettant à des longueurs d'ondes différentes mais assez proches (c'est-à-dire que chaque client se voit attribuer une longueur d'onde spécifique), et multiplexeurs/démultiplexeurs optiques pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans le support de transmission. Il permet aux équipementiers d'opérer de précieuses économies en évitant le déploiement des supports de transmissions supplémentaires. L'installation d'une liaison WDM ne nécessite pas une restructuration complète des réseaux existants. Il suffit d'ajouter aux extrémités des lignes actuelles des composants de multiplexage et démultiplexage, accompagnés d'amplificateurs optiques pour compenser les pertes intrinsèques des composants. Cependant ces modifications entraînent un coût conséquent à prendre en compte en particulier dans le cadre du réseau d'accès [18,21,23].

Les bandes de fréquences optiques (et donc les longueurs d'ondes) qui sont utilisées dans les systèmes WDM ont été normalisées par l'UIT selon le plan suivant (voir figure III.5) :

- bande O (Original) : 1260 à 1360 nm (220.435 à 237.930 THz) ;
- bande E (Extended) : 1360 à 1460 nm (205.337 à 220.435 THz) ;
- bande S (Short wavelength) : 1460 à 1530 nm (195.942 à 205.337 THz) ;
- bande C (Conventional) : 1530 à 1565 nm (191.560 à 195.942 THz) ;
- bande L (Long wavelength) : 1565 à 1625 nm (184.487 à 191.560 THz) ;
- bande U (Ultra-long wavelength) : 1625 à 1675 nm (178.980 à 184.487 THz) [6,24].



**Figure III.5.** Atténuation vs longueur d'onde, incluant les fenêtres de transmission [24].

Le multiplexage WDM est caractérisé par l'intervalle entre deux longueurs d'onde minimum à considérer. On rencontre deux principales variantes du WDM : le DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) et le CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing).

### III.3.2.1 Multiplexage dense (DWDM)

On parle de Dense WDM lorsque l'espacement entre canaux est inférieur à 1,6 nm. De ce fait, le nombre de canaux qui peuvent être véhiculés dans une fibre optique est important, jusqu'à 32 canaux sur la bande C et 128 sur l'ensemble des bandes : C, S et L. L'engouement pour cette technologie a permis de réaliser des progrès importants en termes de fiabilité, débit et de performances. [18].

Les systèmes DWDM sont adaptés pour le transport court et long distance de données, voix, vidéo, et des services multimédias. Les systèmes DWDM sont parfaitement adaptés dans le Metro ou long distance où les demandes de capacité sont extrêmement élevés. Cette grande capacité demande un résultat de l'agrégation des services reçus des clients multiples à la périphérie de l'entreprise [25].

Les systèmes DWDM typiques utilisent des lasers qui ont un débit pouvant aller jusqu'à 10 Gbps (OC-192/STM-64). Les Émetteurs-récepteurs des systèmes DWDM consomment plus d'énergie et dissipent la chaleur beaucoup plus que les émetteurs-récepteurs des systèmes CWDM. Cela crée une obligation pour le refroidissement des sous-systèmes de DWDM [25].

La figure III.6 illustre un schéma DWDM. Aujourd'hui, les systèmes DWDM Metro déployés utilisent généralement un espacement de fréquence de 100 GHz ou de 200 GHz. L'espacement commun du DWDM peut être 200, 100, 50, 25, ou 12,5 GHz avec un nombre de canaux pouvant atteindre jusqu'à 300 ou plusieurs canaux à des distances de plusieurs milliers de kilomètres avec l'amplification et la régénération le long de cette route. Comme spécifié par le standard ITU G.694.1, les systèmes DWDM sont caractérisés par un espacement des canaux de 50

ou 100 GHz. La grille de fréquence de DWDM est ancrée à 193,1 THz. Les systèmes DWDM ont de façon significative une granularité plus fine entre les longueurs d'onde (espacement typique de 100 GHz) par rapport à leurs homologues CWDM. Selon la grille UIT, les produits DWDM fonctionnent dans la bande C entre 1530 et 1565 nm ou dans la bande L entre 1565 et 1625 nm [25].

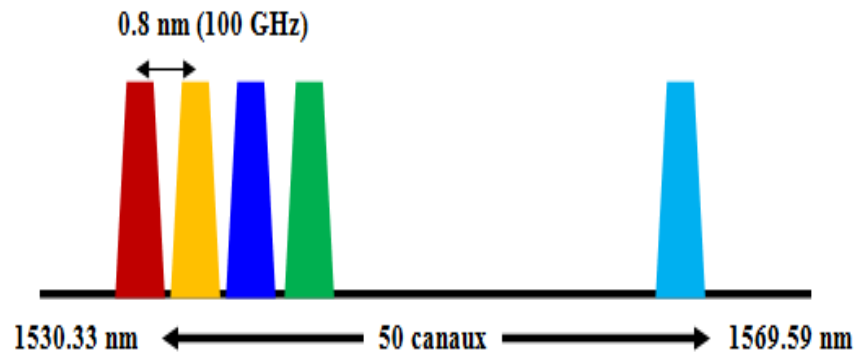
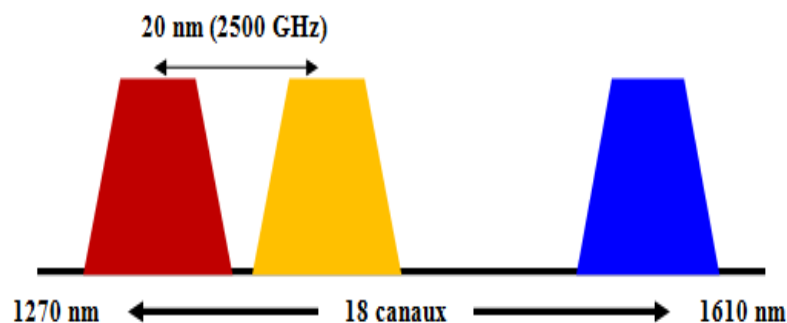


Figure III.6. Grille UIT pour DWDM avec un espacement 0.8 nm [18,25].

### III.3.2.2 Multiplexage de canaux largement espacés (CWDM)

Les systèmes CWDM [18] sont adaptés pour le transport court distance de données, voix, vidéo, et des services multimédias. Les systèmes CWDM sont idéalement adéquats pour des infrastructures en fibres avec des portées de fibres qui sont à 50 km ou moins et qui n'ont pas besoin de la régénération du signal ou de la présence des amplificateurs optiques. Les systèmes CWDM utilisent des lasers qui ont un débit de 2,5 Gbps (OC-48/STM-16) et peuvent multiplexer jusqu'à 18 longueurs d'onde. Cela fournit un maximum de 45 Gbps. Le laser de transmission et le détecteur de réception sont généralement intégrés dans un ensemble unique appelé un émetteur-récepteur.

La figure III.7 illustre un schéma CWDM. Les Système CWDM sont caractérisés par un espacement des canaux de 20 nm ou 2500 GHz tels que spécifiés par la norme ITU G.694.2. La grille CWDM est définie en termes de séparation de longueur d'onde. Cette grille est constituée de 18 longueurs d'onde définies dans la plage 1270 nm à 1610 nm [25].



**Figure III.7.** Grille UIT pour CWDM avec un espacement 20 nm [18,25].

Le tableau III.1 ci-dessous présente une comparaison entre les deux types de multiplexages (CWDM et DWDM).

CWDM	DWDM
Défini par longueurs d'onde	Défini par fréquences
Communications sur courte distance	Transmissions longue distance
S'appuie sur une large gamme de fréquences	S'appuie sur une plage de fréquences réduite
Longueurs d'onde propagées loin les unes des autres	Longueurs d'onde couplées étroitement
Dérive des longueurs d'onde possible	Lasers de précision requis pour garder les canaux focalisés
Divise le spectre en gros blocs	Découpe le spectre en petits morceaux
Le signal lumineux n'est pas amplifié	Le signal peut être amplifié

**Tableau III.1.** Comparaison entre CWDM et DWDM [26].

### III.3.2.3 Les apports du WDM

Le WDM répond aux besoins d'augmentation de débits et de taux de partage dans le réseau d'accès [21].

- la limite en débit imposée par le TDM peut être dépassée en introduisant le WDM et en affectant une longueur d'onde par utilisateur, ce qui revient à faire du point à point en longueur d'onde. Nous cumulons ainsi les avantages du point à point (c'est-à-dire un débit pouvant être amélioré de 100 Mbit/s à 2.5 Gbit/s, une couche MAC simplifiée, l'absence de problème de synchronisation) ;

- la souplesse de multiplexage permet de superposer des adressages différents en fonction du type de clients (FFTx), des services (voix, données, vidéo ...), des technologies finales (xDSL, Wireless, Ethernet...);
- le WDM permet une indépendance vis-à-vis protocoles et une indépendance entre canaux;
- de plus, cette technique permet une plus grande concentration des clients sur un même lien principal (augmentation de la portée et du nombre de clients) et la localisation de panne est plus aisée que lorsqu'il y a partage de la longueur d'onde.

### III.4 Mesure de la performance d'une liaison optique

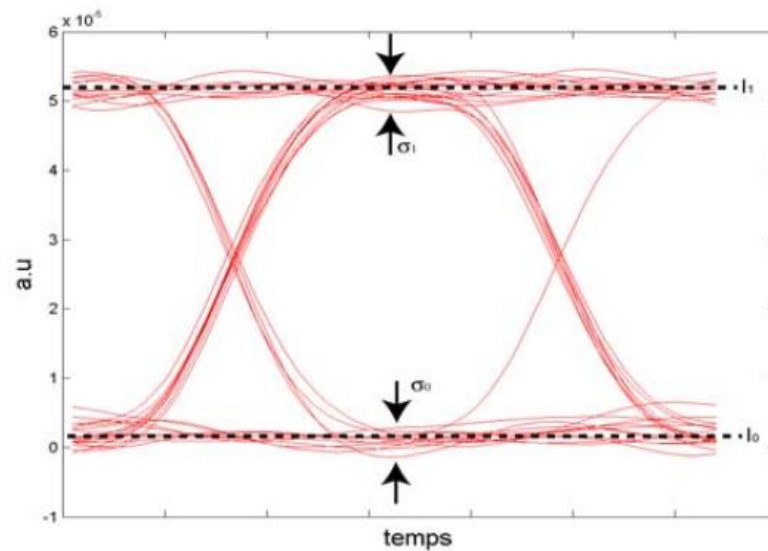
Pour le terme « performance », nous entendons la capacité du système de transmission à transmettre le plus fidèlement possible l'information. Pour les systèmes de transmission numérique, cette performance est quantifiée par le taux d'erreurs sur les bits (TEB ou BER Bit Error Rate en anglais), c'est-à-dire le nombre d'erreurs de transmission rapporté au nombre de bit transmis sur une période d'observation donnée. Plus la période est longue, meilleure est l'estimation du TEB. Une erreur correspond à une mauvaise décision sur la valeur du bit reçu. C'est-à-dire que le récepteur détecte un 0 au lieu de détecter un 1 et vice-versa.

Comme dans toutes les liaisons soumises à des perturbations diverses et variées, les erreurs de transmission font partie intégrante du système. Le concepteur, s'il ne peut les éliminer totalement, peut quand même limiter la probabilité d'apparition des erreurs.

Une méthode directe de mesure du TEB consiste à compter les erreurs de transmission. Si cette technique peut être facilement appliquée aux systèmes radio ou filaires qui présentent un taux d'erreur assez élevé (de l'ordre d'un bit erroné sur un million de bits transmis ou  $10^{-6}$ ), elle est de moins en moins applicable aux systèmes de transmission optique pour lesquels les erreurs de transmission sont désormais beaucoup moins fréquentes (de l'ordre d'un bit erroné sur mille millions de bits transmis voire moins). Il faut alors faire appel à des techniques d'estimation du TEB sans passer par les techniques de comptage.

La plus connue consiste à estimer le TEB à partir du diagramme de l'œil en réception. On a une relation de la sorte qui relie la probabilité de mauvaise décision du bit reçu aux paramètres physiques de la transmission, et notamment à la puissance optique reçue par l'intermédiaire du photo-courant. La figure III.8 illustre les différents paramètres de l'équation (III.1) sur le diagramme de l'œil électrique dans le récepteur sous l'hypothèse d'un bruit gaussien [17].

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \right) \quad (\text{III.1})$$



**Figure III.8.** Diagramme de l'œil [17].

Généralement, un système optique doit avoir un BER compris entre  $10^{-9}$  et  $10^{-12}$ . En outre, le facteur de qualité  $Q$  est une autre solution pour critiquer les performances d'une liaison optique. En effet, la relation entre le BER et le facteur  $Q$  se traduit par l'égalité suivante :

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

Où  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$  est la fonction d'erreur complémentaire. La fonction  $\operatorname{erfc}$  étant décroissante, le BER décroît avec le facteur  $Q$ . Le facteur  $Q$  est un moyen mathématique simple mais précis de mesurer les performances du système [27].

### III.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter deux techniques de multiplexage à savoir, OTDM et WDM, et qui sont utilisées généralement pour transmettre les signaux dans le domaine optique. Cependant, nous avons constaté que la technique WDM est très efficace dans le cas où nous voulons installer une liaison FSO. Au chapitre suivant nous aborderons 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 la technique DWDM.



---

## CHAPITRE IV

---

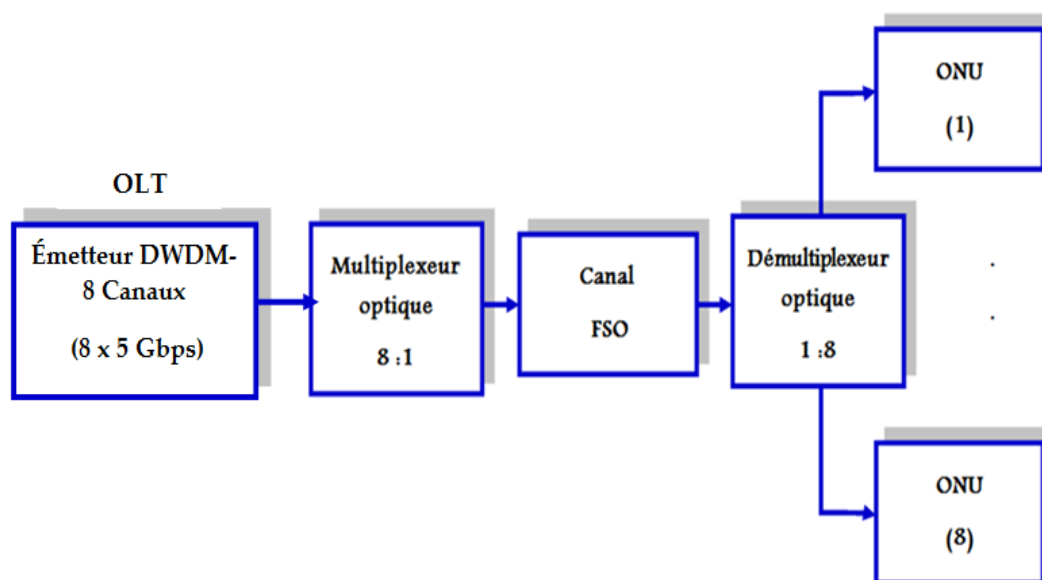
### Résultats et Interprétations

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une liaison optique DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) sous un canal FSO (Free Space Optical), chaque canal émet leur signal avec un débit de données de 5 Gbps dans la voie descendante, l'espacement entre canaux est de 0.8 nm (100 GHz). La liaison DWDM sous un canal FSO est très efficace pour fournir une transmission de données à des débits élevés avec un taux d'erreur binaire très faible (BER). La portée maximale du système conçu est de 4 000 m sans compensation. La théorie précédente nous a permis de développer une simulation introduite sous le logiciel industriel OptiSystem. Tout d'abord, nous commençons à présenter la performance d'une liaison optique FSO à haut débit qui a été proposée dans la section 2. Les résultats de la simulation ont été discutés dans la section 3. La conclusion de nos résultats simulés est présentée à la section 4.

## IV.2 Performance d'une liaison optique à haute débit (FSO)

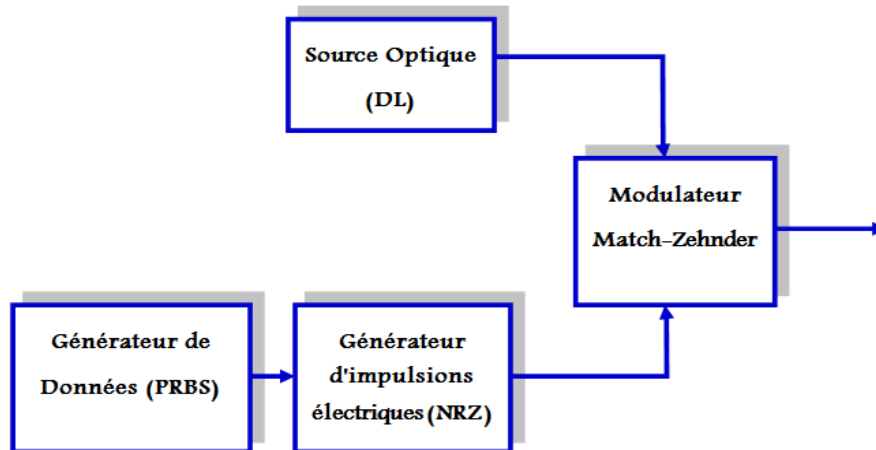
L'objectif de ce travail est de démontrer une conception d'une liaison optique dans l'espace libre sous un canal FSO basée sur une approximation faible-turbulence. Les communications optiques en espace libre (FSO), également connues sous le nom « communications optiques sans fil », sont des techniques rentables, large bande passante et présentent des avantages économiques convaincants, avec une capacité de débit potentiellement élevée, un faible coût et une bande passante particulièrement large sur un spectre non réglementé (spectre sans licence).



**Figure IV.1.** Configuration d'une liaison optique simulée.

Dans les communications FSO, les émetteurs-récepteurs optiques communiquent à travers l'air pour former des liaisons directes point à point. L'émetteur convertit le signal électrique en un signal optique et envoie à travers l'atmosphère (espace libre). En revanche, le récepteur convertit le signal

optique en un signal électrique. La qualité de la ligne de transmission est estimée par le taux d'erreur binaire réalisé (BER). La figure IV.1 illustre la configuration de simulation d'un système de communication DWDM-FSO à 8 canaux.



**Figure IV.2.** Configuration d'OLT.

La figure IV.2 illustre les composants OLT (Optical Line Terminal) d'un émetteur OLT-DWDM. OLT se compose de : générateur de données (PRBS), générateur d'impulsions électriques (NRZ) et source optique (DL) et un modulateur Match-Zehnder. La puissance optique de l'émetteur est de 30 mW. Un émetteur DWDM transmet 8 canaux différents, ayant un espacement de canal de 0,8 nm. Chaque canal transmet 5 Gbps de données dans la voie descendante.

Cependant, nous avons utilisé un générateur d'impulsions électriques Non-Return-to-Zero (NRZ) pour fournir un format de modulation sur des données numériques qui sont distribuées à travers un générateur binaire pseudo-aléatoire PRBS (Pseudo-random Binary Sequence). Le débit de données entier est transmis sous forme numérique 0 et 1. La sortie de l'émetteur DWDM est insérée avec un multiplexeur optique. Le multiplexeur optique multiplexe tous les canaux et puis il est inséré avec un canal FSO. Un canal FSO consiste le lien entre un émetteur et un récepteur. Le tableau IV.1 présente les paramètres essentiels pour le système conçu.

En outre, la puissance reçue au ONU est directement proportionnelle à la puissance d'émission de OLT et à la surface d'ouverture du récepteur, mais inversement proportionnelle à la distance de la liaison et à l'angle de divergence, comme indiqué sur l'équation IV.1. La partie exponentielle de l'équation est liée à l'atténuation atmosphérique et elle influe sur la qualité de la liaison. La puissance reçue au ONU peut être augmentée à partir de l'augmentation de la puissance d'émission et la surface d'ouverture du récepteur ou en réduisant la divergence du faisceau transmis.

$$P_R = P_T * e^{-\alpha L} * \left( \frac{A_{Rx}}{(\theta L)^2} \right) \quad (IV.1)$$

Où :

- $P_T$  : puissance d'émission ;
- $P_R$  : puissance reçue ;
- $L$  : distance de liaison entre l'émetteur et récepteur ;
- $\alpha$  : atténuation atmosphérique ;
- $A_{Rx}$  : surface d'ouverture du récepteur ;
- $\theta$  : angle de divergence.

Paramètres	Descriptions
Nombre de canaux	8
Espacement entre canaux	0.8 nm ou (100 GHz)
Distance de la liaison FSO	4000 m
Diamètre d'ouverture d'émetteur FSO	5 cm
Diamètre d'ouverture de récepteur FSO	7.5 cm
Angle de divergence	0.25 mrad
Atténuation	3.5 dB/km

**Tableau IV.1.** Paramètres de simulation.

Dans ce travail, nous avons constaté que lorsque l'angle de divergence est diminué, la performance est considérablement améliorée et la fiabilité du lien augmente. Actuellement, la plupart des systèmes FSO sont utilisés des émetteurs à DEL ou à des diodes lasers (DLs) autour des longueurs d'ondes de 800-850 nm ou 1500-1550 nm. La liaison FSO a une portée de 4 000 mètres avec un angle de divergence du faisceau de 0,25 mrad. Le système FSO utilisé deux diamètres différents en émission 5 cm et en réception 7.5 cm. En plus, L'atténuation environnementale est spécifiée par sa valeur moyenne de 3.5 dB/km (toutes ces valeurs sont indiquées dans le tableau IV.1).

Maintenant, la sortie du canal FSO est insérée avec un démultiplexeur optique. Le démultiplexeur optique sépare chaque canal à l'aide des filtres optiques, avec un espacement de 0.8 nm entre canaux lorsqu'il est transmis par l'émetteur DWDM. À la fin de système FSO, nous trouvons des récepteurs appellent des ONUs dont chaque ONU est définie par sa longueur d'onde.

La figure IV.3 illustre les composants ONU au niveau de chaque récepteur. Le récepteur convertit les données optiques sous forme électriques, nous utilisons un détecteur PDA à haute sensibilité pour effectuer cette opération. Après celui-ci, nous trouvons un filtre de Bessel passe-bas avec une fréquence de coupure 0.75 fois la fréquence de rythme qui est utilisée pour passer les basses fréquences limitées. Nous savons que les données transmettent dans le domaine numérique 0 et 1 sont affectées par un bruit et il peut se produire une interférence inter-symbole. Pour mesurer l'erreur, nous avons utilisé un analyseur de BER.

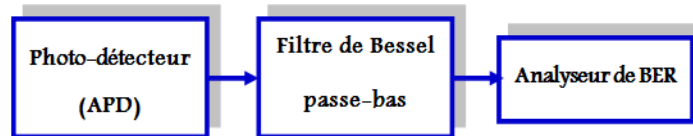


Figure IV.3. Configuration de ONU.

### IV.3 Résultats de simulation et interprétations

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus de la conception d'un système optique DWDM-FSO. Les effets de turbulence dans l'atmosphère pour le système proposé ont été étudiés en termes de facteur Q et de BER. Cependant, la figure IV.4 représente le spectre de 8 longueurs d'ondes sous un canal FSO dans un système DWDM.

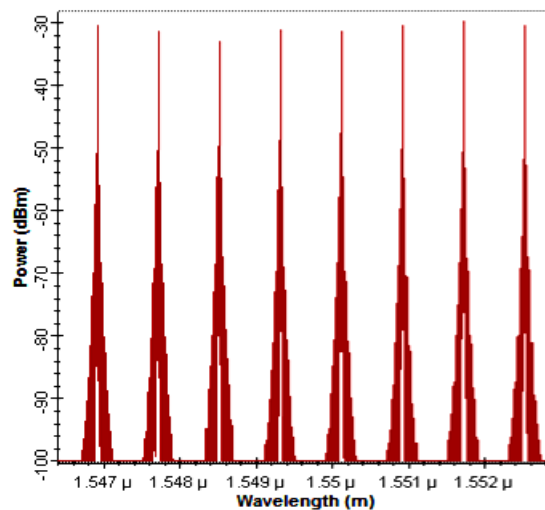


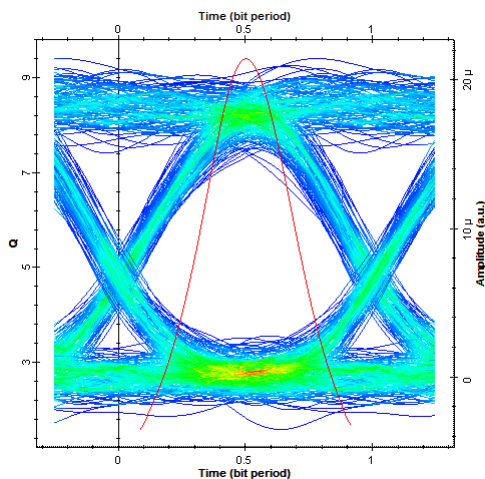
Figure IV.4. Les 8 longueurs d'ondes sous un canal FSO.

Par la méthode d'échantillonnage, nous avons sélectionné 4 canaux,  $\lambda_1 = 1552.52$  nm,  $\lambda_3 = 1550.91$  nm,  $\lambda_6 = 1548.51$  nm et  $\lambda_8 = 1546.91$  nm pour l'observation du système de communication WDM-FSO.

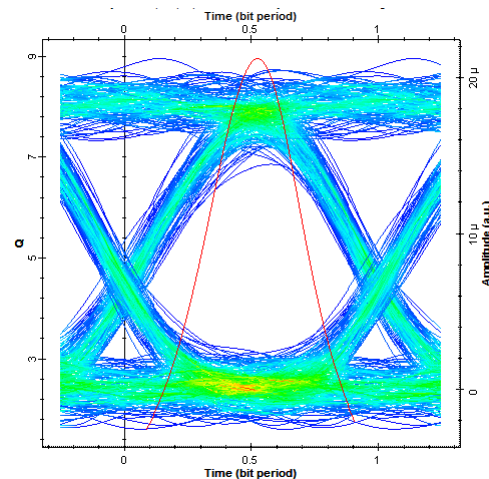
Longueurs d'ondes (nm)	BER	Facteur-Q
$\lambda_1 = 1552.52$ nm	$2.60 * 10^{-21}$	9.40
$\lambda_3 = 1550.92$ nm	$1.75 * 10^{-19}$	8.95
$\lambda_6 = 1548.51$ nm	$8.89 * 10^{-19}$	8.77
$\lambda_8 = 1546.91$ nm	$1.35 * 10^{-19}$	8.98

**Tableau IV.2.** Valeurs de BER et facteur-Q pour différentes longueurs d'ondes avec un format de modulation NRZ à 4 km.

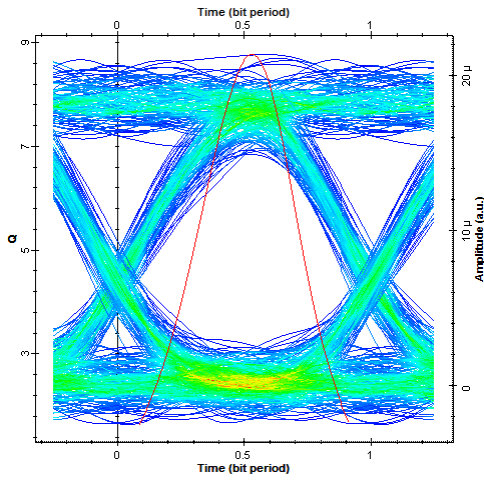
Le tableau IV.2 représente les résultats de BER et facteur Q pour différents canaux ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_6$ ,  $\lambda_8$ ) pour une liaison FSO de 4000 m. La figure IV.5 illustre les diagrammes de l'œil pour différents canaux ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_6$ ,  $\lambda_8$ ), avec une modulation NRZ pour une liaison FSO de 4000 m. Un diagramme de l'œil montre la largeur et la hauteur de l'ouverture de l'œil. Ainsi, la largeur et la hauteur de l'ouverture de l'œil sont grandes, ce qui signifie que la réception du signal au niveau d'ONU est très claire. La largeur de l'ouverture de l'œil définit l'intervalle de temps pendant lequel le signal reçu peut être échantillonné sans interférence et distorsion. Il a été observé que le format de modulation NRZ est beaucoup mieux pour la conception d'un système de communication DWDM-FSO parce que l'ouverture de l'œil pour le format NRZ est beaucoup mieux que le format RZ (voir le tableau IV.3 et la figure IV.6). Plus d'ouverture de l'œil signifie moins d'interférence inter-symbole, la dispersion et la distorsion.



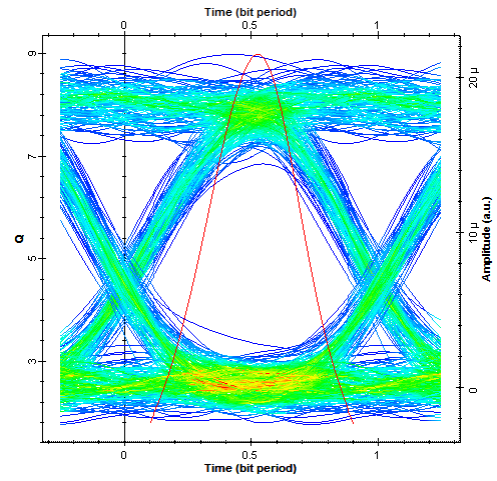
Analyseur de BER et facteur-Q canal 1



Analyseur de BER et facteur-Q canal 3



Analyseur de BER et facteur-Q canal 6

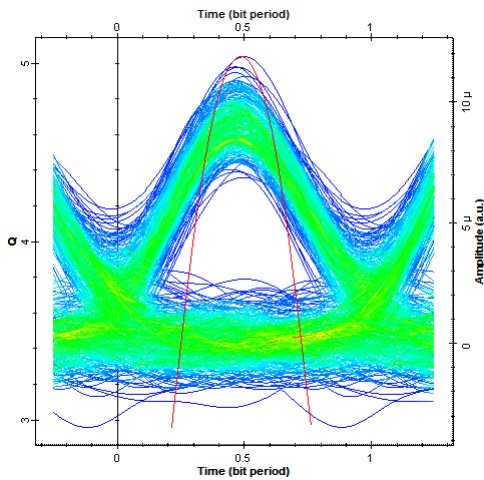


Analyseur de BER et facteur-Q canal 8

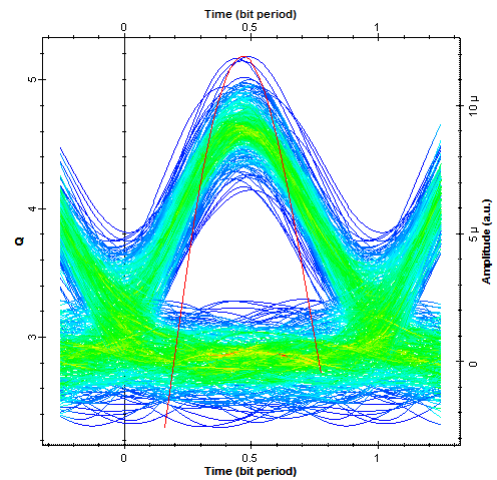
Figure IV.5. Diagramme de l'œil en sortie de 4 récepteurs pour un format de modulation NRZ à 4 km.

Longueurs d'ondes (nm)	BER	Facteur-Q
$\lambda_1 = 1552.52 \text{ nm}$	$2.34 * 10^{-7}$	5.04
$\lambda_3 = 1550.92 \text{ nm}$	$1.10 * 10^{-7}$	5.18
$\lambda_6 = 1548.51 \text{ nm}$	$2.55 * 10^{-7}$	5.02
$\lambda_8 = 1546.91 \text{ nm}$	$7.26 * 10^{-7}$	4.82

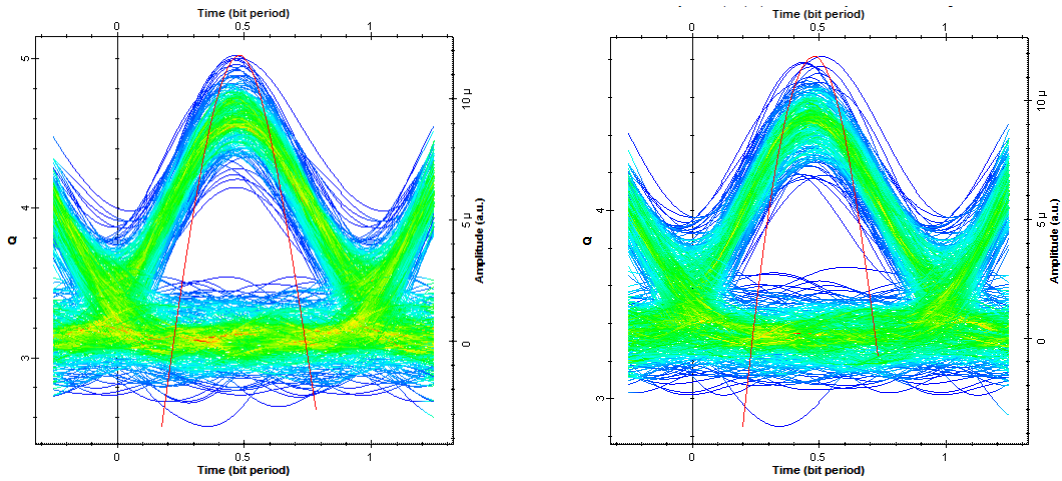
Tableau IV.3. Valeurs de BER et facteur-Q pour différentes longueurs d'ondes avec une modulation RZ à 4 km.



Analyseur de BER et facteur-Q canal 1



Analyseur de BER et facteur-Q canal 3



Analyseur de BER et facteur-Q canal 6

Analyseur de BER et facteur-Q canal 8

**Figure IV.6.** Diagramme de l'œil en sortie de 4 récepteurs pour un format de modulation RZ à 4 km.

D'après les résultats présentés précédemment, nous avons conclu que la modulation numérique NRZ montre une meilleure performance par rapport à la modulation numérique RZ. Dans ce qui est suit, nous allons utiliser la modulation numérique NRZ.

#### IV.3.1 L'effet de la variation de la distance de liaison DWDM-FSO

La figure IV.7 illustre la variation de BER en fonction de la distance de la liaison DWDM-FSO avec un format de modulation NRZ. Par exemple, pour les canaux 1, 3, 6 et 8 les valeurs de BER obtenues avec une format de modulation NRZ sont respectivement  $1.78 * 10^{-282}$ ,  $9.71 * 10^{-284}$ ,  $5.28 * 10^{-270}$  et  $1.68 * 10^{-282}$  à 1.5 km. En revanche pour les mêmes canaux et avec le même format de modulation, les valeurs de BER sont obtenues comme suit :  $5.45 * 10^{-8}$ ,  $2.4 * 10^{-7}$ ,  $2.97 * 10^{-7}$  et  $1.78 * 10^{-7}$  à 4.5 km pour même format de modulation. Donc, on a confirmé que, si la distance de liaison du canal FSO augmente le BER également augmente.

La figure IV.8 illustre la variation de facteur-Q en fonction de la distance de liaison DWDM-FSO pour un format de modulation NRZ. Pour les canaux 1, 3, 6 et 8, les valeurs de facteur-Q sont 35.883, 35.96, 35.07 et 35.885 à 1.5 km pour un format de modulation NRZ. En revanche pour les mêmes canaux, les valeurs de facteur-Q sont obtenues comme suit : 5.3, 5.03, 4.99 et 5.08 à 4.5 Km pour même format de modulation. Donc, nous avons constaté également que la distance de liaison DWDM-FSO a une nette influence sur la qualité du signal reçu au niveau d'ONU. Si la distance augmente, la qualité du signal reçu diminue.



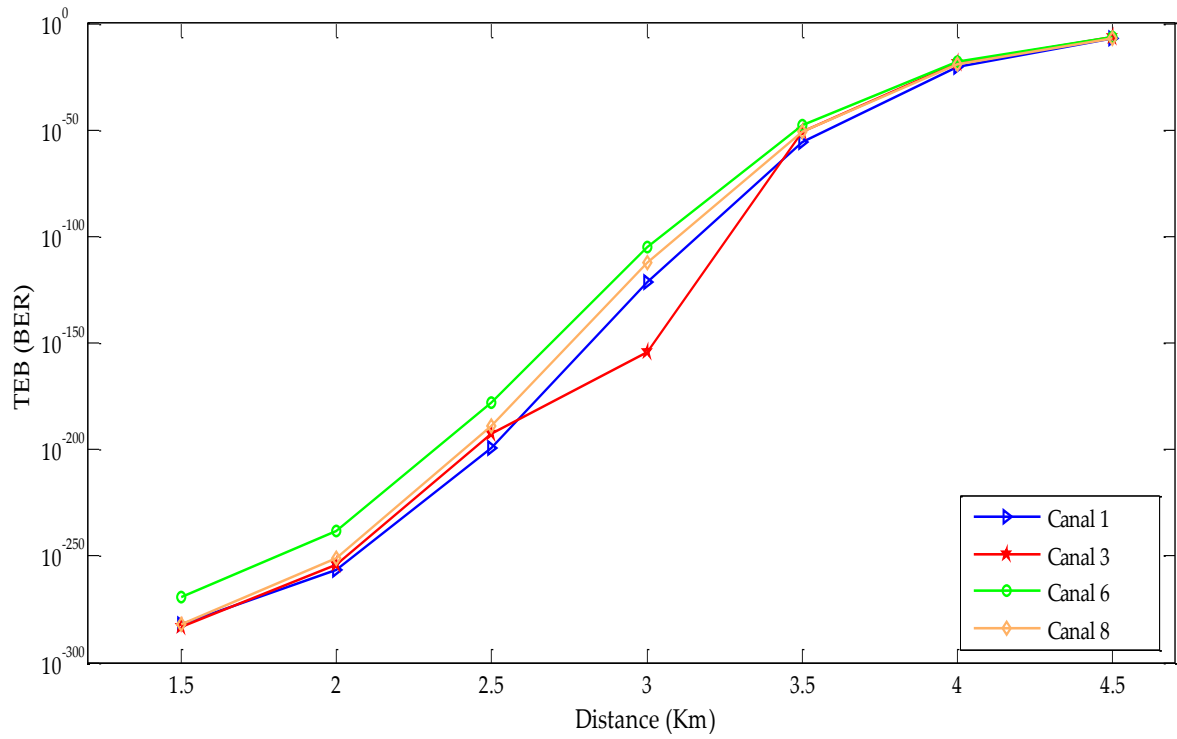


Figure IV.7. BER vs distance pour un format de modulation NRZ.

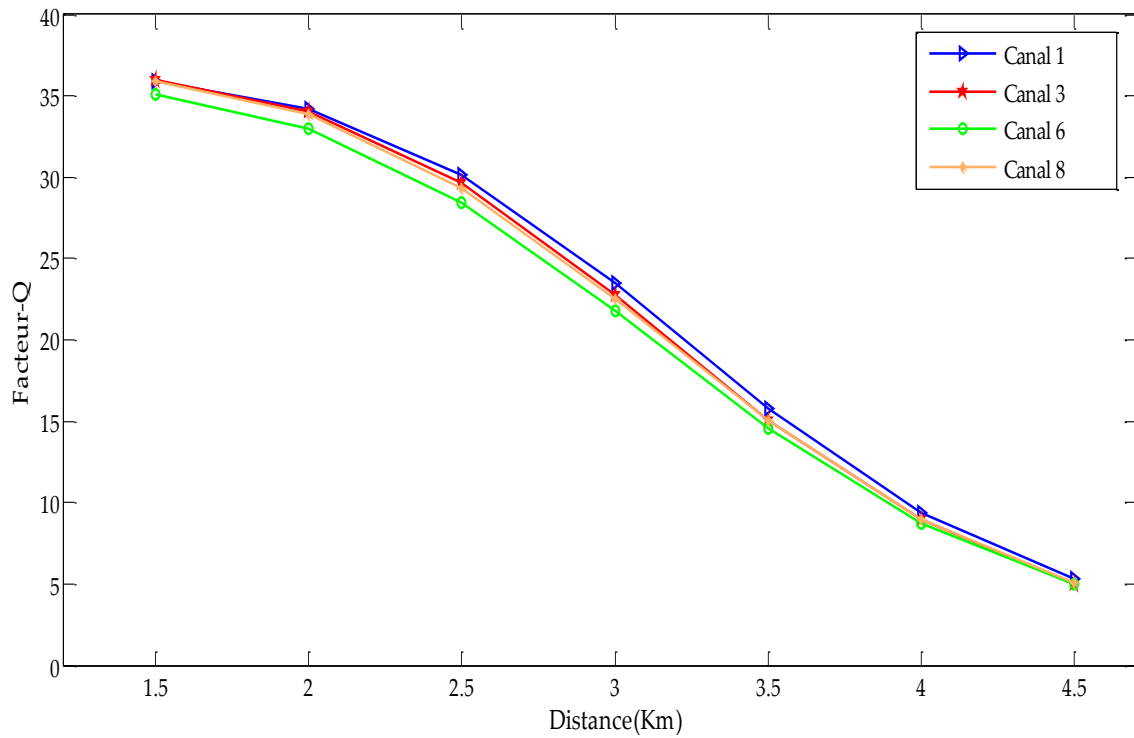


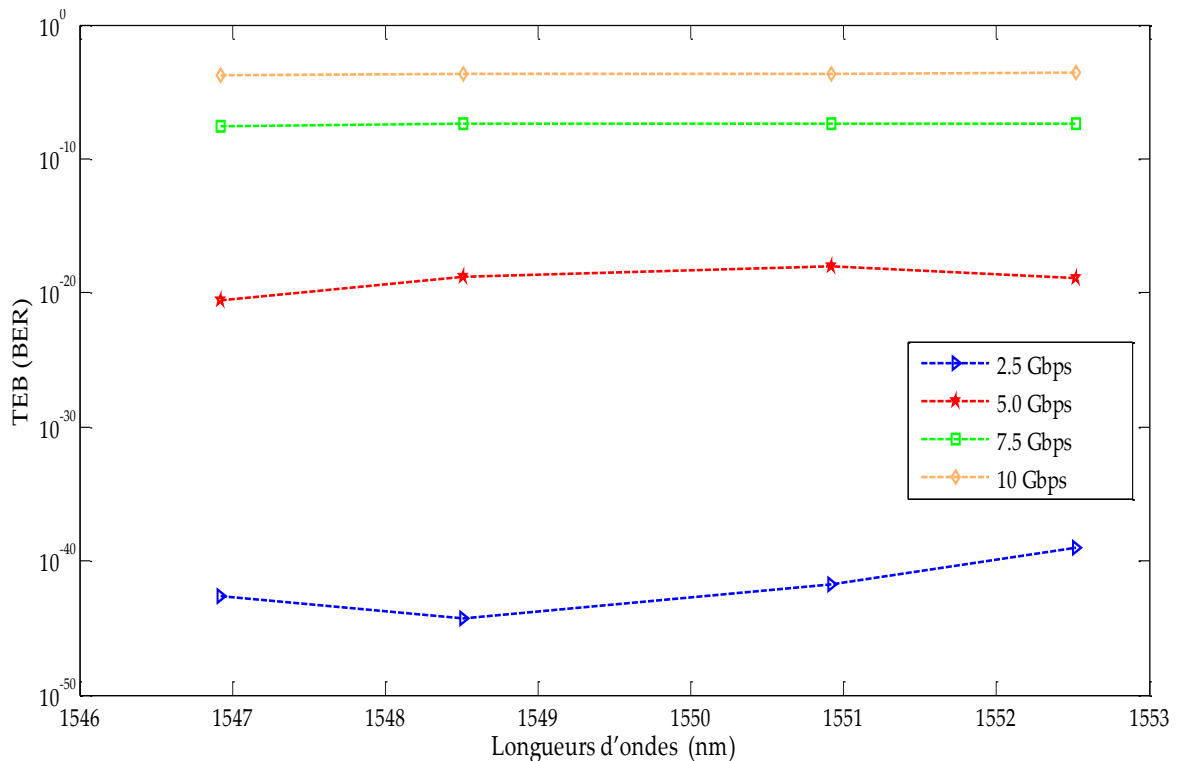
Figure IV.8. Facteur-Q vs distance pour un format de modulation NRZ.

**Note :** chaque canal transmet 5 Gbps de données dans la voie descendante.

### IV.3.2 L'effet de la variation de débit (Gbps) de transmission d'une liaison DWDM-FSO

Après les résultats obtenus précédemment à propos de l'effet de la variation de la distance de liaison DWDM-FSO, nous avons constaté qu'à partir de 4 km jusqu'à 4.5 km la performance de système DWDM-FSO présente une dégradation significatif en terme de qualité de transmission. Pour cela, on a pensé à fixer la distance du canal FSO à 4 km pour étudier l'effet de la variation de débit (Gbps) de transmission sur la liaison DWDM-FSO.

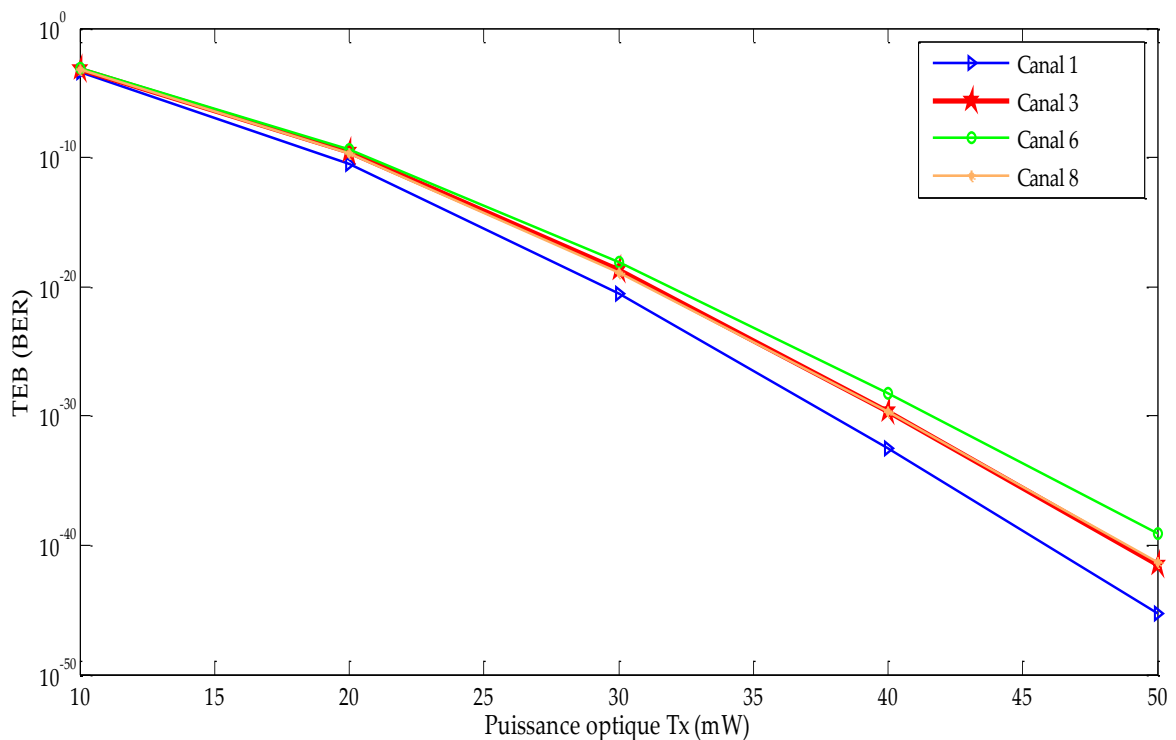
La figure IV.9 montre une comparaison de BER en fonction de quartes longueurs d'ondes du système DWDM-FSO à différents débits de données à 4 km. Par exemple, pour canal 3 ( $\lambda_3 = 1550.92$  nm) les valeurs de BER obtenues avec un format de modulation NRZ sont respectivement  $1.64 * 10^{-42}$ ,  $8.88 * 10^{-19}$ ,  $4.18 * 10^{-8}$  et  $2.38 * 10^{-4}$  pour 2.5 Gbps, 5Gbps, 7.5 Gbps et 10 Gbps. D'après ces résultats, nous avons constaté que lorsque le débit de données par canal augmente, le BER augmente également. Alors, le BER et le facteur de qualité sont deux grandeurs inversement proportionnelles liées à la distance de la liaison FSO et le débit de données de chaque canal.



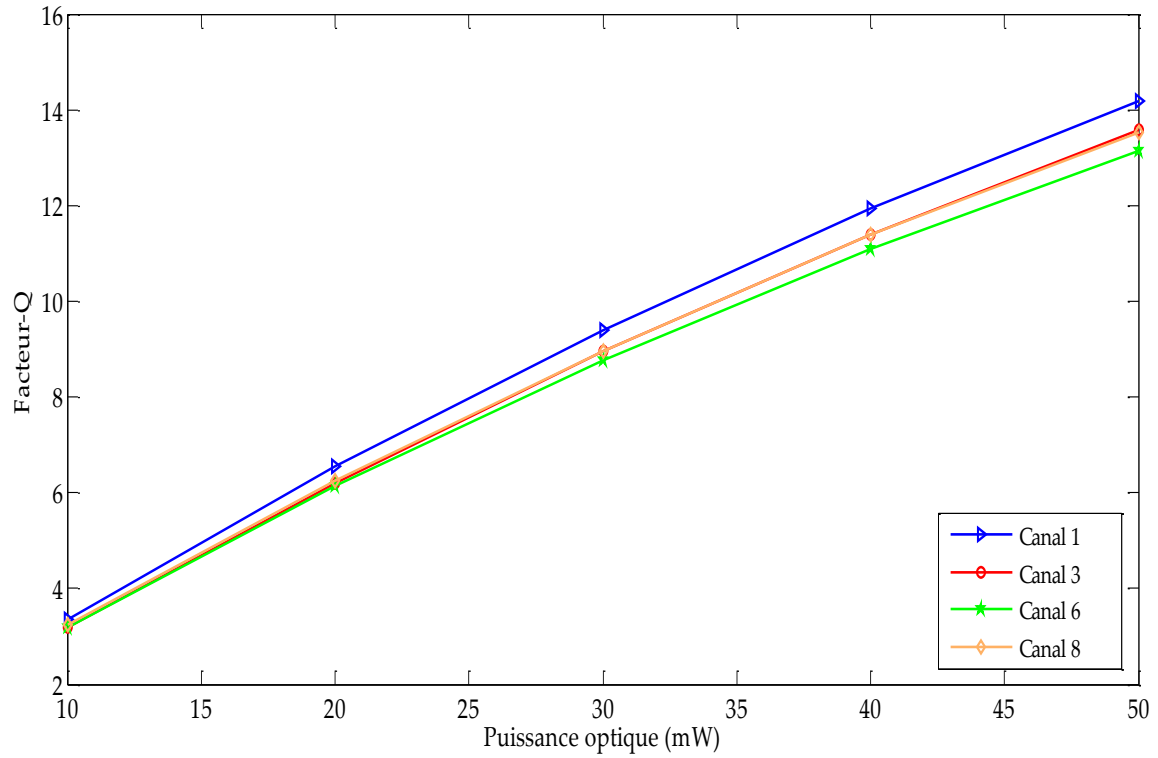
**Figure IV.9.** BER vs longueurs d'ondes pour différents débits de données à 4 Km.

### IV.3.3 L'effet de la variation de puissance optique d'un émetteur OLT-DWDM pour d'une liaison FSO

La figure IV.10 montre la variation de BER en fonction de puissance optique d'un émetteur OLT-DWDM pour une liaison FSO à 4 km avec un format de modulation NRZ. On a considéré que chaque canal transmet 5 Gbps de données dans la voie descendante. Par exemple, pour les canaux 1, 3, 6 et 8, les valeurs de BER sont obtenus comme suit :  $3.81 \times 10^{-3}$ ,  $7.12 \times 10^{-3}$ ,  $7.23 \times 10^{-3}$  et  $5.84 \times 10^{-3}$  pour une puissance optique de 10 mW. Par contre, pour les mêmes canaux on a trouvé les valeurs de BER comme suit :  $4.78 \times 10^{-46}$ ,  $2.78 \times 10^{-42}$ ,  $8.62 \times 10^{-40}$  et  $4.71 \times 10^{-42}$  pour une puissance optique de 50 mW. À partir des résultats mentionnés précédemment, il est tout à fait clair que l'augmentation de la puissance optique d'un émetteur OLT-DWDM a un impact significatif sur la performance d'une liaison DWDM-FSO et cela est bien confirmé aussi à travers les résultats obtenus de facteur de qualité de transmission qui est en relation avec le signal reçu au niveau de chaque récepteur ONU (voir la figure IV.11). Alors, par exemple pour une puissance optique de 10 mW, nous avons obtenu les valeurs de facteur-Q comme suit : 3.36, 3.19, 3.18 et 3.24 au niveau de chaque récepteur ONU (canal 1, 2,3 et 8), respectivement. Et pour une puissance optique de 50 mW, nous avons obtenus les mesures de facteur-Q (mêmes récepteurs ONU) comme suit : 14.19, 13.57, 13.14 et 13.53.



**Figure IV.10.** BER vs puissance optique pour un format de modulation NRZ à 4 Km.



**Figure IV.11.** Facteur-Q vs puissance optique pour un format de modulation NRZ à 4 km.

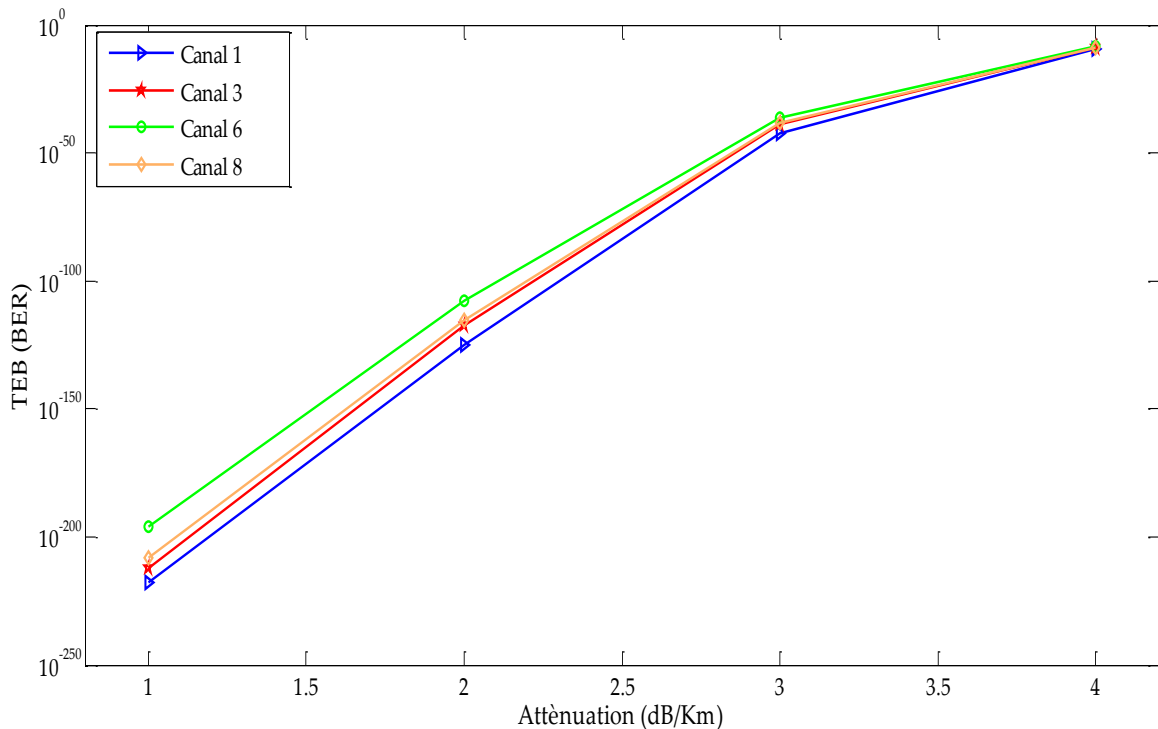
On note que généralement un système optique doit avoir un TEB (BER) compris entre  $10^{-9}$  et  $10^{-12}$ . En effet, nous avons trouvé les plages de puissance optique OTL-DWDM pour les deux valeurs de BER que nous avons cité précédemment (voir le tableau IV.4).

Longueurs d'ondes	TEB (BER)	Puissance optique
$\lambda_1 = 1552.52$ nm	$9.923 * 10^{-9}$ à $1.062 * 10^{-12}$	16.46 à 21.45 (mW)
$\lambda_3 = 1550.92$ nm	$9.971 * 10^{-9}$ à $9.969 * 10^{-12}$	17.56 à 21.56 (mW)
$\lambda_6 = 1548.51$ nm	$9.989 * 10^{-9}$ à $9.977 * 10^{-12}$	17.81 à 21.88 (mW)
$\lambda_8 = 1546.91$ nm	$9.922 * 10^{-9}$ à $9.87 * 10^{-12}$	17.36 à 21.41 (mW)

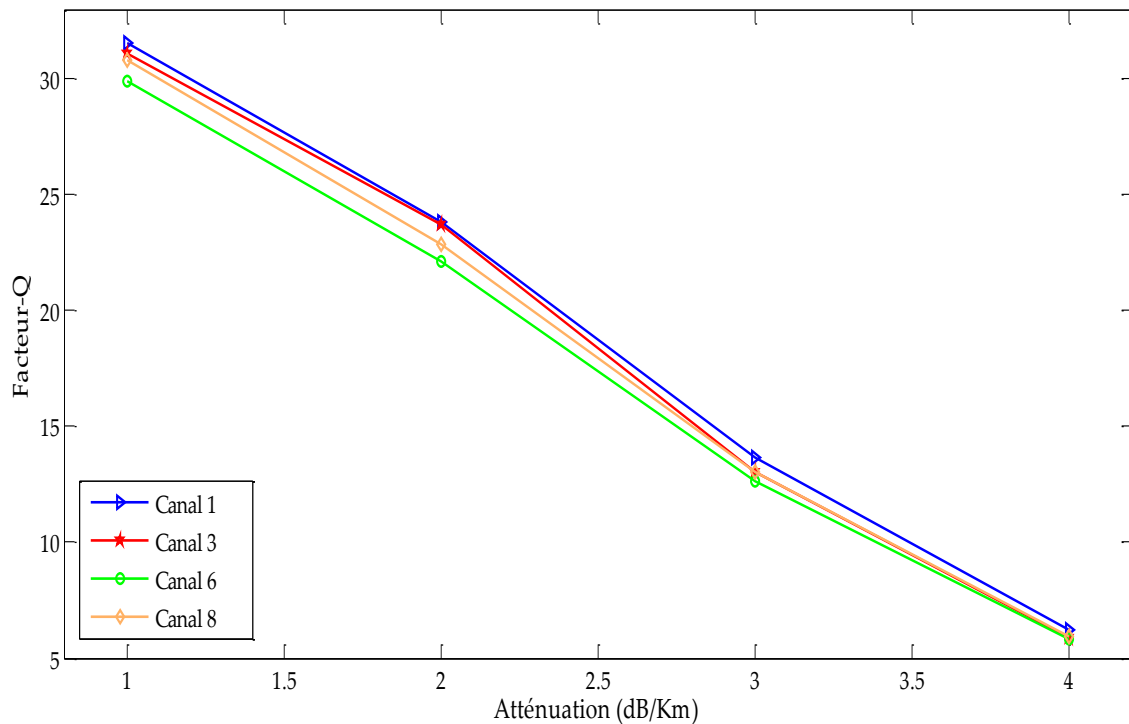
**Tableau IV.4.** Valeurs de BER et de puissance optique pour # longueurs d'ondes avec une modulation NRZ à 4 km.

#### IV.3.4 L'effet de variation de l'atténuation (dB/km) sous un canal FSO

La figure IV.12 illustre la variation de BER pour différentes valeurs d'atténuation qui sont ajoutées au système proposé DWDM-FSO. On a considéré que chaque canal transmet 5 Gbps de données dans la voie descendante avec une distance de liaison de 4 km. Pour une atténuation de 1 dB/km, les canaux 1, 3, 6 et 8 prennent les valeurs de BER suivantes :  $1.46 * 10^{-218}$ ,  $8.25 * 10^{-213}$ ,  $6.04 * 10^{-197}$  et  $1.632 * 10^{-208}$ , respectivement. Pour les mêmes canaux, nous avons varié la valeur d'atténuation jusqu'à 4 dB/km et nous avons constaté qu'il y a un changement de performance de la liaison DWDM-FSO, c'est-à-dire l'augmentation de l'atténuation de la liaison cause une perte d'énergie du signal reçu au niveau de chaque récepteur ONU, ce qui est résulte une forte augmentation du taux de BER et une forte diminution de facteur-Q de transmission (voir la figure IV.12). Bien-sûr, la figure IV.13 illustre la variation de facteur-Q pour différentes valeurs d'atténuation qui sont ajoutées dans le système proposée DWDM-FSO.



**Figure IV.12.** BER vs atténuation pour un format de modulation NRZ à 4 km.



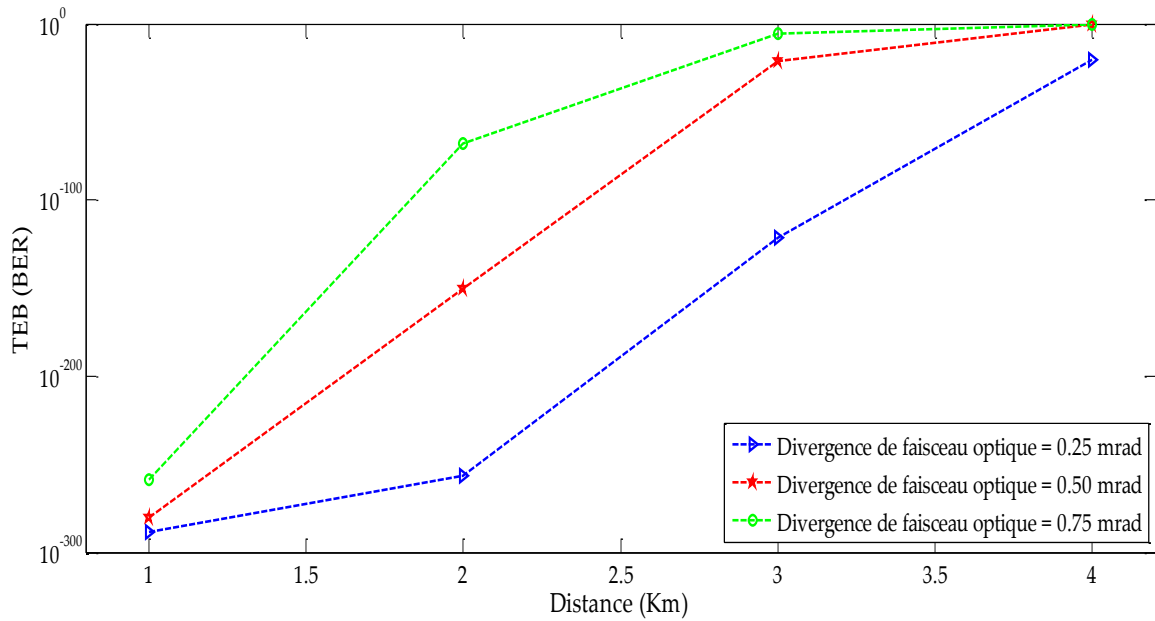
**Figure IV.13.** Facteur-Q vs atténuation pour un format de modulation NRZ à 4 km.

### IV.3.5 L'effet de variation de la divergence d'un faisceau optique sous un canal FSO

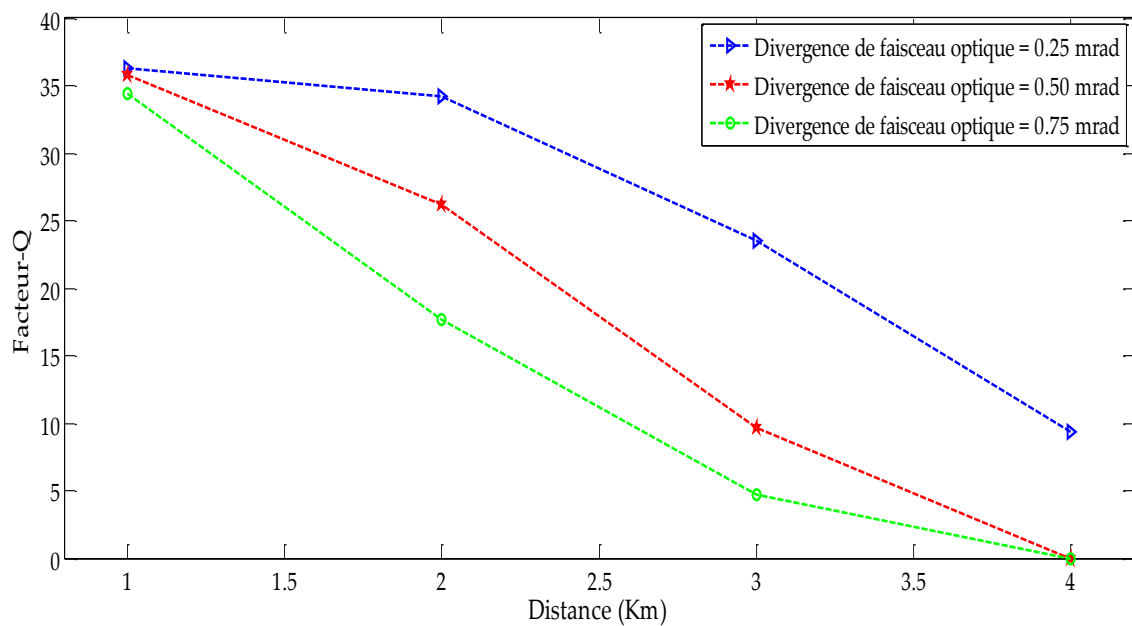
Dans cette partie de simulation, nous avons étudié et estimé la variation d'un paramètre très important dans les liaisons optiques FSO « la divergence d'un faisceau optique ». Cette étude est effectuée autour de la fréquence 193.1 THz (c'est-à-dire,  $\lambda_1 = 1552.52$  nm), le débit de ce canal est de 5 Gbps et la distance de liaison DWDM-FSO varie de 1 km jusqu'à 4 km.

La figure IV. 14 présente la variation de BER en fonction de la distance de liaison DWDM-FSO avec différentes valeurs de divergences d'un faisceau optique pour un émetteur OLT-DWDM (canal 1). Pour une divergence de 0.25 mrad, les valeurs de BER sont obtenues comme suit :  $4.04 * 10^{-289}$  et  $2.6 * 10^{-21}$  à des distances de 1000 m et 4000 m, respectivement. Par contre, pour une divergence de 0.75 mrad, les valeurs de BER sont obtenues comme suit :  $7.88 * 10^{-260}$  et  $1 * 10^0$  à des distances de 1000 m et 4000 m, respectivement. À partir de ces résultats, nous avons constaté qu'il y a une relation proportionnelle entre trois métriques à savoir : le BER de canal 1, la distance de liaison DWDM-FSO et la divergence d'un faisceau optique pour un émetteur OLT-DWDM (canal 1). Aussi, nous retenons que l'augmentation de la divergence et de la distance de liaison pénalisent fortement les performances de la liaison DWDM-FSO et cela est confirmé via les résultats obtenus de taux d'erreur binaire (BER) et de facteur de qualité du signal reçu vers des ONUs (voir la figure IV.15). Par exemple, pour une divergence de 0.25 mrad, les valeurs de facteur-Q sont obtenues comme suit : 36.31 et 9.4 à des distances de 1000 m et 4000 m,

respectivement. Par contre, pour une divergence de 0.75 mrad, les valeurs de facteur-Q sont obtenues comme suit : 34.40 et 0 à des distances de 1000 m et 4000 m, respectivement. Donc, pour améliorer la qualité du signal reçu au niveau de chaque ONUs (ici, ONU 1), il faut diminuer la divergence d'un faisceau optique pour un émetteur OLT-DWDM (canal 1).



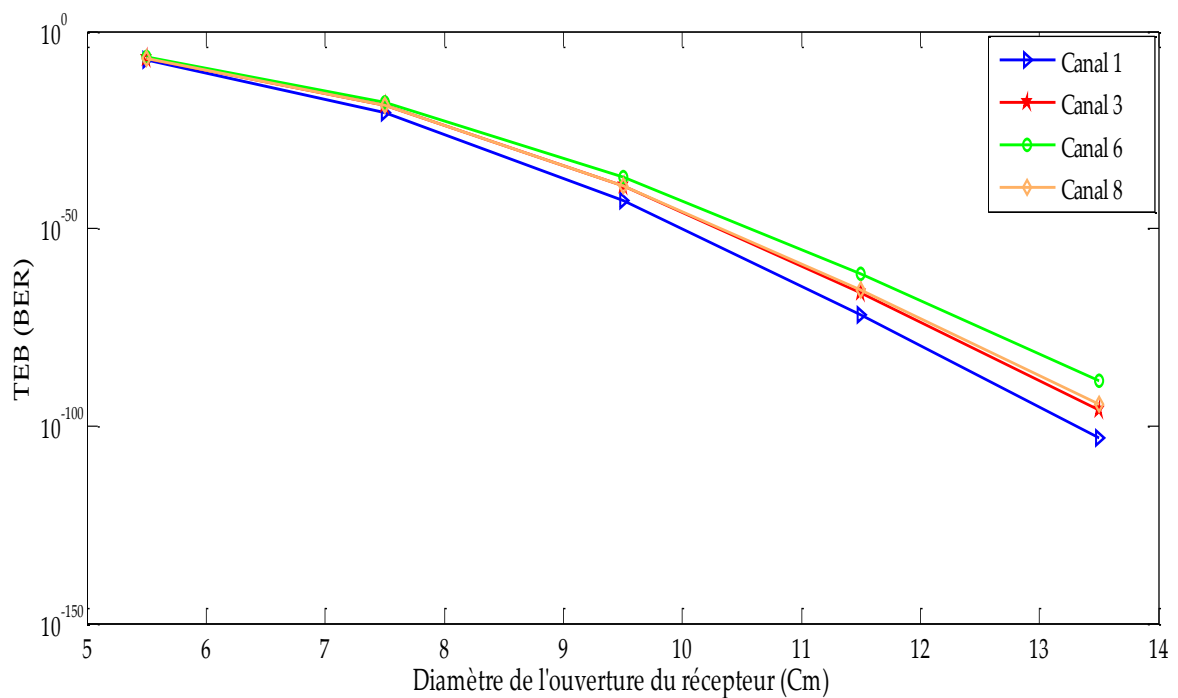
**Figure IV.14.** BER vs distance pour # divergence de faisceau optique avec un format de modulation NRZ à 4 km.



**Figure IV.15.** Facteur-Q vs distance pour # divergence de faisceau optique avec un format de modulation NRZ à 4 km.

### IV.3.6 L'effet de variation du diamètre de l'ouverture d'un récepteur FSO

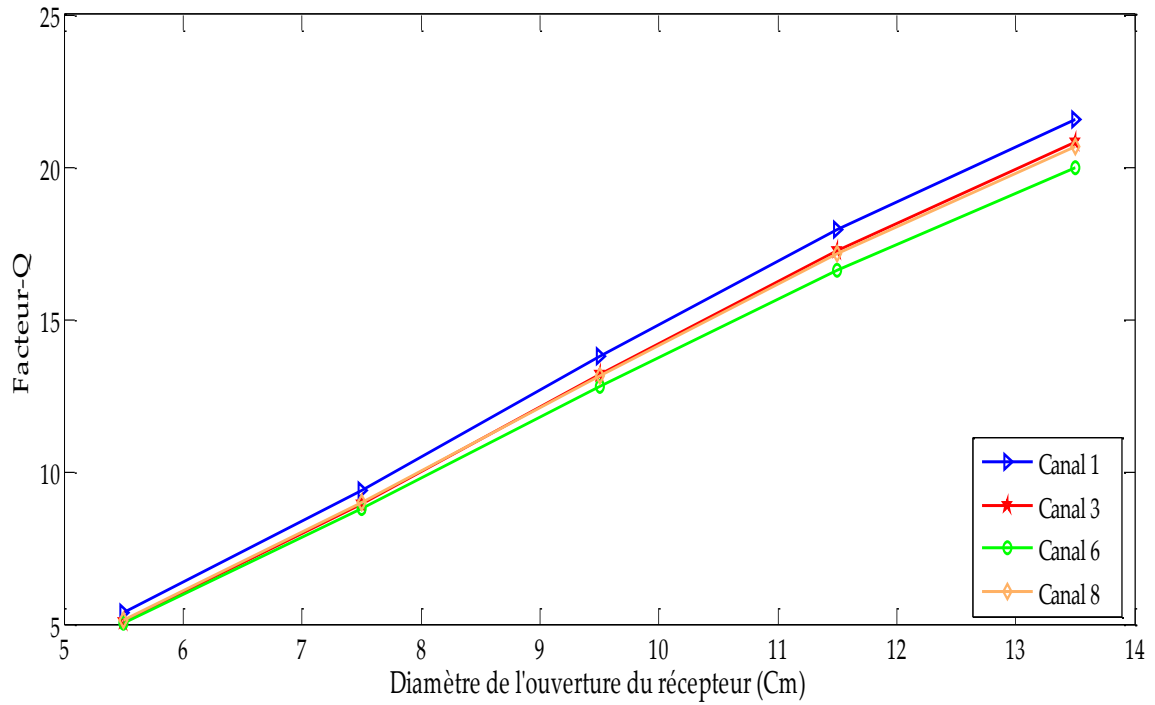
La figure IV.16 illustre les valeurs de BER en fonction du diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO, avec un format de modulation NRZ à 4 km, un débit de 5 Gbps pour chaque canal et un diamètre d'un émetteur FSO de 5 cm. D'après les résultats obtenus sur la figure IV.16, nous avons constaté, si on augmente le diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO, le taux d'erreur binaire diminue et vice versa. Par exemple, pour un diamètre de 5.5 cm, les valeurs de BER pour les quatre canaux 1, 3, 6 et 8 sont présentées comme suit :  $4.42 * 10^{-8}$ ,  $1.98 * 10^{-7}$ ,  $2.47 * 10^{-7}$  et  $1.47 * 10^{-7}$ , respectivement. Pour les mêmes canaux, les valeurs de BER sont présentées comme suit :  $1.07 * 10^{-103}$ ,  $9.85 * 10^{-97}$ ,  $4.21 * 10^{-89}$  et  $3.19 * 10^{-95}$  pour un diamètre de 13.5 cm, respectivement. Donc, les performances de système proposé sont améliorées.



**Figure IV.16.** BER vs diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO avec un format de modulation NRZ à 4 km.

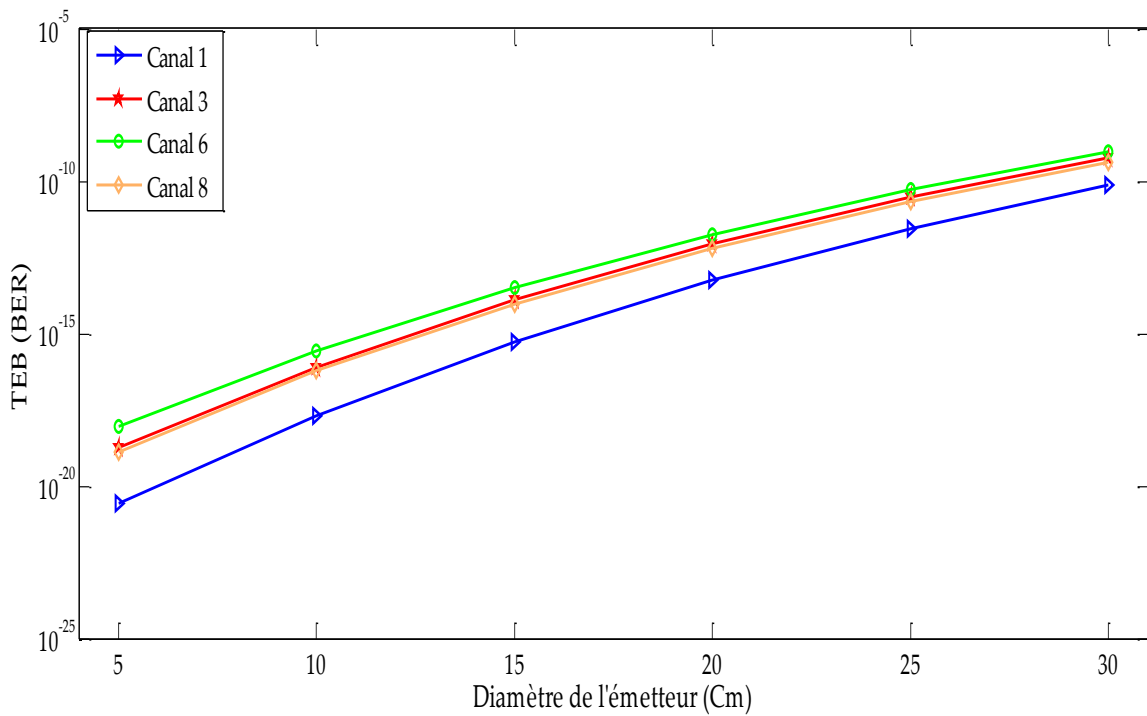
Puisque l'augmentation de diamètre d'ouverture du récepteur FSO rend le taux d'erreur binaire (BER) plus acceptable, donc nous avons constaté que la qualité du signal reçu au niveau de chaque récepteur ONU est amélioré (voir la figure IV.17). Par exemple, pour le canal 1 avec un diamètre de 5.5 cm, nous avons obtenu un facteur-Q environ de 5.35 et pour même canal avec un diamètre de 13.5 Cm, nous avons obtenus un facteur-Q environ de 21.58. Donc, la liaison DWDM-FSO est devenue plus performante, puisque la qualité de transmission est améliorée.





**Figure IV.17.** Facteur-Q vs diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO avec un format de modulation NRZ à 4 km.

**IV.3.7 L'effet de variation du diamètre de l'émetteur FSO**



**Figure IV.18.** BER vs diamètre d'un émetteur FSO avec un format de modulation NRZ à 4 km.

La figure IV.18 illustre les valeurs de BER en fonction du diamètre d'un émetteur FSO, avec un format de modulation NRZ à 4 km, un débit de 5 Gbps pour chaque canal et un diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO de 7.5 cm. D'après les résultats de simulation que nous avons obtenus, on a conclu que l'augmentation de diamètre d'un émetteur FSO dégrade la performance de la liaison DWDM-FSO. C'est-à-dire que le taux d'erreur binaire augmente et la qualité de réception des données pour chaque ONUs devenue mauvaise. Par exemple, pour un diamètre de 5 cm, la valeur de BER du canal 1 prend  $2.6 * 10^{-21}$  et pour un diamètre de 30 cm le BER du canal 1 devenu  $7.21 * 10^{-11}$ .

#### IV.4 Conclusion

Ce dernier chapitre nous a permis de savoir que la technique DWDM-FSO est une solution prometteuse pour les réseaux tout optiques et le déploiement de cette technique augmente la capacité de transmission. Cette étude a révélé que l'estimation des performances d'une liaison FSO est jugée par des critères tels que le facteur de qualité Q et le taux d'erreur binaire (BER) qui nous permet de suivre la qualité d'une liaison et déterminer toute dégradation pouvant l'affecter.

---

## CHAPITRE V

---

### Conclusion Générale

La communication optique en espace libre (FSO), également appelée optique sans fil, est une technologie de communication optique basant sur la transmission des impulsions de lumière dans le champ de visibilité directe. En plus, elle est toujours essayée de satisfaire le besoin d'une bande passante élevée sur de courtes distances. Au lieu de transmettre les impulsions de lumière à travers la fibre optique, ces impulsions lumineuses sont transmises dans un faisceau étroit à travers l'atmosphère. Les liaisons FSOs sont de faibles coûts, simples et faciles à installer. L'installation est facile, car aucune licence n'est requise de FCC pour l'utilisation de FSO. Mais le FSO est limité à des plages plus courtes en raison des turbulences atmosphériques, car les liaisons FSOs dépendent fortement des conditions météorologiques. De nombreuses techniques ont été proposées pour améliorer la performance du lien FSO comme la moyenne d'ouverture, la diversité ou l'amplification de signal qui peut être faite à l'aide d'amplificateur optique, par exemple EDFA..

Dans les réseaux de communications optiques, il y a toujours une demande concernant la bande passante de communication, qui a inspiré la technique WDM dans le domaine de la communication FSO. La technologie WDM est une révolution dans le réseau de communication optique. Elle est capable d'augmenter la capacité du système FSO via l'augmentation du nombre de canaux. Il faut juste respecter l'espacement entre les canaux pour éviter d'installer plusieurs liaisons FSOs. Ainsi, l'approche WDM peut être appliquée dans les systèmes FSO pour maximiser l'utilisation de la bande passante. En examinant les performances de la liaison FSO, il est important de prendre en compte plusieurs paramètres de FSO. Ces paramètres peuvent être divisés en deux parties : les paramètres internes et externes. Les paramètres internes incluent la puissance optique, la longueur d'onde et la bande passante. Par contre, les paramètres externes sont liés au milieu de propagation. L'avantage d'utiliser la technologie WDM sous FSO nous offre un débit élevé, un taux d'erreur binaire minimum et une robustesse de sécurisation.

L'objectif de ce travail est la conception d'un système de transmission optique DWDM-FSO bas coût, pour un débit global de 40 Gb/s à 4 000 m dans la voie descendante sans compensation. L'étude de performance d'une liaison DWDM conçue sur FSO a été effectuée en utilisant la

modulation NRZ avec différents paramètres tels que la puissance du signal transmis, diamètre de l'émetteur FSO, diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO, la divergence du faisceau optique, l'atténuation, la distance et le débit. Nous avons conclu qu'un format de modulation NRZ nous donne une excellente performance dans une liaison DWDM-FSO, par rapport le format de modulation RZ; la plage de diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO augmente avec l'augmentation de la puissance de l'émetteur. Cependant, nous pouvons augmenter la distance de liaison WDM-FSO avec la réduction de facteur d'atténuation et de divergence d'un faisceau optique. Il est également conclu que la performance du système de communication DWDM-FSO est dégradée si le débit de données augmente jusqu'à 10 Gbps sur une longueur d'onde du signal et si la distance augmente de plus de 4 000 m le taux d'erreur binaire (BER) subit une forte augmentation.

Le travail de ce mémoire montre clairement les potentiels ainsi que les limites de la liaison DWDM-FSO, les opportunités d'amélioration sont ouvertes et on s'intéressera à étudier des liaisons optiques à haut débit sous un canal FSO avec compensation.

---

## CHAPITRE VI

---

### Bibliographie

- [1] Vincent Foucal, "Conception d'interconnexions optiques haut débit courte distance en espace libre. Prototypage de modules de communication pour applications embarquées". FOUCAL\_Vincent\_2010.
- [2] M. Al Naboulsi, " Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques : propagation, disponibilité et fiabilité ", Thèse de l'université de Bourgogne, France, 2005.
- [3] Rapport UIT-R F.2106, " Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre ".
- [4] A. K. Majumdar, J. C. Ricklin, " Free Space Laser Communication ". Springer ed.2008.
- [5] H. Brahimi, " Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence ", Thèse de l'université Paul Sabatier-Toulouse III, France, 2010.
- [6] Pierre Lecoy, " Télécoms sur fibres optiques ", ©LAVOISIER, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, Vol.366, 2008, ISBN 3<sup>e</sup> édition 978-7462-1844-4.
- [7] Philippe Surmely, " La fibres optiques : Technologies et applications ", ©MASSON, SNEL S.A. Rue Saint-Vincent 12-4020 Liège juin 1995, Vol.223, 1995, ISBN édition 2-225-84822-3.
- [8] 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.
- [9] Y. Cojan et J. C. Fontanella, " Propagation du rayonnement dans l'atmosphère ", Techniques de l'ingénieur, Traité Electronique, Paris, Dec., 1995.
- [10] <http://www.lasercomponents.com/fr/>.
- [11] 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.
- [12] A. K. Majumdar, " Free space laser communication performance in the atmospheric channel ", Science Business Media LLC, pp. 61, Springer, 2008.
- [13] Md. D. A and al., " Comparative Study of Path Loss Models of WiMAX at 2.5 GHz Frequency Band ", International Journal of Future Generation Communication and Networking Vol. 6, No. 2, Apr. 2013.
- [14] H. Henniger, O. Wilfert, " An Introduction to Free-space Optical Communications ", Radioengineering, Vol. 19, no. 2, Jun., 2010.
- [15] B. R. Mahafza " Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB ", Chapman and Hall-CRC, 2000.
- [16] 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.

- [17] C.E. PEREZ VALENZUELA, " FORMATS DE MODULATION POUR LES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES ", Thèse de ENST, France, 2006.
- [18] S. BENAMEUR, " La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable ", THESE EN COTUTELLE (UNIVERSITÉ DE LIMOGES et UNIVERSITE DE SIDI BEL-ABBES), 2015.
- [19] Zeno Toffano, " Optoélectronique, Composant photoniques et fibres optiques ", ©Ellipses édition marketing S.A, 32 rue Bague 75740 Paris cedex 15, Vol.316, 2001, ISBN 2-7298-0703-9.
- [20] T. Hachem, " Etude comparative de quelques filtres chromatiques : Application à la faisabilité d'un filtre de Solc à 1,55µm en optique intégrée ", Thèse de Magister en Electronique Option : Signaux & Systèmes, Université Abou BAKR BELKAID de Tlemcen, 2005.
- [21] Fabia Raharimanitra, " Contribution à l'étude des architectures bases sur le multiplexage en temps et en longueur d'onde dans le réseau d'accès, permettant la migration vers la nouvelle génération de PON (NG-PON) à 10 Gbit/s ", *Thèse de Doctorat*, Université d'européenne de Bretagne (Télécom Bretagne), Le 13 janvier 2012.
- [22] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, Galen H. Sasaki, «Optical Networks A Pactical Perspective», Third Edition -2010 ELSEVIER.
- [23] T. Miya, Y. Terunuma, T. Osaka, T. Miyoshita, « Ultimate low-loss single-mode fiber at 1.55µm<sup>2</sup>, Electronics Letters, Vol 15, no. 4, pp. 106-108, 1979.
- [24] Frédéric Gerome, " Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM ", *Thèse de Doctorat*, Université de LIMOGES, Le 04 Novembre 2005.
- [25] Vivek Alwayn, " Optical Network Design and Implémentation ", ©Cisco, Vol.840, 17 Mars 2004, ISBN 1-58705-105-2.
- [26] <http://www.ciena.fr/technology/dwdm-vs-cwdm/>.
- [27] Karim Ayari, " Implémentation d'un outil de calcul des imperfections de transmission pour les réseaux WDM tout optique ", *PFE*, Ecole Supérieur des Communications de Tunis, 2005.



## **Résumé**

Au cours des dernières décennies, la communication optique dans l'espace libre (FSO) est préférée à la communication radio fréquence car elle présente une licence libre et une transmission longue portée avec une bande passante élevée. Dans ce travail, on va étudier les performances d'un système de communication optique en espace libre (FSO) en utilisant la technologie DWDM (multiplexage en longueur d'onde dense). Il est à noter que le DWDM est très efficace pour assurer la transmission de données à haut débit avec un taux d'erreur binaire très faible (BER).

Le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur de qualité Q sont les indicateurs qui permettant de suivre les performances d'un réseau optique et de constater toute dégradation pouvant affecter la qualité de service de réseau.

**Mots clés :** Transmission optique, FSO, DWDM, BER et facteur de Qualité.