

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude**  
**pour l'obtention du diplôme de Licence Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**  
Filière : **Télécommunications**  
Spécialité : **Systèmes des Télécommunications**

---

---

**Etude et analyse des performances du système WDM/FSO  
multifaisceaux sous l'effet de conditions météorologiques**

---

---

Présenté par :

---

**NOUN Amina**  
**ATAMENIA Fairouz**

---

Sous la direction de :  
**Dr. KASSA-BAGHDOUCHE Lazhar**

**Juillet 2021**

# Remerciements

Au terme de ce mémoire nous tenons à remercier en premier lieu **Dieu**, le miséricordieux, qui nous a donné la force, volonté et courage tout au long de l'élaboration de ce travail.

Nos chaleureux remerciements et nos profondes grâces vont à notre encadreur "**Dr. KASSA-BAGHDOUCHE Lazhar**" enseignant à l'université de 8 Mai 1945 - Guelma pour avoir accepté de diriger ce travail, qu'elle trouve ici, l'expression de nous profonde reconnaissance, notre immense gratitude et nous grand respect, pour tous ses efforts, son savoir, ses idées, sa confiance ses encouragements.

Nos vifs remerciements à tous mes professeurs de notre département d'électroniques et Télécommunications qui ont contribué à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Nous dédions ce modeste travail à nos familles, nos parents, source de tendresse et de courage, à nos frères, sœurs.

A nos amis de spécialité de Système de Télécommunications qui font notre équilibre, pour leur présence dans notre vie.

Merci à tous

# Dédicace

Je dédie ce travail:

- ✎ Mon dieu qui me donne tous : la santé, savoir et la patience.
- ✎ A Mes très chères parents **Hamadi** et **Fatima** qui me donnent le courage et me guident dans ma vie.
- ✎ A Mon frère **Fateh** et mes sœurs **Naima** et **Nawel**, et mes petits amours **Miline** et **Anas** et toute la famille **NOUN ET KLAI** sans exception.
- ✎ A Tous ceux que j'aime et mes amis (**Lamisse, Chahra Zed, Radia, Fairouz**)
- ✎ A toute ma promotion de *Systeme de Télécommunications 2021*.
- ✎ A ceux qui m'aiment.

✎ **NOUN Amina** ✎

# Dédicace

Je dédie ce travail:

- ✎ Mon dieu qui me donne tous : la santé, savoir et la patience.
- ✎ A Mes très chères parents **Hamid** et **Rachida** qui me donnent le courage et me guident dans ma vie.
- ✎ A Mon frère **Mahdi** et ma sœur **Zineb**, et toute la famille **ATAMENIA** sans exception.

Et Je souhaite à mon frère de réussir son baccalauréat

- ✎ A Tous mes amis (**Amina, Radia, Ferial, Rayen**)
- ✎ A toute ma promotion de *Systeme de Télécommunications 2021*.
- ✎ A ceux qui m'aiment.

✎**ATAMENIA Fairouz** ✎

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	.....	<b>i</b>
<b>Dédicace</b>	.....	<b>ii</b>
<b>Table des matières</b>	.....	<b>iv</b>
<b>Liste des figures</b>	.....	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	.....	<b>ix</b>
<b>Introduction générale</b>	.....	<b>1</b>

## **Chapitre 1 : Présentation et principe de fonctionnement des liaisons FSO**

1.1. Introduction.....	3
1.2. Présentation de la technologie FSO.....	3
1.3. Principe de fonctionnement des liaisons FSO .....	4
1.3.1 Emetteur .....	5
1.3.2 Canal de propagation FSO .....	7
1.3.3 Récepteur.....	8
1.4. Caractéristiques des équipements FSO .....	9
1.5. Modèles des canaux en propagation FSO.....	10
1.5.1 Atténuation par le brouillard .....	10
1.5.2 Atténuation par pluie .....	12
1.5.3 Atténuation par neige .....	13
1.5.4 Atténuation de Pointage .....	13
1.5.5 Scintillation .....	14
1.6. Les paramètres du système FSO .....	15
1.6.1 Intensité rayonnante.....	15
1.6.2 Puissance optique reçue .....	15

1.6.3	La densité de puissance optique .....	16
1.6.4	Perte en espace libre .....	16
1.6.5	Marge d'une liaison optique atmosphérique .....	17
1.6.6	Débit de transmission.....	18
1.6.7	Capacité du canal de transmission.....	18
1.7.	Les avantages et les inconvénients des liaisons FSO .....	19
1.8.	Applications des systèmes FSO .....	20
1.9.	Conclusion .....	21

## **Chapitre 2: La technique d'accès multiple par répartition de longueurs d'onde WDM**

2.1.	Introduction.....	22
2.2.	Généralisés sur les techniques d'accès multiples en communications optiques .....	22
2.2.1	Accès multiple par répartition de temps en optique OTDM .....	23
2.2.2	Accès multiple par répartition de temps en optique ETDM .....	24
2.2.3	Accès multiple par répartition de longueurs d'onde WDM .....	25
2.2.4	Accès multiple par répartition de codes optiques OCDMA.....	26
2.3.	Différents architectures du système WDM.....	27
2.3.1	Multiplexage dense DWDM .....	28
2.3.2	Multiplexage CWDM .....	29
2.4.	Techniques de multiplexage et démultiplexage .....	31
2.4.1	Multiplexeur optique à insertion et extraction OADM.....	31
2.4.2	Démultiplexage avec interféromètre Mach-Zehnder.....	32
2.4.3	Démultiplexage par mélange à quatre ondes.....	33
2.4.4	Spectrométrie par réseau de guides d'ondes AWG .....	34
2.5.	Les contributions de la technique WDM .....	35
2.6.	Conclusion .....	36

## **Chapitre 3 : Performances du système WDM/FSO multifaisceaux : Simulation, résultats et discussion**

3.1.	Introduction.....	37
3.2.	Principe de fonctionnement du système WDM/FSO .....	37
3.3.	Modèle du système WDM/FSO multifaisceaux sous Opti-System .....	38
3.3.1.	Emetteur .....	41

---

3.3.2. Récepteur.....	41
3.3.3. Canal de propagation FSO .....	42
3.4. Paramètres de la simulation .....	43
3.5. Performances du système WDM/FSO multifaisceaux .....	45
3.5.1. Influence du nombre de canaux de transmission FSO.....	45
3.5.2. Influence de la puissance optique d'émission .....	45
3.5.3. Influence du porté de la liaison FSO .....	47
3.5.4. Influence de débit de donnée.....	49
3.5.5. Influence du format de modulation.....	51
3.6. Performances du système CWDM/FSO multifaisceaux .....	53
3.6.1. Influence du nombre de canaux de transmission FSO.....	53
3.6.2. Influence de la puissance optique d'émission .....	54
3.6.3. Influence du porté de la liaison FSO .....	56
3.6.4. Influence de débit de donnée.....	58
3.6.5. Influence du format de modulation.....	60
3.7. Etude comparatif entre les systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux.....	62
3.8. Conclusion .....	63
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>64</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>66</b>

# Liste des figures

Figure 1.1 : Architectures des réseaux FSO.....	4
Figure 1.2 : Système de communication FSO en visibilité directe [3].....	5
Figure 1.3 : Schéma synoptique du bloc émetteur FSO. ....	5
Figure.1.4 : Principe de base d'une modulation directe.....	6
Figure 1.5 : Principe de base d'une modulation externe. ....	7
Figure 1.6 : Les phénomènes qui affectent le faisceau optique [4].....	8
Figure 1.7 : Schéma bloc du récepteur optique.....	9
Figure 2.1 : Système d'émission optique OTDM pour N utilisateurs [12].....	23
Figure 2.2 : Bloc d'un récepteur OTDM [12].....	24
Figure 2.3: Système ETDM [12].....	25
Figure 2.4 : Bloc du récepteur ETDM [12].....	25
Figure 2.5 : Principe d'une liaison WDM.....	26
Figure 2.6 : Schéma synoptique d'une transmission CDMA optique [12].....	27
Figure 2.7 : Grille UIT pour DWDM avec un espacement 0.8 nm. ....	29
Figure 2.8 : Grille UIT pour CWDM avec un espacement 20 nm.....	30
Figure 2.9 : Multiplexeur à insertion /extraction (Add/Drop) [14].....	32
Figure 2.10 : Principe de fonctionnement du démultiplexeur par interféromètre de Mach-Zehnder [15]. ....	32
Figure 2.11:Principe de démultiplexage par mélange 4 ondes (FWM) [15]. ....	33
Figure 2.12 : Principe de fonctionnement d'un démultiplexeur de quatre canaux spectraux de type AWG [16]. ....	35
Figure 3.1 : Schéma de principe d'un système de télécommunication optique WDM/FSO. ....	38
Figure 3.2 : Modèle du système WDM/FSO multifaisceaux sous OptiSystem. ....	39
Figure 3.3 : Modèle du système CWDM/FSO multifaisceaux sous OptiSystem. ....	40
Figure 3.4 : Modèle du l'émetteur optique des systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux.....	41



---

Figure 3.5 : Modèle des récepteurs des systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux .....	42
Figure 3.6 : Schéma de canal FSO des systèmes WDM/FSO multifaisceaux.....	43
Figure 3.7 : Evolution du facteur de qualité en fonction de la puissance optique d'émission pour le système WDM/FSO multifaisceaux. ....	46
Figure 3.8 : Diagramme de l'œil du système WDM/FSO pour une puissance optique d'émission de 50 dBm et deux conditions météorologiques. ....	47
Figure 3.9: Evolution du facteur de qualité en fonction de la portée de liaison FSO pour le système WDM/FSO multifaisceaux.....	48
Figure 3.10 : Diagramme de l'œil du système WDM/FSO multifaisceaux pour deux valeurs de la portée de la liaison FSO et deux conditions météorologiques. ....	49
Figure 3.11 : Diagramme de l'œil du système WDM/FSO multifaisceaux pour un débit binaire de 2.5 Gbits/s et deux conditions météorologiques.....	51
Figure 3.12 : Diagramme de l'œil du système WDM/FSO multifaisceaux utilisant deux formats de modulation NRZ et RZ. ....	53
Figure 3.13: Evolution du facteur de qualité en fonction de la puissance optique d'émission pour le système CWDM/FSO multifaisceaux. ....	55
Figure 3.14 : Diagramme de l'œil du système WDM/FSO multifaisceaux pour une puissance optique d'émission de 60 dBm et sous l'effet de deux conditions météorologiques. ....	56
Figure 3.15: Evolution du facteur de qualité en fonction de la portée de la liaison FSO pour le système CWDM/FSO multifaisceaux. ....	57
Figure 3.16 : Diagramme de l'œil du système CWDM/FSO pour deux valeurs de la portée de la liaison FSO et sous l'effet de deux conditions météorologiques .....	58
Figure 3.17 : Diagramme de l'œil du système CWDM/FSO pour un débit de données de 2.5 Gbits/s et sous l'effet de deux conditions météorologiques. ....	60
Figure 3.18: Diagramme de l'œil du système CWDM/FSO utilisant deux formats de modulation NRZ et RZ.....	62

# Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristiques de base pour des Systèmes FSO. ....	10
Tableau 1.2 : Les valeurs à utiliser dans l'équation (1.1). ....	11
Tableau 1.3 : L'atténuation en fonction de la visibilité via la formule de Kim et KRUSE [2]. .....	11
Tableau 2.1 : Comparaison entre CWDM et DWDM .....	31
Tableau 3.1 : Paramètres de la simulation. ....	44
Tableau 3.2 : Valeurs de l'atténuation correspondant aux conditions météorologiques.....	44
Tableau 3.3 : Influence du nombre de canaux sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux. ....	45
Tableau 3.4 : Influence de débit de données sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux pour un environnement très clair. ....	50
Tableau 3.5 : Influence de débit de données sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux pour un environnement clair. ....	50
Tableau 3.6 : Influence de débit de données sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux pour un environnement légère pluie et brouillard .....	50
Tableau 3.7 : Influence de débit de données sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux pour un environnement fort pluie et brouillard .....	50
Tableau 3.8 : Performances du système WDM/FSO multifaisceaux utilisant le format de modulation RZ. ....	52
Tableau 3.9 : Performances du système WDM/FSO multifaisceaux utilisant le format de modulation NRZ. ....	52
Tableau 3.10 : Influence du nombre de canaux sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux. ....	54
Tableau 3.11 : Influence de débit de donnée sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux pour un environnement très clair. ....	59
Tableau 3.12 : Influence de débit de donnée sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux pour un environnement clair. ....	59

Tableau 3.13 : Influence de débit de donnée sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux pour un environnement légère pluie et brouillard. ....	59
Tableau 3.14 : Influence de débit de donnée sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux pour un environnement fort pluie et brouillard .....	59
Tableau 3.15 : Performances du système CWDM/FSO multifaisceaux utilisant le format de modulation RZ. ....	61
Tableau 3.16 : Performances du système CWDM/FSO multifaisceaux utilisant le format de modulation NRZ. ....	61
Tableau 3.17 : Les valeurs optimales des paramètres pour les systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux. ....	63

# Introduction générale

Ces dernières années ont vu le développement d'une nouvelle technologie pour la transmission de signaux optiques numériques en espace libre FSO (Free Space Optics). Cette technologie permet de réaliser la communication entre deux entités sur des distances allant de quelques mètres à quelques kilomètres dans l'atmosphère terrestre. Elle est particulièrement bien adaptée pour l'établissement rapide de connexions haut débit et l'augmentation de la dissipation des abonnés à l'internet, notamment dans les environnements urbains à forte densité de population. Ainsi, cette technologie permet la redondance des données transférées par les fibres optiques pour sécuriser la transmission. Elle présente donc un intérêt important lorsqu'une connexion physique par le biais de câble ou de fibre optique est inadaptée, en particulier pour des raisons de coûts élevés ou d'autres considérations.

Le multiplexage en longueur d'onde, WDM (Wavelength Division Multiplexing), est une technique très utilisée en communication optique pour augmenter le débit binaire sur une fibre optique. Dans cette technique, plusieurs signaux optiques de longueurs d'onde différentes sont mélangés sur un seul signal optique à l'aide d'un multiplexeur, puis ce signal optique est propagé dans une fibre optique. À la sortie, ce signal optique est séparé au moyen d'un démultiplexeur. Cette technique est une technologie pour le transport de grandes quantités de données. Elle augmente la bande passante en autorisant des flux de données différents transmis simultanément sur une fibre optique. De cette façon, elle maximise l'utilité des fibres optiques et contribue à optimiser les investissements réseaux. Ces deux technologies constituent le point de départ de ce travail de mémoire, dont l'objectif est d'étudier et analyser les performances d'un système de télécommunication optique FSO multifaisceaux en utilisant la technique de multiplexage en longueur d'onde WDM. Notre étude dans ce mémoire est consacrée à évaluer toutes les métriques qui peuvent être affectées les performances du système WDM/FSO sous l'effet des

différents conditions météorologiques. Le système conçu ici permet la transmission des données de 32 utilisateurs à un débit de 5 Gbps chacun, avec un débit global de 160 Gbps après multiplexage. Nous avons utilisé deux types de multiplexage WDM avec un espacement différent, puis le démultiplexage pour la restitution des données de chacun des utilisateurs.

Le manuscrit est structuré en trois chapitres :

Dans *le premier chapitre* nous présentons le principe de fonctionnement d'une liaison FSO. Dans un premier temps, nous décrivons brièvement le concept de la technologie FSO, ainsi que les différents composants optoélectroniques constituant cette liaison optique atmosphérique. Ensuite, nous présentons les différents modèles des canaux en transmission FSO. Enfin, nous présentons les paramètres, les applications, les avantages et les inconvénients d'un système de communication optique en espace libre FSO.

Dans le *deuxième chapitre*, nous présentons la technique d'accès multiple par répartition de longueurs d'onde WDM. Dans un premier temps, nous décrivons tous les techniques d'accès multiples en communications optiques ( OTDM, ETDM, WDM et OCDMA). Ensuite, nous présentons les différentes architectures du système WDM ainsi que ses contributions. Les composants optoélectroniques employés pour réaliser la fonction de multiplexage et démultiplexage dans cette technologie sont décrits dans ce chapitre.

Les résultats et les interprétations font l'objet de *troisième chapitre*. Dans ce cadre, les résultats obtenus ont permis de dégager l'influence de différentes conditions météorologiques sur les performances d'un système de télécommunication WDM/FSO. Nous présentons le modèle du système WDM/FSO multifaisceaux sous OptiSystem. Ensuite, nous discutons l'évaluation des performances des systèmes de télécommunication WDM/FSO et CWDM/FSO via le facteur de qualité et le diagramme de l'œil. Les performances des systèmes proposés sont évalués en fonction de différents paramètres (nombre de canaux de transmission FSO, la puissance optique d'émission, la portée de la liaison FSO, le débit et le type de codage). Une étude comparative entre les deux systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux proposés est présentée dans ce chapitre.

Enfin, nous finalisons notre mémoire avec une conclusion générale et références bibliographiques.

# Chapitre 1: Présentation et principe de fonctionnement des liaisons FSO

## 1.1. Introduction

Les liaisons optiques atmosphériques FSO, appelées aussi WOC (Wireless Optical Communications) sont devenue une technologie alternative aux faisceaux hertziens et aux câbles optiques. Cette technologie offre la transparence de transférer tous les types de données avec un débit comparable à celui de la fibre optique, avec une flexibilité et des avantages importante par rapport aux technologies sans fil, ainsi que la mobilité de certaines applications.

Dans ce chapitre, nous allons évoquer la technologie FSO, en présentant dans la première partie, le principe de fonctionnement et les caractéristiques de cette technologie. Ensuite, nous allons présenter les différents modèles des canaux en transmission FSO. Puis dans la troisième partie, nous présentons les paramètres, les applications et les avantages et les inconvénients d'un système de communication optique en espace libre FSO.

## 1.2. Présentation de la technologie FSO

En général, une liaison optique sans fil inclus le transfert de données via l'espace entre deux nœuds utilisant le rayonnement optique comme un signal porteur. Les canaux où se propage le signal optique pouvant être l'espace lointain, l'atmosphère ou l'eau de mer. L'accent mis dans ce projet est cependant sur FSO terrestres, où, le canal d'intérêt est l'atmosphère [2].

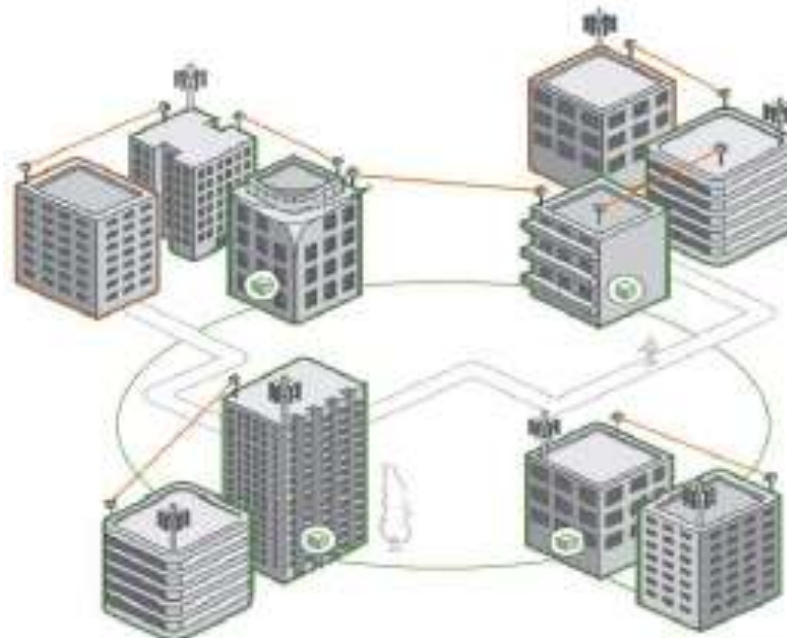


Figure 1.1 : Architectures des réseaux FSO.

Cependant, une liaison FSO se basé principalement sur une visibilité directe LOS (Line Of Sight) entre les extrémités des nœuds de communication, par conséquent pour assurer un échange fructueux d'informations cela exige que l'émetteur ( $T_x$ ) et le récepteur ( $R_x$ ) soit en visibilité directe l'un avec l'autre sans aucune obstruction. Ce qui fait que la communication optique sans fil est théoriquement possible tant que : il y a une visibilité directe entre  $T_x$  et le et  $R_x$  la puissance de rayon est suffisante pour atteindre l'autre extrémité.

La figure (1.1) ci-dessus, illustre un exemple d'architecture réseau basé sur des liaisons optiques sans fil.

### 1.3. Principe de fonctionnement des liaisons FSO

Le principe de fonctionnement d'une liaison FSO est présenté sur la figure (1.2). Comme tous les systèmes de communication, le système FSO comprend trois parties : émetteur, canal de propagation et récepteur.

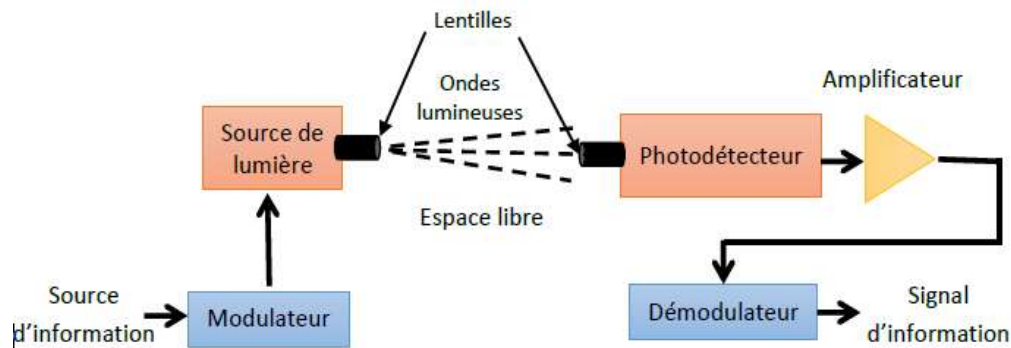


Figure 1.2 : Système de communication FSO en visibilité directe [3]

### 1.3.1 Emetteur

Le module d'émetteur assure la modulation d'une source des données sur une porteuse optique. Son rôle est de convertir 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 longueur d'onde 780 – 850 nm et 1520 - 1600 nm, ce qui correspond à des fréquences de transmission des données autour de 200 THz. La figure 1.3 présente un schéma d'un module émetteur de transmission optique en espace libre.

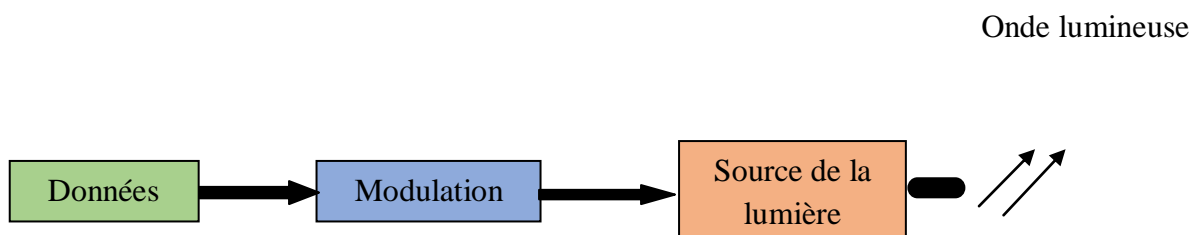


Figure 1.3 : Schéma synoptique du bloc émetteur FSO.

Pour transmettre les données optiques dans les systèmes FSO, une variété de source optique est utilisée. Pour cela, dans le bloc d'émission, le rayon envoyé par la source lumineuse passe à travers une série de lentilles. Celles-ci sont utilisées pour contrôler la quantité de divergence du



faisceau laser. La divergence d'un rayon lumineux varie entre quelques centaines de milli radiants et quelques microradians. Par exemple : pour une divergence de faisceau de 1 milli radiant, le diamètre du faisceau à 1 km est de 1 m. On distingue :

**Les diodes électroluminescentes (LED : Light-Emitting Diode) :** sont des composants optoélectroniques qui émettent la lumière. Parmi les caractéristiques d'une LED, sa puissance d'émission qui est relativement faible. Les LED sont généralement utilisées dans des applications sur des courtes distances.

**Les diodes laser :** présentent des avantages significatifs pour les applications de longue distance comparées aux diodes DEL. Les diodes lasers se basent sur trois processus fondamentaux pour effectuer la génération de la lumière : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. Un laser est une source de lumière cohérente, c'est-à-dire une onde électromagnétique sinusoïdale dans le temps. La sélection d'une source laser pour des applications FSO dépend de divers facteurs. Le facteur le plus important est que la longueur d'onde de transmission doit appartenir à des fenêtres atmosphériques (des bonnes fenêtres atmosphériques sont autour de *850 nm* et *1550 nm*).

Dans le bloc d'émission il existe aussi deux types de modulation : modulation d'intensité et modulation externe.

**La modulation d'intensité (IM : Intensity Modulation) :** L'idée de cette modulation réside dans la transmission des informations sur une puissance instantanée du signal porteur. Ce qu'on peut l'avoir en faisant varier le courant de conduite de la source optique directement en correspondance avec les données à transmettre. Le principe de base d'une transmission à modulation directe est présenté par la figure (1.4) [4].



Figure.1.4 : Principe de base d'une modulation directe.

**La modulation externe:** Dans ce type de modulation (voir figure 1.5), Le champ émis par la source optique n'est pas modulé et passe par un circuit optique spécial où l'on provoque une modulation de phase ou d'amplitude. Ces modulateurs soumettent plusieurs fois de conversion amplitude-fréquence et aussi elle reçoit une puissance électrique continue puis 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).

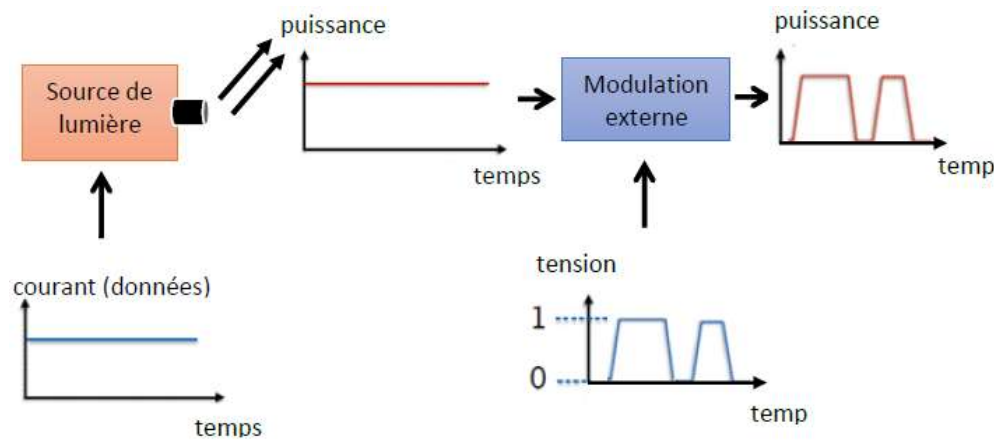


Figure 1.5 : Principe de base d'une modulation externe.

### 1.3.2 Canal de propagation FSO

Le canal de propagation constitue le milieu atmosphérique. C'est un milieu très complexe et dynamique pourrait 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 influences de l'atmosphère sur la propagation du faisceau émis. Les liaisons FSO sont soumises à des contraintes pénalisantes imposées par le milieu de propagation atmosphérique. Ces contraintes entraînent une atténuation ou extinction du signal optique au cours de la propagation et donc une limitation de la portée entre l'émetteur et le récepteur. 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]. Ces derniers sont montrés dans la figure (1.6)/

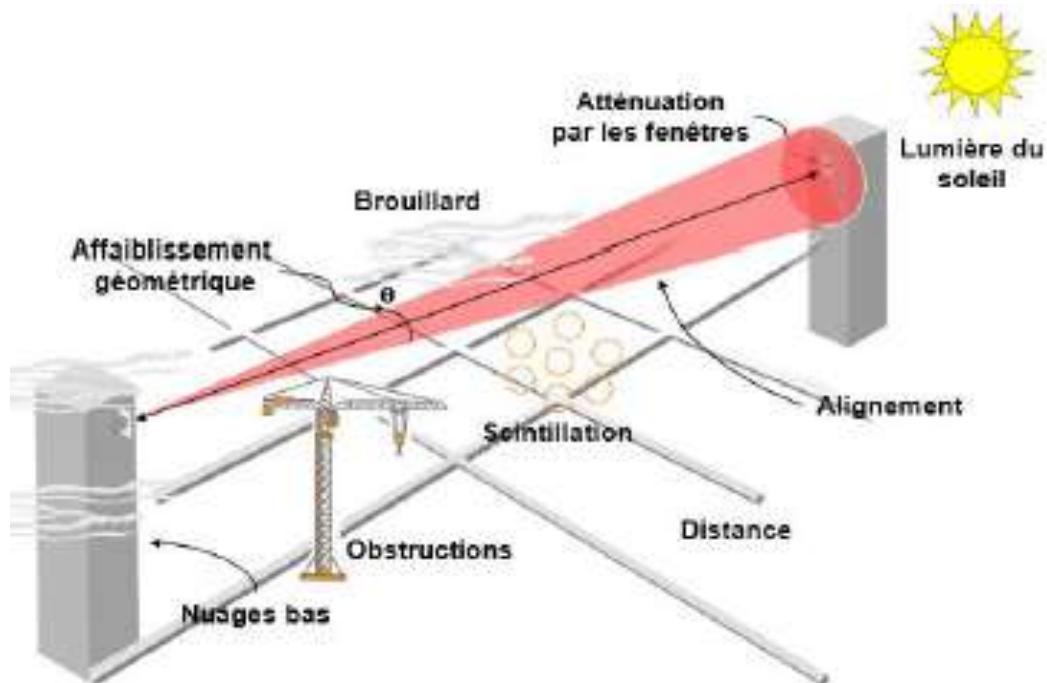


Figure 1.6 : Les phénomènes qui affectent le faisceau optique [4].

### 1.3.3 Récepteur

Ce bloc fonctionnel autorisé essentiellement de récupérer et d'extraire les données transmises du champ optique incident, il est chargé de convertir le signal lumineux en signal électrique. Cette opération doit être effectuée avec le minimum de dégradation possible. En effet, ce rôle est tenu par la photo détectrice qui se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. Les propriétés requises pour une photo détecteur est la sensibilité à la longueur d'onde utilisée, la rapidité et la troisième et l'apport minimum de bruit. La figure (1.6) présente le principe général de ce récepteur.

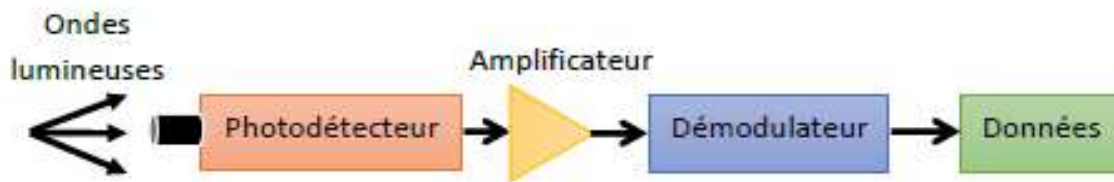


Figure 1.7 : Schéma bloc du récepteur optique.

La fonction de récepteur comporte les éléments suivants:

- *Module de réception optique : une photodiode ;*
- *Module de conversion électrique/optique (E/O), en cas d'interface optique ;*
- *Filtrage et amplification du signal numérique électrique ;*
- *Interface de connexion : optique ou électrique pour envoyer les données numériques.*

#### 1.4. Caractéristiques des équipements 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. La lumière à 1550 nm est en effet 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 d'exploitation (Classe 1M) même si la puissance du faisceau laser est importante. [5]

Le tableau ci-dessous indique les ordres de grandeur des principales caractéristiques des systèmes commercialisés à ce jour.

	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Remarques</b>
Débit	1.5 Mpds	1600 Mpds	Jusqu'à 10 Gbits/s avec correction des turbulences atmosphériques
Portée	10 m	7700 m	Temps clair
Longueur d'onde	780 nm	1550nm	
Puissance optique émise	4 mW	650 mW	

Tableau 1.1 : Caractéristiques de base pour des Systèmes FSO.

À l'heure actuelle, les fréquences optiques sont libres de tout cela. En conséquence dans la technologie FSO, la mise en place initiale des coûts est plus faible et le temps de déploiement est plus court. Le temps qu'il faut à une liaison FSO afin d'être pleinement opérationnel, de l'installation jusqu'à alignement de la liaison, pourrait être aussi faible que quelques heures. Et puisque les émetteurs récepteurs FSO peuvent transmettre et recevoir à travers les fenêtres, il est possible de monter les équipements FSO à l'intérieur des bâtiments, ce qui réduit la nécessité d'allouer des espaces sur les toits, simplifie le câblage, et permettant aux équipements FSO de fonctionner dans un environnement très favorable et sans autorisation [4].

### 1.5. Modèles des canaux de propagation FSO

La disponibilité et la fiabilité d'une liaison optique FSO dépend du système utilisé, ainsi que des conditions climatiques et des paramètres atmosphériques tels que la pluie, la neige, les scintillations, et surtout le brouillard, qui est le plus grand défi dans le déploiement des réseaux optiques sans fil. L'intensité et la durée de ces effets auront une incidence critique sur la fiabilité et la disponibilité de la liaison [2].

#### 1.5.1 Atténuation par le brouillard

Le brouillard est le facteur d'atténuation le plus critique parmi tous les facteurs, notamment dans l'infrarouge (bande d'absorption de la vapeur d'eau), puisque la taille des particules du brouillard est comparable aux longueurs d'onde optiques utilisées dans les systèmes de

transmission FSO. L'utilisation de la visibilité est une façon pour calculer l'atténuation causée par le brouillard. Les modèles Kruse et Kim utilisent cette approche pour prédire cette atténuation [2]. L'atténuation spécifique pour les modèles de Kim et de Kruse est exprimée par l'équation suivante :

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

Où,  $v$  représente la visibilité en km,  $\lambda$  est la longueur d'onde en nm et  $q$  est le paramètre lié à la distribution de la taille des gouttelettes. Les valeurs à utiliser dans l'équation (1.1) sont données dans le tableau (1.2).

$v$ (km)	$q$ (taille de particule en nm)
$v > 50$	1.6
$6 < v < 50$	1.3
$1 < v < 6$	$1.6v + 0.34$
$0.5 < v < 1$	$v - 0.5$
$v < 0.5$	0

Tableau 1.2 : Les valeurs à utiliser dans l'équation (1.1).

La visibilité atmosphérique  $v$  (km), est définie comme étant la distance maximale à laquelle on peut reconnaître un objet noir par rapport au ciel. La visibilité est plus particulièrement définie à des fins météorologiques. Le tableau (1.3) récapitule les valeurs de l'atténuation par le brouillard en fonction de la visibilité via la formule de KRUSE.

$v$ (km)	0.1	0.8	3	10	50
$q$ (nm)	0.27	0.54	0.84	1.3	1.6
Atténuation (dB/km)	98.28	9.29	1.81	0.34	0.05

Tableau 1.3 : L'atténuation en fonction de la visibilité via la formule de Kim et KRUSE [2].

### 1.5.2 Atténuation par pluie

La pluie est formée par la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. Elle est constituée de gouttes d'eau dont la forme et le nombre sont variables dans le temps et l'espace. Leur forme dépend de leur taille. Elles sont considérées comme des sphères de rayons allant jusqu'à 1 mm et sous la forme de sphéroïdes aplatis [11].

Les particules de brume sont très petites et restent plus longtemps dans l'atmosphère, mais les gouttes de pluie sont très grandes et ne restent plus longtemps dans l'atmosphère. Ceci est la première raison pour que l'atténuation par la pluie soit inférieure à la brume. Le coefficient de diffusion de pluie peut être calculé à l'aide de :

$$\beta_{pluie\ dif} = \tau a^2 N_a Q_{dif} \left( \frac{a}{\lambda} \right) \quad (1.2)$$

Où :

$a$  : Le rayon des gouttes.

$N_a$  : La distribution de gouttes de pluie.

$Q_{dif}$  : L'efficacité de la diffusion.

$\lambda$  : longueur d'onde.

La distribution des gouttes de pluie peut être calculée avec l'équation :

$$N_a = \frac{R}{1.33(\tau a^2) V_a} \quad (1.3)$$

Où :

$R$  : le taux de précipitations.

$V_a$  : la précipitation de la vitesse limite.

La vitesse de pluie est aussi donnée par :

$$V_a = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} \quad (1.4)$$

Où :

$\rho$  : la densité de l'eau.  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$

$g$ : constante gravitationnelle= 9.8 cm/s<sup>2</sup>

$\eta$ : la viscosité de l'air.  $\eta=1.8 \cdot 10^{-4}$  g/cm. s

L'atténuation de pluie peut être calculée en utilisant la loi de BER que :

$$\tau = \exp(-\beta_{pluie} \text{ dif } L) \quad (1.5)$$

### 1.5.3 Atténuation par neige

L'atténuation due à la neige peut varier en fonction de la taille du flocon de neige et du taux de chute de neige. Étant donné que les flocons de neige sont plus gros que les gouttes de pluie, ils produisent des évanouissements plus profonds dans le signal que les gouttes de pluie. La taille des flocons de neige peut atteindre 20 mm, ce qui peut bloquer complètement le trajet du signal optique en fonction de la largeur du faisceau du signal. Pour la neige, l'atténuation peut être classée en atténuation de neige sèche et de neige humide. L'atténuation spécifique ( $dB/km$ ) du taux de neige  $S_{en}$  ( $mm/h$ ) est donnée par l'équation suivante:

$$\gamma_{neige} = a S^b \quad (1.6)$$

Où :

Les valeurs des paramètres  $a$  et  $b$  dans la neige sèche et humide sont:

Neige sèche :  $a=5.42 \times 10^{-5} + 5.4958776$ ,  $b=1.38$

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

### 1.5.4 Atténuation de Pointage

L'atténuation de pointage est les erreurs dus au mal-alignement entre l'émetteur et le récepteur dans le cas d'une liaison optique en espace libre. Le mal-alignement est le résultat des vibrations de la terre.

L'atténuation de mal-alignement peut entraîner une dégradation importante des performances du système. La puissance transmise affectée au pointage du faisceau optique n'est pas utilisée pour la communication. Par conséquent, il est hautement souhaitable de maintenir l'atténuation de mal-alignement du faisceau laser étroit aussi petite que possible, afin de disposer de la



puissance suffisante pour la communication. L'atténuation de mal-alignement du faisceau à prendre en compte pour l'analyse du bilan de liaison est donnée en tant que :

$$L_p = \exp\left(-\frac{8\theta^2_{gigue}}{\theta^2_{div}}\right) \quad (1.7)$$

Où :

$\theta_{gigue}$  est l'angle de gigue du faisceau et  $\theta_{div}$  l'angle de divergence du faisceau de l'émetteur.

### 1.5.5 Scintillation

L'effet de la turbulence thermique à l'intérieur du milieu de propagation, il se forme des cellules aléatoires de température différente. Ces cellules ont des indices de réfraction anisotropes, conduisant à des phénomènes de diffusion, de propagation par trajets multiples et de variation des angles d'arrivée. Les fronts d'onde varient provoquant la focalisation et dé focalisation du faisceau .de telles fluctuations du signal appelé scintillations [6]. L'amplitude et la fréquence des scintillations dépendent de la taille des cellules par rapport au diamètre du faisceau. Lorsque les hétérogénéités sont grandes par rapport à la section transversale du faisceau, le faisceau est dévié, lorsqu'elles sont petites, le faisceau est élargi.

En règle générale, on étudie les effets des scintillations troposphériques en utilisant le logarithme de l'amplitude  $\chi$  (dB) du signal observé («log-amplitude »), défini comme étant le rapport exprimé en décibels entre l'amplitude à un instant donné et sa valeur moyenne. L'intensité et la vitesse des fluctuations (fréquence des scintillations) augmentent avec la fréquence de l'onde. Pour une onde plane, de faibles turbulences et un récepteur donné, la variance des scintillations  $\sigma_\chi^2$  (dB<sup>2</sup>) peut s'exprimer comme suit:

$$\sigma_\chi^2 = 23,17 * K_6^7 * C_n^2 * L^{\frac{11}{6}} \quad (1.8)$$

Où:

$k$  ( $m^{-1}$ ): nombre d'onde  $\frac{2\pi}{\lambda}$

$L$ : longueur de la liaison (m)

$C_n^2(m^{-2})$ : Paramètre de structure de l'indice de réfraction représentant l'intensité des turbulences. Il est fonction de la rugosité, du rayonnement solaire, de l'humidité et de l'albédo terrestre.

Afin d'analyser les statistiques de fluctuation d'un signal de communication laser, il est important de tenir compte du fait que les récepteurs réels ont des ouvertures de taille finie. La prise en compte des effets de la réception d'un faisceau dans l'espace avec une ouverture de taille finie est appelée « moyen nage d'ouverture » dans la littérature [7].

## 1.6. Les paramètres du système FSO

### 1.6.1 Intensité rayonnante

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

$$R_0(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi) \quad (1.9)$$

Où  $\phi$  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 :

$$I = P_T * R_0(\phi) \quad (1.10)$$

### 1.6.2 Puissance optique reçue

La puissance optique reçue se calcule comme pour les faisceaux hertziens terrestres, mais avec des ordres de grandeurs très différents. La puissance optique reçue est donnée par la relation suivant [9] :

$$P_R = G_T \times G_L \times G_R \times \tau_T \times \tau_L \times \tau_{atm} \quad (1.11)$$

Avec :

- $P_T$  : puissance total émise ;
- $G_T$  : gain d'antenne émetteur ;

- $G_L$ : 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 ;

La puissance optique reçue peut être exprimée comme suit :

$$P_R = P_T \times G_T \times \left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right)^2 \times \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \times \tau_T \times \tau_L \times \tau_{atm} \quad (1.12)$$

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

### 1.6.3 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 [9]. Pour une distance L qui entre l'émetteur et le récepteur, elle est donnée par la relation :

$$P_D = \frac{P_T}{4\pi L^2} \quad (1.13)$$

L'ouverture effective au niveau de l'antenne est :

$$A_e = \frac{G_T \lambda^2}{4\pi} \quad (1.14)$$

Avec  $G_T$  est le gain de l'antenne

Alor l'équation (I.13) devient écrite comme suite :

$$P_D = \frac{p\tau\theta}{(4\pi L^2)^2} A_e \quad (1.15)$$

$\vartheta$  est le rapport de puissance réfléchi sur la densité de la puissance.

### 1.6.4 Perte en espace libre

La perte due au trajet traduit la perte du signal lors de sa propagation de l'émetteur vers le récepteur. Il existe plusieurs modèles basés sur la fréquence et la distance.

Le calcul se fait à l'aide l'équation suivante [10] :

$$PEL = 32.455 + 20 \times \text{Log}(L) + 20 \times \text{Log}(f) \quad (1.16)$$

Avec :

-f : désigne la fréquence ;

-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 :

$$R_{R(L)} = P_T \times G_T \times G_L \times G_R = \frac{P_T \times G_T \times G_R \times \lambda^2}{(4\pi L)^2} \quad (1.17)$$

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

$$P_{(L)} [dB] = 10 \log\left(\frac{P_T}{P_R}\right) = -10 \log\left(\frac{P_T \times G_T \times G_R \times \lambda^2}{(4\pi L)^2}\right) \quad (1.18)$$

### 1.6.5 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.

A partir de la valeur de l'affaiblissement géométrique, 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 système  $P_{tot}$  si elles sont mentionnées, permettent de déduire la marge brute par la formule suivante:

$$M_{Liaison} (dB) = P_T + |S_r| - Aff_{atm} (dB) - P_{tot} (dB) \quad (1.19)$$

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

### 1.6.6 Débit de transmission

Celui-ci se calcule à partir de rapport signal sur bruit et du rapport de l'énergie par bit. 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  $E_b/N$ . Le rapport  $E_b/N$  en dB est donné par :

$$\frac{E_b}{N} = \left( \frac{E_b}{N} \right)_{requis} + marge_{dB} \quad (1.20)$$

Finalement, le débit de transmission est donné par la formule

$$Débit = 10 \left( \frac{\left( \frac{P_R}{N} \right) - \left( \frac{E_b}{N} \right)}{10} \right) \quad (1.21)$$

### 1.6.7 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 exprimée en bit/s et donnée par le théorème de Shannon-Hartley comme suit :

$$C_{(t)} = B \log_2(1 + SNR_{(t)}) \quad (1.21)$$

Avec :

- $B$  : la bande passante en Hertz ;
- $SNR$  : le rapport signal-à-bruit ;

Dans le cas des systèmes FSO,  $B$  est de l'ordre du GHz et les variations temporelles du  $SNR$  de l'ordre de la milliseconde. Le  $SNR$  varie au cours du temps à cause des variations de flux causées par la turbulence atmosphérique. La capacité du canal  $C(t)$  liée au rapport signal-à-bruit

va varier au cours de temps. Lorsque le débit de transmission des données sera supérieur à la capacité du canal, la liaison subira des pertes d'information.

### 1.7. Les avantages et les inconvénients des liaisons FSO

Les principaux intérêts des systèmes FSO sont :

- ✓ *Facilite de déploiement*
- ✓ *Transmission longue distance dispensée de licence, par opposition aux transmissions hertziennes*
- ✓ *Haut débit*
- ✓ *Faible taux d'erreur*
- ✓ *Immunité aux interférences électromagnétiques*
- ✓ *Communication full-duplex*
- ✓ *Protocole de communication transparent*
- ✓ *Confidentialité de transmission élevée, en particulier du fait de la directivité et de l'étroitesse du faisceau lumineux.*

Pour les applications terrestres, les facteurs limitatifs principaux sont suivants :

- ✓ *Dispersion du faisceau*
- ✓ *Absorption atmosphérique*
- ✓ *Pluie*
- ✓ *Brouillard (10 ~100 dB/Km d'atténuation)*
- ✓ *Neige*
- ✓ *Chaleur ambiante modifiant l'indice de réfraction du milieu (déformation-déviation du faisceau)*
- ✓ *Scintillation*
- ✓ *Pollution lumineuse parasite*

- ✓ *Instabilité du pointage en période venteuse*
- ✓ *Pollution atmosphérique*
- ✓ *Rayonnement solaire axial gênant la réception.*

Ces facteurs causent une atténuation du signal a la réception, conduisant ainsi à une augmentation du taux d'erreurs binaires (BER). Pour contourner ces problèmes, des solutions alternatives consistant en des systèmes multifaisceaux ou multi-trajets ont été développées. Certains appareillages présentent une tolérance supérieure au 'fading' (puissance modulable, en cas de pluie, brouillard, fumée...). Pour des raisons de sécurité (risques oculaires), les bons systèmes de transmission optiques laser ont une densité de puissance limitée (lasers classe 1 ou 1M).l'atténuation atmosphérique et celle liée au brouillard, qui est par nature exponentielle, limitent en pratique les portées de tels systèmes a quelques kilomètres.

### **1.8. Applications des systèmes FSO**

Pour certaines applications, les FSO 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:[13]

- *Interconnecter des réseaux LAN 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 10/100/1000) ;*
- *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*

## **1.9. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre, le principe de la technologie FSO, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette technologie. Les modèles des canaux en transmission FSO, les différentes caractéristiques, paramétrées, applications et composants d'émission, canal de propagation et de récepteur d'un système de télécommunication FSO ont été aussi présentés. À la lecture de ce chapitre, nous déduisons que la technologie FSO est presque toujours associée à la transmission radio, malgré l'utilisation d'un autre porteur que les ondes radio, comme les ondes optiques. Ainsi que, les systèmes de transmission FSO jouent un rôle de plus en plus important, fournissant une largeur de bande élevée et des communications fiables sur de courtes distances. Cette technologie étant exemptée de licences officielles et ne nécessitant pas d'autorisation de planification.



# **Chapitre 2 : La technique d'accès multiple par répartition en longueurs d'onde WDM**

## **2.1. Introduction**

L'augmentation du nombre d'utilisateurs et de la quantité d'informations échangées dans les réseaux de communication a poussé au développement de solutions pour augmenter la capacité des réseaux. Dans ce contexte, des techniques de multiplexage ont été développées, parmi ces techniques une nouvelle technique de transmission permettant de mieux exploiter la bande passante offerte, qui est appelée le multiplexage par répartition de longueur d'onde (WDM).

Dans ce chapitre, nous présentons le principe de fonctionnement des différentes techniques d'accès multiples en communication optiques. Ensuite, une étude détaillée sur le multiplexage en longueur d'onde (WDM) est présentée en se focalisant sur les différents types de cette technologie ainsi que leurs paramètres. Les différents composants optiques employés pour réaliser la fonction de multiplexage et démultiplexage dans les systèmes WDM sont également présentés dans ce chapitre. Les différentes techniques de multiplexage optique WDM présentées dans ce chapitre sont plus adaptées pour une utilisation dans un système de communication en espace libre FSO multifaisceaux.

## **2.2. Généralisés sur les techniques d'accès multiples en communications optiques**

La fibre optique offre une grande largeur de bande pour réaliser les opérations d'accès multiples, permettant à plusieurs utilisateurs de communiquer simultanément. Parmi les techniques d'accès multiples en communication optiques on distingue :

### 2.2.1 Accès multiple par répartition de temps en optique OTDM

La technique OTDM consiste à multiplexer en temps des trains d'impulsions optiques de façon purement optique en utilisant un codage optique de type RZ (les lignes à retard). L'émetteur est composé d'une source laser qui émet des impulsions optiques de durée  $T_c$ . Ces impulsions sont appliquées à l'entrée d'un modulateur optique, commandé par un signal électrique de durée  $T_b$  qui représente les données à transmettre d'un utilisateur, le débit des données  $D$  est tel que:  $D = 1/T_b \ll 1/T_c$  [12].

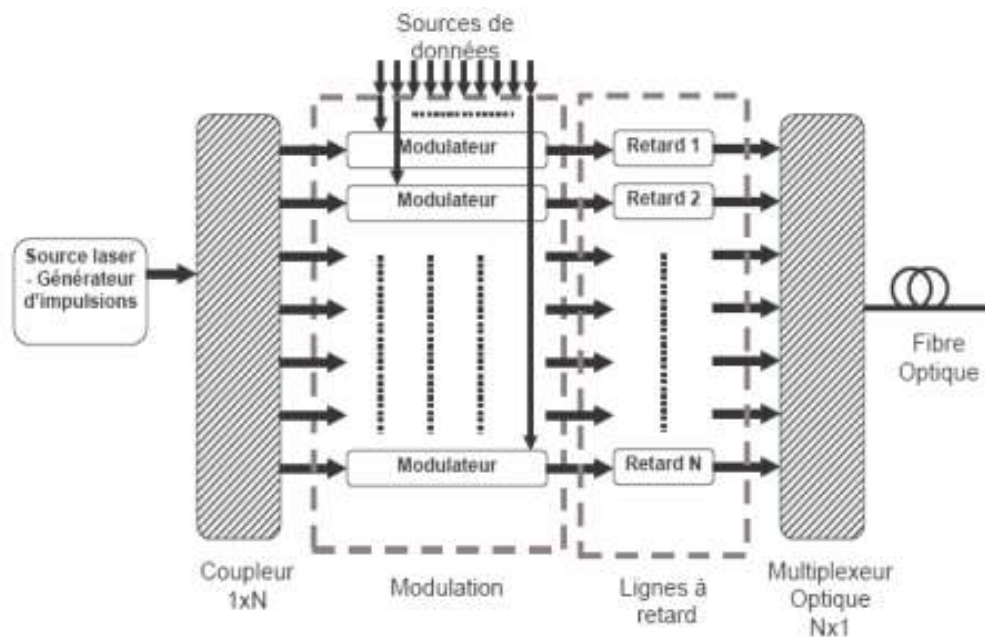


Figure 2.1 : Système d'émission optique OTDM pour N utilisateurs [12].

Par exemple : pour un système contient 4 utilisateurs avec un débit de 10 Mbits/s, on peut se avoir en sortie un multiplexeur temporel tel que le débit à l'entrée de la fibre est 40 Mbits/s. La source laser doit émettre au débit  $D$ , des impulsions ultracourtes de largeur  $T_c = 1/40.10^6 = 25$  ns [12]. Pour reprendre en réception par démultiplexage temporel les informations d'un utilisateur, le système nécessite un signal de synchronisation du rythme des données émises  $T_b$  (Figure 2.2) [12].

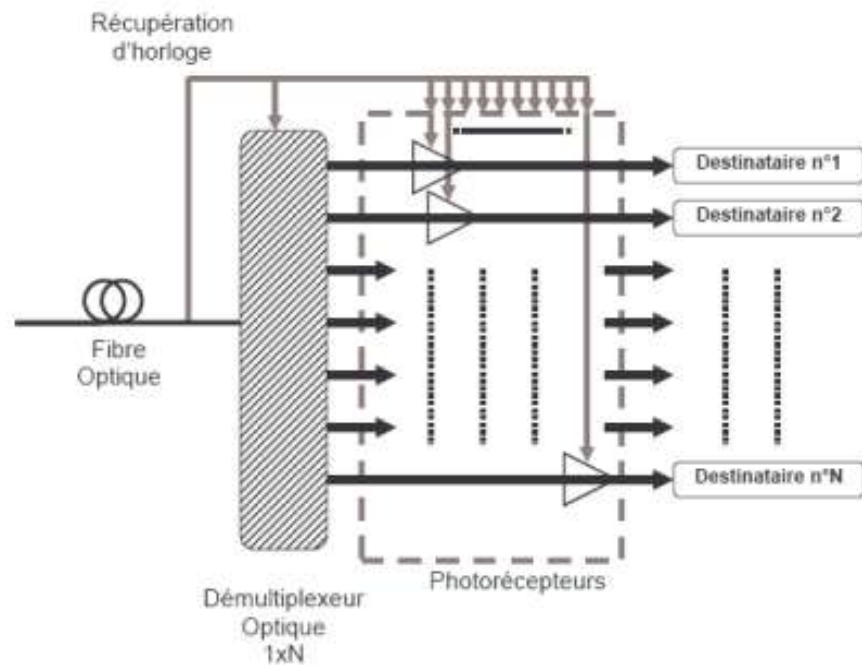


Figure 2.2 : Bloc d'un récepteur OTDM [12].

### 2.2.2 Accès multiple par répartition de temps en optique ETDM

Dans la technique ETDM, le multiplexage des données électriques à transmettre s'effectue électriquement à l'aide de dispositif électroniques, donc c'est l'équivalent de L'OTDM en électronique. Le signal de sortie du multiplexeur est ajusté à l'entrée d'un modulateur optique qui permet la transmission sur la fibre optique (voir figure 2.3) [12]. La différence avec la technique OTDM réside dans le fait que le modulateur optique doit travailler non pas au débit des données  $D$  mais à celui  $R$  du signal en sortie du multiplexeur. Si les données ont un débit  $D$  et que le nombre d'utilisateurs est  $N$ , on a :  $R = N \times D$  [12]. Plus le nombre des utilisateurs augmente, plus le débit  $R$  est élevé ce qui constitue la principale limitation de cette technique [12].

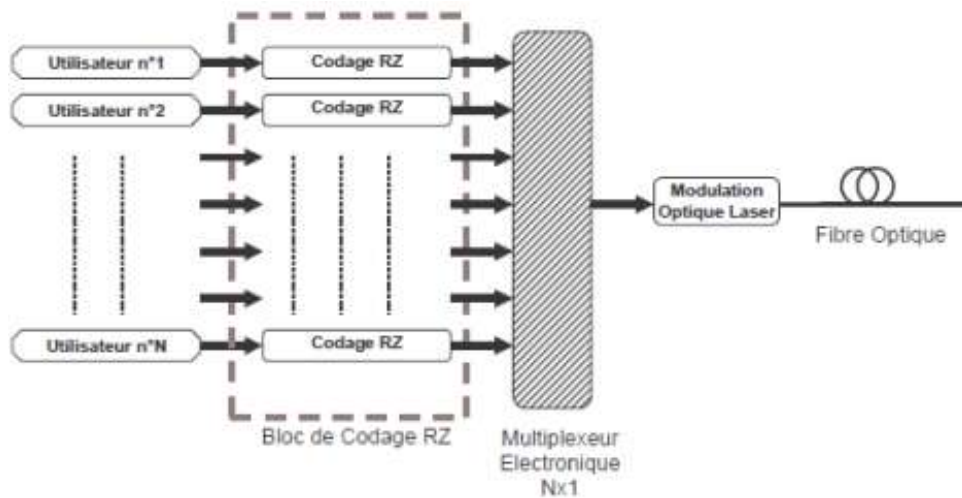


Figure 2.3: Système ETDM [12].

A la réception, un photo-détecteur transforme le signal optique en électrique. Un dispositif électronique de démultiplexage synchronisé permet de restituer les données au destinataire [12].

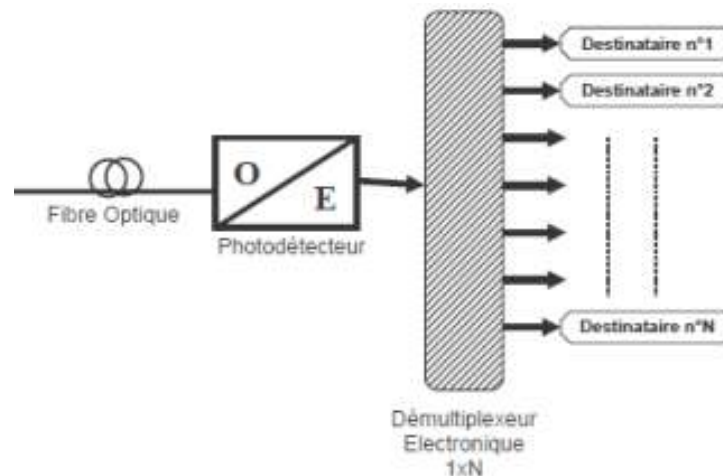


Figure 2.4 : Bloc du récepteur ETDM [12].

### 2.2.3 Accès multiple par répartition de longueurs d'onde WDM

La technique du multiplexage de longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) consiste à transférer les signaux optiques à différentes longueurs d'onde sur la même fibre optique. Ceci est possible, en les mélangeant à l'entrée à l'aide d'un multiplexeur (MUX), et en

séparant les différentes ondes à la sortie au moyen d'un démultiplexeur (DEMUX). La WDM permet ainsi l'utilisation optimale de la bande passante optique [12]. Dans cette technique, les données électriques de chaque utilisateur sont appliquées à l'entrée de modulateurs optiques émettant à des longueurs d'onde diverses. Les signaux en sortie des modulateurs sont multiplexés et émis sur la fibre (figure 2.5) [12]. A la réception, le signal optique est démultiplexé puis appliqué à l'entrée d'un filtre optique qui permet d'extraire le signal à la longueur d'onde correspondant au destinataire. Une photodiode permet d'effectuer la conversion optique-électrique [12].

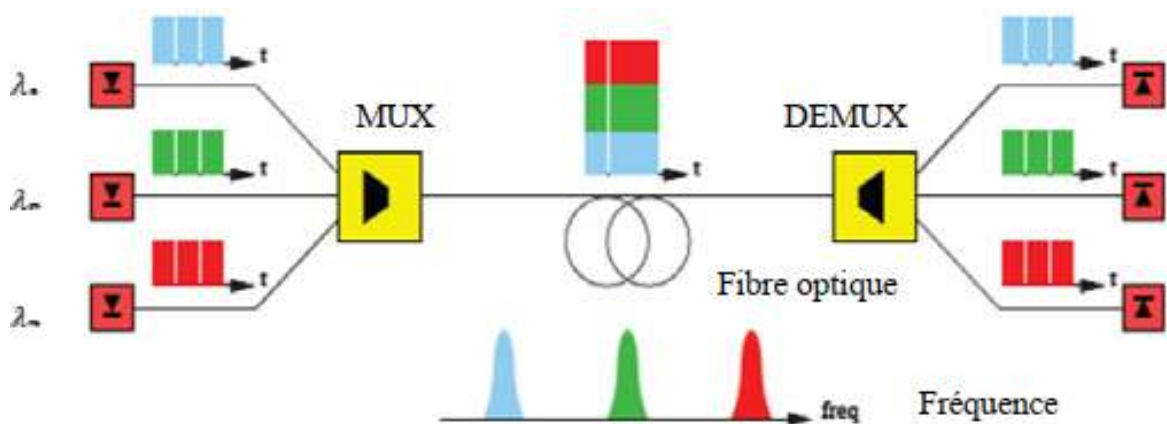


Figure 2.5 : Principe d'une liaison WDM

La bande de fréquence la plus utilisée est la bande C (1530 - 1565 nanomètres). Cette bande de fréquence permet d'accroître la capacité totale d'un système WDM. Dans le système WDM, nous pouvons jouer sur le débit transporté par chaque canal ou sur le nombre de canaux, voir sur les deux en même temps [12].

#### 2.2.4 Accès multiple par répartition de codes optiques OCDMA

La CDMA Optique est basé sur les mêmes concepts de base que le CDMA radiofréquence : on spécifie à chaque utilisateur transmettant des données à travers le support de transmission qui est constitué par une fibre optique (figure2.6), une séquence signature ou code qui permet de déterminer le récepteur destinataire [12].

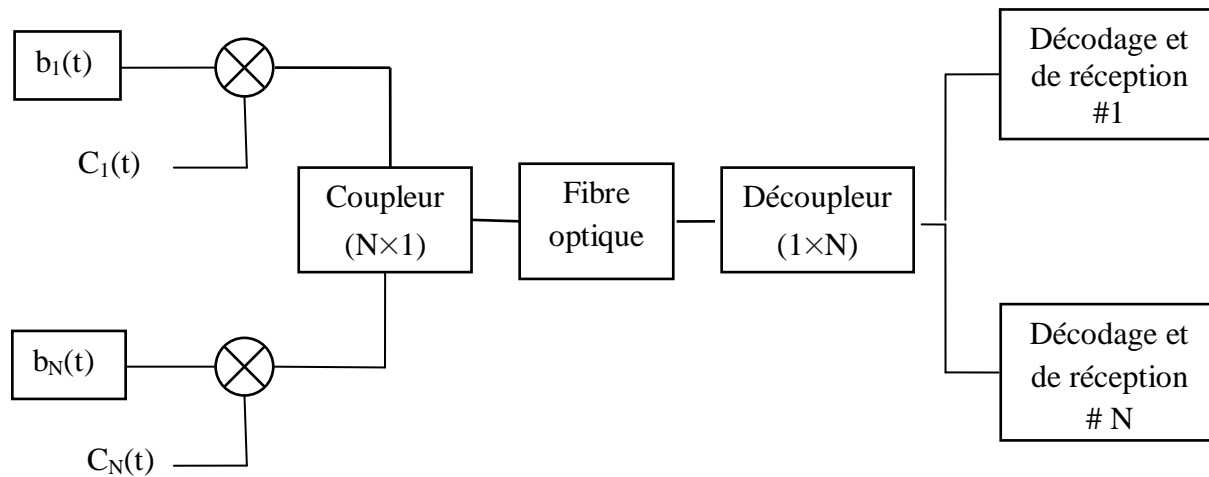


Figure 2.6 : Schéma synoptique d'une transmission CDMA optique [12].

Dans la technique OCDMA, l'orthogonalité des codes est la propriété importante pour réduire les interférences dues à l'accès multiple du canal. Donc, l'Interférence d'Accès Multiple (IAM) qui augmente avec le nombre d'utilisateurs et qui est liée aux propriétés d'inter-corrélation des codes est une des principales limites des performances d'un système OCDMA [12]. Parmi les autres limitations à l'application du OCDMA, certaines sont dues à la nature du canal (dispersion chromatique), d'autres au fonctionnement des composants électroniques, optiques et optoélectroniques (bande-passante, non-linéarités, bruits du photo détecteur, etc.) [12].

### 2.3. Différents architectures du système WDM

Le multiplexage WDM est caractérisé par l'intervalle minimum entre deux longueurs d'onde utilisables. Cet intervalle peut être exprimé en nanomètres ou en gigahertz. Lorsque l'espacement entre les longueurs d'onde est de 20 nm, on parle de Coarse WDM (CWDM). Le bienfait du CWDM est son coût. Pour un espacement plus faible (donc plus de longueurs d'onde simultanément en propagation), on parle de WDM voire Dense WDM (DWDM, plus de 32 longueurs d'onde) et même Ultra Dense WDM (UDWDM). Les systèmes DWDM commerciaux espacent les longueurs d'onde d'environ 0,8 nm (100 GHz), 0,4 nm (50GHz) voire 0,1 nm (12.5GHz). Par conséquent, il est possible de combiner 160 longueurs d'onde optiques et plus [12].

### 2.3.1 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 [13].

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 [13].

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 [13].

La figure (2.7) illustre un schéma DWDM. Aujourd'hui, les systèmes DWDM 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 [13].

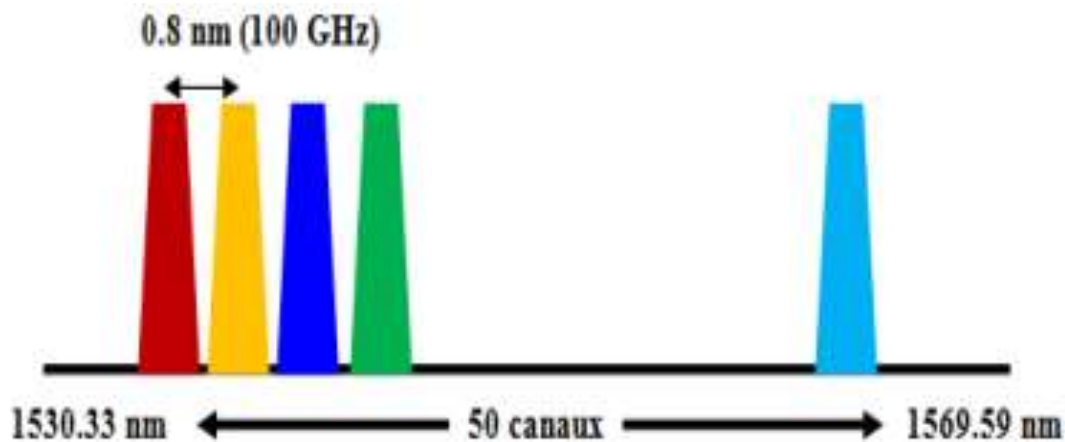


Figure 2.7 : Grille UIT pour DWDM avec un espacement 0.8 nm.

### 2.3.2 Multiplexage CWDM

Les systèmes CWDM 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 [13].

La figure (2.8) 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 [13].



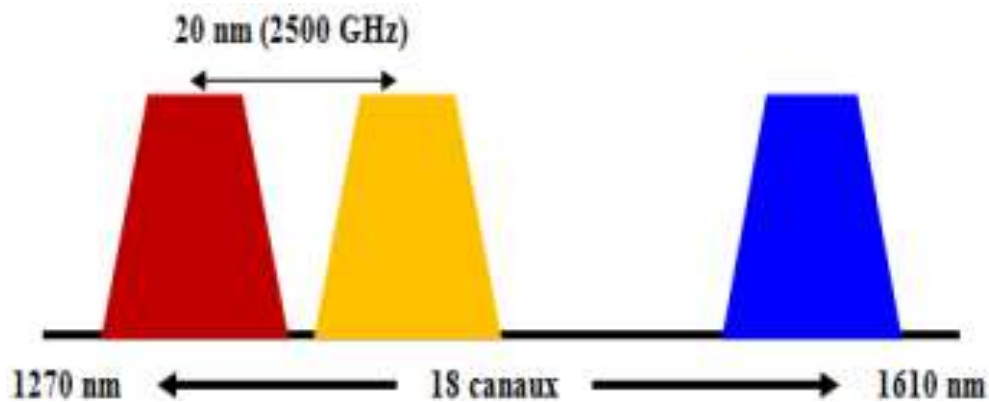


Figure 2.8 : Grille UIT pour CWDM avec un espacement 20 nm

Le tableau (2.1) ci-dessous présente une comparaison entre les deux types de multiplexages (CWDM et DWDM). La capacité totale de transmission pour la technique CWDM est de 40 Gbits/s, par contre la capacité totale de transmission pour la technique DWDM peut aller jusqu'à 1000 Gbit/s ce qui montre qu'il ya une différence majeure entre les deux technique de multiplexage.

CWDM	DWDM
Défini par longueurs d'ondes	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
Capacité plus bas	Capacité plus haute
Coût du câble faible	Coût du câble haut

Laser non refroidi	Laser refroidi
Espacement des canaux 20 nm	Espacement des canaux 0.4 nm, 0.8 nm, 0.1 nm
Nombre de canaux jusqu'à 18 canaux	Nombre de canaux (40, 80 jusqu'à 160 longueur d'onde)
Systèmes WDM avec un maximum de 16 longueurs d'onde actives par fibre	Systèmes WDM avec un maximum de 160 longueurs d'onde actives par fibre
Amplificateurs optiques non utilisés	Amplificateurs optiques utilisés
Capacité de chaque longueur d'onde jusqu'à 2.5 Gbps	Capacité de chaque longueur d'onde jusqu'à 10 Gbps
Capacité total (20-40 Gbps)	Capacité total (100-1000 Gbps)
Nombre de bandes utilisées (O, E, S, C et L)	Nombre de bandes utilisées (C, L)

Tableau 2.1 : Comparaison entre CWDM et DWDM

## 2.4. Techniques de multiplexage et démultiplexage

Dans cette section, nous discutons les différents composants optiques utilisés pour réaliser le multiplexage et démultiplexage des signaux optiques dans les systèmes de transmission optique WDM.

### 2.4.1 Multiplexeur optique à insertion et extraction OADM

Un composant OADM (Optical Add /Drop MuX) permet d'extraire un ou plusieurs signaux à travers un flux de signaux multiplexés transitant à différentes longueurs d'onde et/ou de les introduire sans risquer de chevaucher avec les signaux déjà présents dans le flux. Les OADM couplés avec la technique de multiplexage en longueur d'onde WDM offrent l'avantage de combiner rapidité et efficacité dans la manipulation des flux optiques. Sans les OADM, on aurait eu besoin de placer un nœud à chaque site où on envisagerait d'extraire ou d'introduire un signal dans le flux, ce qui mobiliserait à l'évidence plus d'investissement [14].

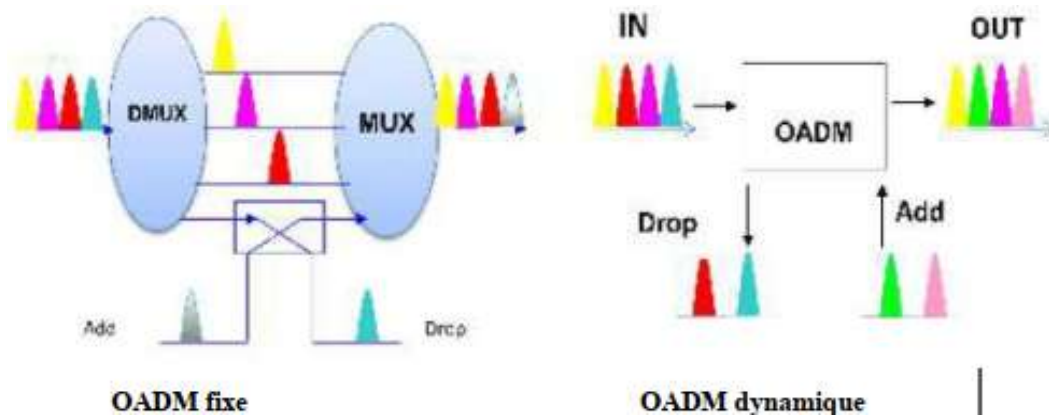


Figure 2.9 : Multiplexeur à insertion /extraction (Add/Drop) [14].

### 2.4.2 Démultiplexage avec interféromètre Mach-Zehnder

Ce type de démultiplexeur est constitué d'un interféromètre de type Mach-Zehnder, dont chacun des bras comporte un SOA (voir figure 2.10) [15].

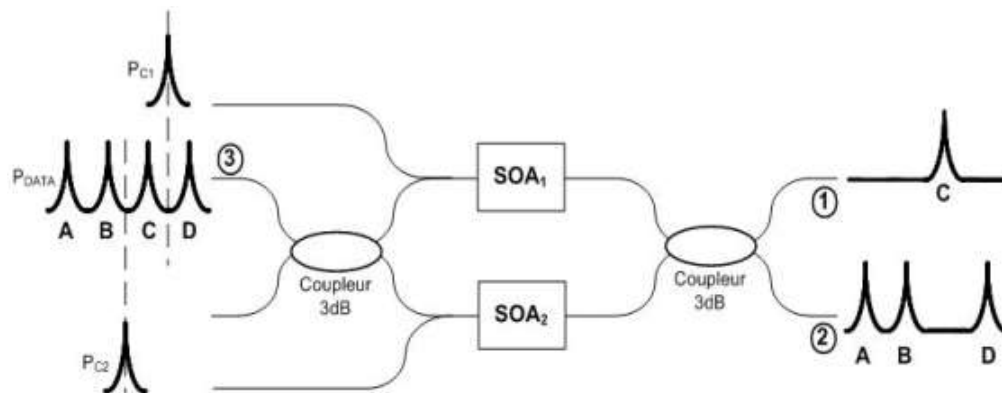


Figure 2.10 : Principe de fonctionnement du démultiplexeur par interféromètre de Mach-Zehnder [15].

L'entrée du dispositif est constituée d'un coupleur qui divise chaque pulse du train de pulses P<sub>DATA</sub> à l'entrée 3 en deux pulses identiques se propageant dans les deux bras. À la sortie, au niveau du coupleur, les deux pulses interfèrent pour reconstituer le pulse initial qui sort soit par la voie 1 soit par la voie 2 selon la différence de phase entre les deux pulses. Cette différence de phase est apportée au niveau des SOAs grâce à l'injection de deux pulses de contrôle de forte

intensité PC1 et PC2 dans les deux bras de l'interféromètre. Les deux pulses de contrôle sont issus de la même source et sont décalés dans le temps afin de traverser chacun les SOA à des instants différents [15].

L'injection du pulse de contrôle à travers le SOA modifie ses propriétés optiques à savoir sa réponse en gain et en phase. Le fait d'injecter les pulses de contrôle dans les deux bras fait que les deux trains de pulses de données subissent le même effet au niveau des SOAs. Cependant, en décalant d'un certain retard les instants d'injection des pulses de contrôle dans les bras, on décale dans le temps la variation de la réponse en gain et surtout en phase des SOAs. Ceci a pour conséquence de créer une fenêtre temporelle durant laquelle il y a une différence de phase de  $\pi$  entre les deux bras. Le pulse que l'on souhaite extraire se trouvant dans cette fenêtre temporelle (de largeur égale au retard entre les deux pulses de contrôle) est alors dirigé vers la sortie 1 du coupleur 3 dB en sortie du dispositif. Tous les autres pulses du train de pulse à l'entrée 3 subissent quant à eux le même retard au niveau des deux bras de l'interféromètre, et sont par conséquent dirigés vers la sortie 2 [15].

### 2.4.3 Démultiplexage par mélange à quatre ondes

La technique de démultiplexage par mélange à 4 ondes (FWM) utilise les caractéristiques de non linéarité du 3<sup>ème</sup> ordre dans les matériaux optiques. Son principe est schématisé sur la figure (2.11) [15].

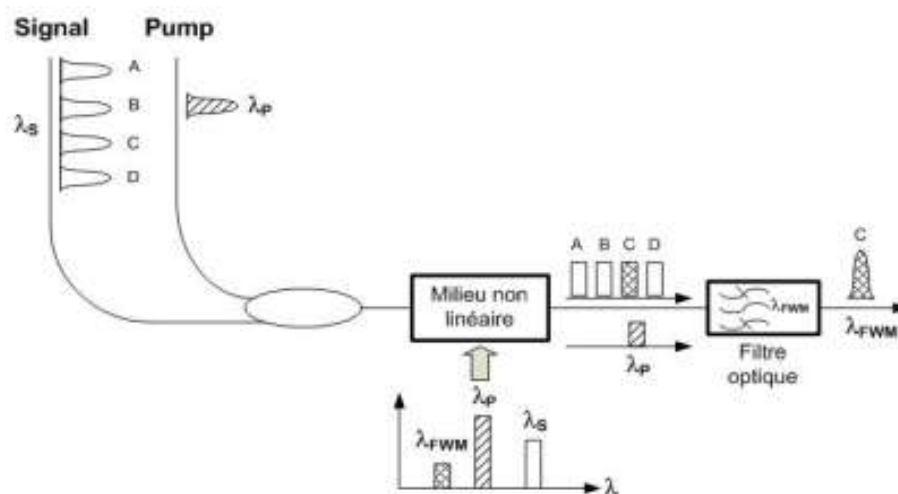


Figure 2.11: Principe de démultiplexage par mélange 4 ondes (FWM) [15].

Le signal de données multiplexées (à la longueur d'onde  $\lambda_s$ ) est injecté dans un milieu non linéaire, en même temps qu'un pulse optique de contrôle (de longueur d'onde  $\lambda_c$ ). Ce signal de contrôle joue le rôle de pompe pour le processus de mélange à 4 ondes. Dans la fenêtre temporelle où le pulse de pompe est superposé au signal utilisateur qu'on souhaite extraire, le processus de mélange FWM permet de générer un pulse optique à une nouvelle longueur d'onde  $\lambda_{FWM}$ , telle que  $\omega_{FWM} = 2\omega_c - \omega_s$ ,  $\omega_s$ ,  $\omega_c$  et  $\omega_{FWM}$  étant les pulsations optiques des signaux de données, de contrôle et du signal généré par mélange, respectivement. Le nouveau pulse généré est une image du pulse optique représentant le canal qu'on souhaite démultiplexer. Un filtre optique (centrée sur la longueur d'onde  $\lambda_{FWM}$ ) permet alors de séparer le nouveau signal généré du train de pulse initial et du signal de contrôle, le démultiplexage est ainsi réalisé. Les premiers dispositifs utilisaient des fibres à maintien de polarisation comme milieu non linéaire pour réaliser le mélange 4 ondes. Cependant, le défaut majeur d'un tel milieu était le faible facteur de non linéarité dans les fibres qui nécessitait l'utilisation des très longues distances de fibre pour obtenir un mélange efficace. Le SOA a alors remplacé la fibre en tant que milieu non linéaire dans les nouveaux dispositifs, permettant ainsi un important gain en compacité [15].

#### 2.4.4 Spectrométrie par réseau de guides d'ondes AWG

Les réseaux de guides d'ondes à déphasage AWG (Arrayed Waveguide Grating) sont des dispositifs dispersifs couramment utilisés comme démultiplexeurs optiques dans les systèmes DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) du domaine des télécommunications. Aussi appelé PHASAR, un AWG permet de multiplexer plusieurs canaux spectraux dans une seule fibre monomode, mais également de fonctionner dans l'autre sens en séparant un certain nombre de longueurs d'onde contenues dans le spectre véhiculé par une fibre de ligne, puis de les injecter dans autant de fibres optiques de sortie. Cela permet de récupérer, côté réception, les canaux spectraux individuels d'un réseau de communications optiques [16].

Les AWG conventionnels sont composés de guides d'ondes planaires fabriqués par dépôt de couches de silice dopées, ou non, sur un substrat de silicium. Au sein du dispositif, la lumière incidente traverse un espace libre et pénètre dans un faisceau de guides d'ondes optiques (figure 2.12). D'un guide au suivant, leur longueur est progressivement incrémentée ( $\Delta L \sim 100 \mu\text{m}$ ), ce qui induit un déphasage proportionnellement accru sur les ondes qui les parcourent. La lumière

traverse ensuite un second espace libre et interfère de manière constructive sur les entrées des guides d'ondes de sortie, de telle sorte que chaque canal ne reçoive qu'une unique longueur d'onde [16].

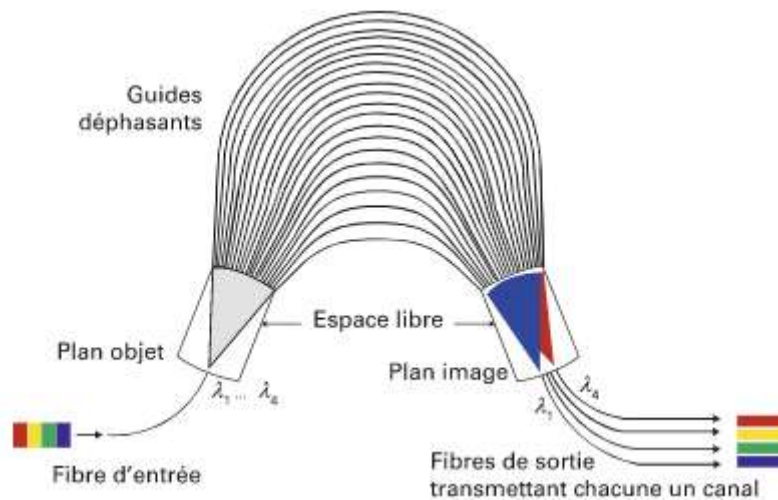


Figure 2.12 : Principe de fonctionnement d'un démultiplexeur de quatre canaux spectraux de type AWG [16].

## 2.5. Les contributions de la technique WDM

Le WDM répond aux besoins d'augmentation de débits et de taux de partage dans le réseau d'accès [13]. 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) [13].

- *La souplesse de multiplexage permet de superposer des adresses différents en fonction du type de clients (FTTx), des services (voix, données, vidéo ...), des technologies finales (xDSL, Wireless, Ethernet...) [13].*
- *Le WDM permet une indépendance vis-à-vis protocoles et une indépendance entre canaux [13]. 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 [13].*

## **2.6. Conclusion**

Le but de ce chapitre est de présenter les différentes techniques d'accès multiples en longueur d'onde WDM utilisées généralement pour transmettre les signaux dans le domaine optique. Grâce à notre études et recherche, nous avons conclu que, la technique du multiplexage en longueur d'onde WDM est plus adapté pour augmenter la capacité d'un système de communication en espace libre FSO. En effet, la technique WDM est très efficace pour réaliser un système de communication optique hybride WDM/FSO. Dans le chapitre suivant, nous aborderons les performances du système WDM/FSO multifaisceaux utilisant la technique WDM et CWDM.

# **Chapitre 3 : Performances du système WDM/FSO multifaisceaux: Simulation, résultats et discussion**

## **3.1. Introduction**

La technologie FSO est capable à offrir un système de transmission optique à haut débit, plus sécurisé et économique aux systèmes de communication conventionnels. La principale limitation de cette technologie est la visibilité dans les pires conditions météorologiques où il souffre de la plus forte atténuation du signal transmis. Les conditions météorologiques qui affectent la transmission des données sont la pluie et le brouillard, à cause desquels le signal reçu s'estompe et le taux d'erreur binaire augmente, ce qui constitue une violation des caractéristiques d'un système de liaison FSO idéal.

Dans ce chapitre, nous allons étudier et évaluer les performances d'un système de télécommunication optique WDM/FSO multifaisceaux utilisant deux techniques de multiplexages par répartition en longueur d'onde (WDM à 32 canaux et CWDM à 16 canaux). Les simulations sont effectuées sous le logiciel OptiSystem. Pour cela, nous commençons à présenter les modèles des systèmes proposés (systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO) multifaisceaux. Ensuite, nous allons présenter les performances de ces systèmes multifaisceaux sous les conditions météorologiques. Finalement, nous allons discuter et comparer nos résultats de simulation à propos les deux systèmes (WDM/FSO et CWDM/FSO) multifaisceaux.

## **3.2. Principe de fonctionnement du système WDM/FSO**

Le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) fait référence à la technique dans laquelle plusieurs signaux sont multiplexés ensemble et transmis en un seul signal. Ainsi, dans le système WDM-FSO, plusieurs signaux de modulation modulent différentes porteuses optiques



(canaux) sont multiplexées et envoyées à travers un seul ou plusieurs faisceaux laser. Ces systèmes utilisent au mieux la capacité du canal pour améliorer la capacité de transfert de données. Ils sont flexibles car des canaux peuvent être ajoutés ou supprimés à n'importe quel point de la liaison à l'aide de multiplexeurs optiques. Cependant, ils souffrent également des effets météorologiques et des turbulences atmosphériques.

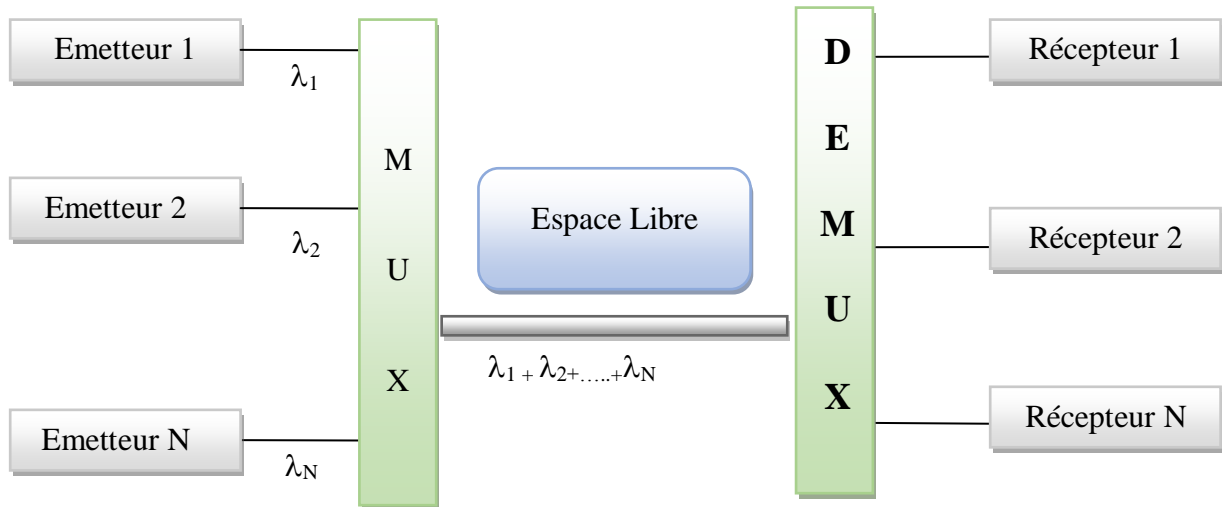
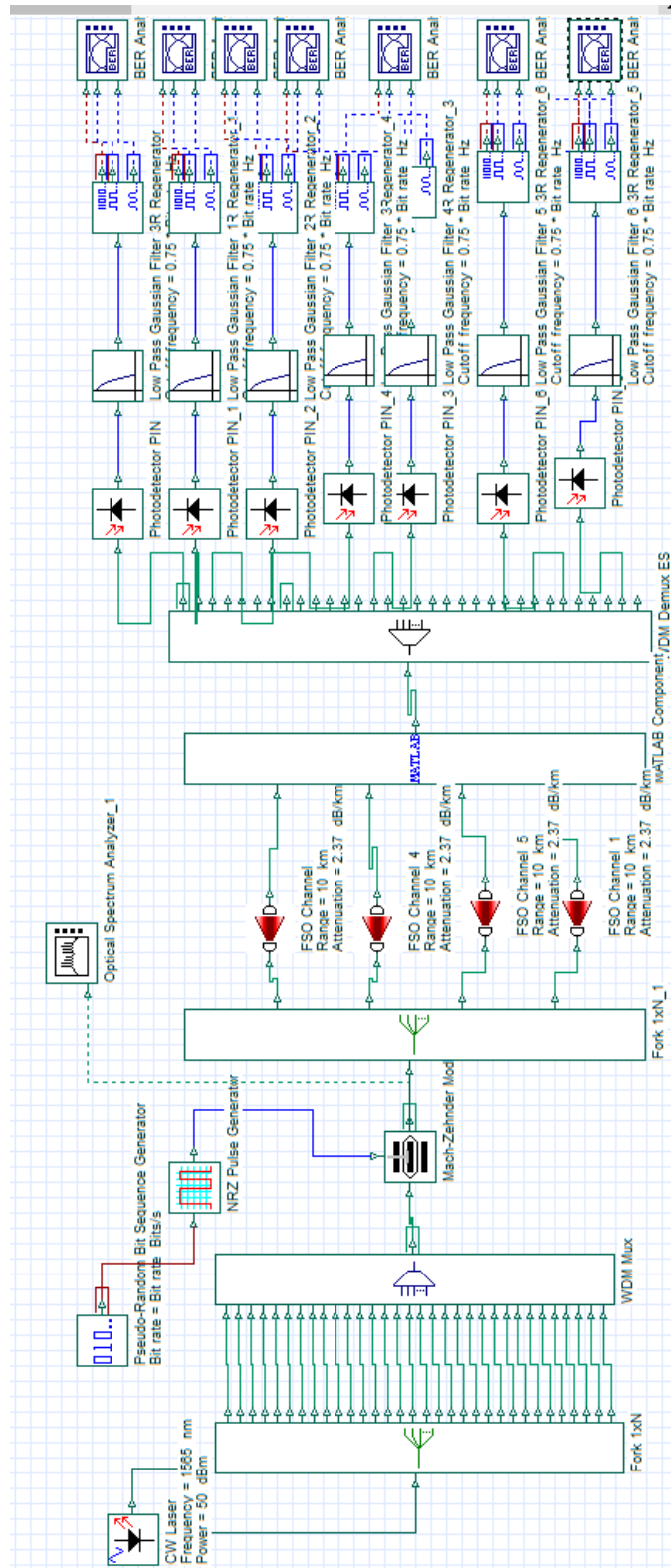


Figure 3.1 : Schéma de principe d'un système de télécommunication optique WDM/FSO.

### 3.3. Modèle du système WDM/FSO multifaisceaux sous Opti-System

Figure 3.2 : Modèle du système WDM/FSO multifaisceaux sous Optisystem.



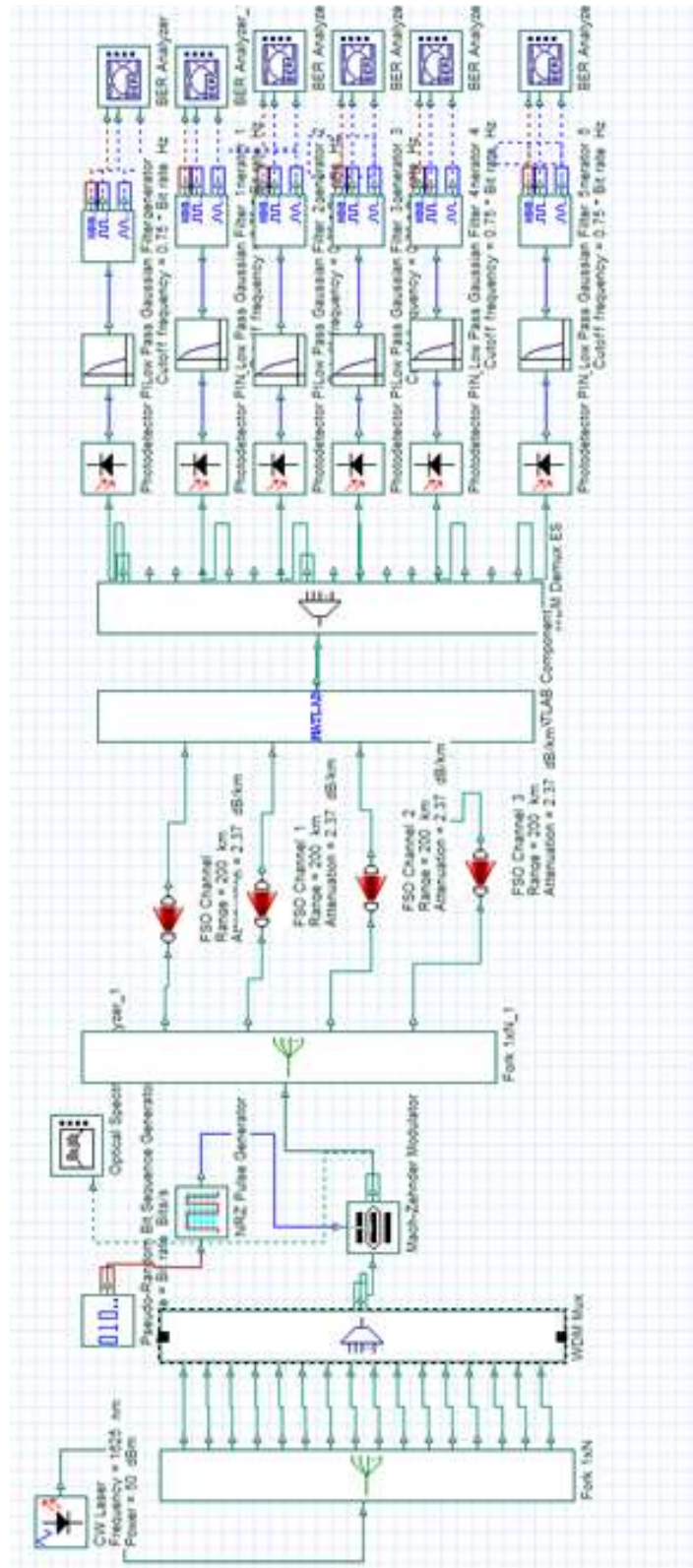
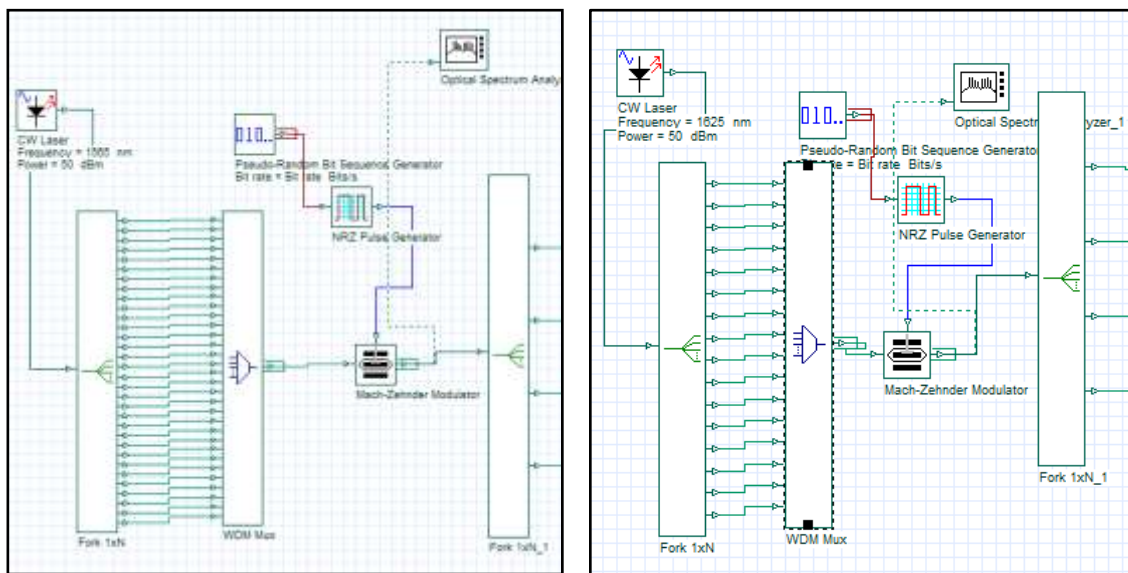


Figure 3.3 : Modèle du système CWDM/FSO multifaisceaux sous OptiSystem.

### 3.3.1. Emetteur

Dans les systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux, une diode laser de type CW est utilisée dans la partie d'émission. La sortie de la diode laser est divisé en N sortie garce un diviseur de puissance de type  $(1 \times N)$ . Les sorties de ce dernier est multiplexé avec un multiplexeur optique WDM, avec un espacement entre canaux régulier (dans notre cas, l'espacement entre canaux est de 0.6 nm et 0.8 nm pour les techniques WDM et CWDM respectivement). Un générateur de séquence des bits pseudo-aléatoires et un générateur d'impulsions NRZ sont employés pour générés des données. Ainsi, un modulateur optique externe de type MZM est employé pour réaliser la modulation optique.



Partie d'émission du système  
WDM/FSO multifaisceaux

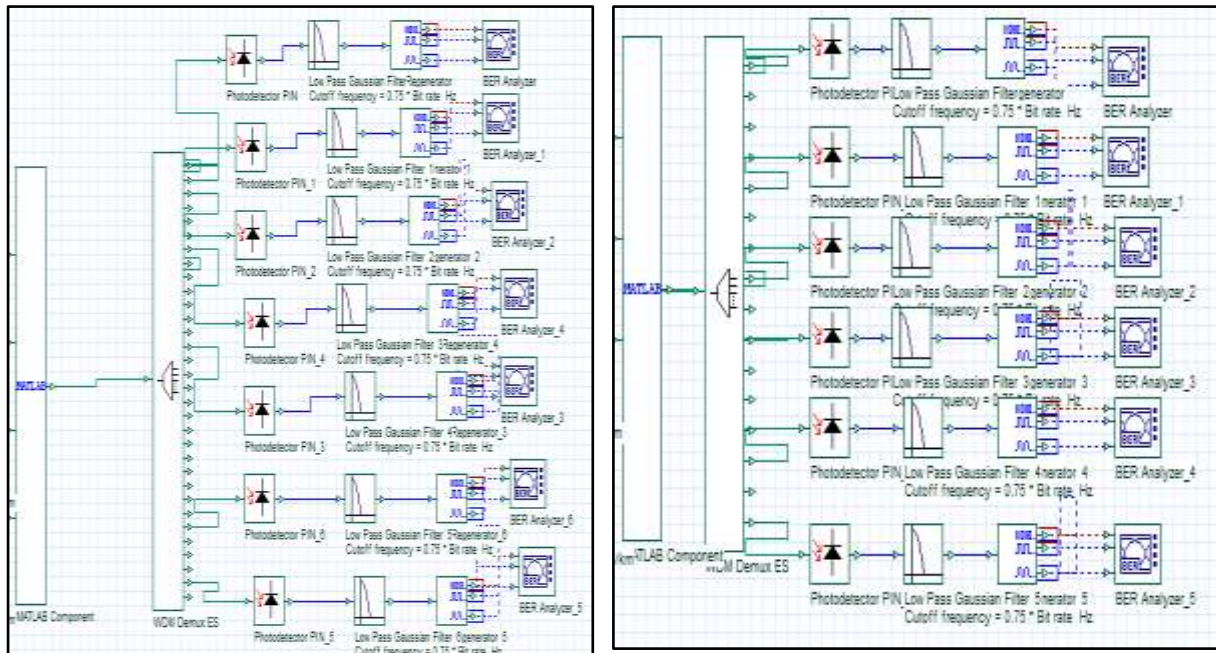
Partie d'émission du système  
CWDM/FSO multifaisceaux

Figure 3.4 : Modèle du l'émetteur optique des systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux.

### 3.3.2. Récepteur

Cette partie contient un composant MATLAB qui recueille tout les canaux FSO, ensuite il l'envoi comme un seul canal à travers sa sortie. Grace à un démultiplexeur, le signal optique est ensuite divisé en plusieurs signaux optiques de longueurs d'onde différents (32 longueurs d'onde

pour la technique WDM et 16 longueurs d'onde pour CWDM). Une photo-détecteur PIN est utilisé pour convertir le signal optique en un signal électrique, ensuite le signal est filtré par un filtre électrique de type Gaussian afin de récupérer les données transmises par chaque utilisateur. La fréquence de coupure de ce filtre a été choisi égale à  $D_b \times 0.75$ , où  $D_b$  représente le débit binaire de transmission. Un analyseur BER, est employé pour afficher les résultats de la simulation (le diagramme de l'œil et le facteur de qualité).



Partie de réception du système  
WDM/FSO multifaisceaux

Partie de réception du système  
CWDM/FSO multifaisceaux

Figure 3.5 : Modèle des récepteurs des systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux

### 3.3.3. Canal de propagation FSO

Le modèle du canal FSO sous OptiSystem est montré dans la figure (3.6). Ce modèle permet de modéliser tous les effets atmosphériques de l'environnement ainsi que les paramètres géométriques du canal FSO. Dans notre système FSO multifaisceaux, le canal de propagation contient N canaux de transmission FSO. Dans la partie d'émission, la lumière est divisée en N



faisceaux puis il est envoyé dans l'espace libre. À la réception, chaque faisceau est détecté par une photodiode.

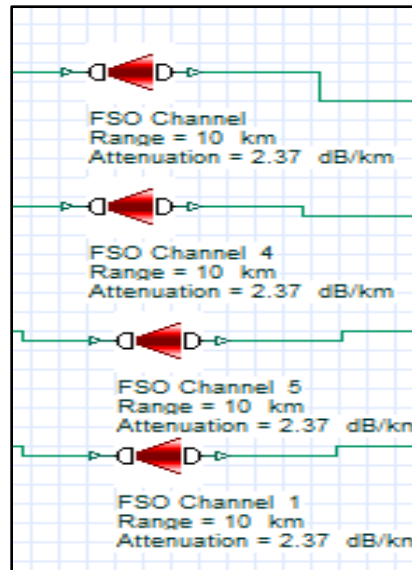


Figure 3.6 : Schéma de canal FSO des systèmes WDM/FSO multifaisceaux.

### 3.4. Paramètres de la simulation

Le tableau (3.1) présente les différents paramètres employés dans la simulation. Pour les deux types de systèmes (WDM/FSO et CWDM/FSO), le débit de transmission, le nombre des canaux FSO, la distance de la liaison FSO et la puissance optique d'émission sont des paramètres majeurs dans notre étude et analyse. En effet, les performances des systèmes de télécommunications optiques (WDM/FSO et CWDM/FSO) multifaisceaux, ont été étudiées et analysés en fonction de ces paramètres. La différence entre les deux systèmes (WDM/FSO et CWDM/FSO) réside dans la technique de multiplexage WDM employée. Comme montré dans le tableau (3.1), pour la technique de multiplexage WDM, nous pouvons employée 32 canaux avec un espacement entre canaux de 0.6 nm et centré dans la plage de longueur d'onde de [1530 1565] nm. Par contre, pour la technique CWDM nous pouvons employée 16 canaux seulement avec un espacement entre canaux de 0.8 nm est centré dans la plage de longueur d'onde de [1625 1675] nm.

Paramètres	Valeur
Débit de transmission	2.5 Gbps
Distance de la liaison FSO	1 jusqu'à 200 Km
Puissance optique d'émission	50 dBm
Longueur des séquences	256 Bits
Nombre d'échantillons par bit	64échantillons
Nombre de canaux FSO	4 canaux
Diamètre d'ouverture d'émetteur FSO	5 cm
Diamètre d'ouverture de récepteur FSO	20 cm
Angle de divergence	0.25 mrad
Technique WDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 32 canaux</li> <li>✓ Espacement entre canaux 0.6 nm,</li> <li>✓ Longueur d'onde [1530 1565] nm</li> </ul>
Technique CWDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 16 canaux</li> <li>✓ Espacement entre canaux 0.8 nm</li> <li>✓ Longueur d'onde [1625 1675] nm</li> </ul>

Tableau 3.1 : Paramètres de la simulation.

Le tableau (3.2) présente les conditions météorologiques employées dans la simulation ainsi que ses valeurs. Les différentes conditions météorologiques sont modélisées par l'atténuation, donc nous pouvons citer quatre conditions météorologiques pour le système FSO : très clair, clair, légère pluie et brouillard, fort pluie et brouillard).

Conditions météorologiques	Atténuation (db/Km)
Très clair	0.065
Clair	0.233
Légère pluie et brouillard	0.55
Fort pluie et brouillard	2.37

Tableau 3.2 : Valeurs de l'atténuation correspondant aux conditions météorologiques.

### 3.5. Performances du système WDM/FSO multifaisceaux

Dans cette section, nous allons présenter les résultats obtenus pour le système WDM-FSO multifaisceaux. Les effets de turbulence dans l'atmosphère pour le système proposé ont été étudiés en termes de facteur de qualité et le diagramme de l'œil.

#### 3.5.1. Influence du nombre de canaux de transmission FSO

Dans cette partie, nous avons commencé par vérifier l'influence du nombre de canaux sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux proposée dans la figure (3.2). Pour cela, nous avons fixé les paramètres suivants : l'émetteur optique est basé sur le codage NRZ, l'atténuation de l'environnement du canal FSO est variée en fonction de chaque cas météorologiques tel que pour les cas météorologiques suivants : météo très clair, clair, légère pluie et brouillard, fort pluie et brouillard, la distance du canal FSO est de 10 km et la puissance optique d'émission est de 60 dbm.

D'après les résultats obtenus dans le tableau (3.3), nous avons observé que l'augmentation du nombre de canaux pour chaque condition métrologique n'a aucune influence sur le facteur de qualité et donc sur les performances de système WDM/FSO multifaisceaux proposé.

Nombre de canaux		N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8
Facteur Q	Très clair	282.601	282.601	282.601	282.601	282.601	282.601	282.601
	Clair	282.564	282.564	282.564	282.564	282.564	282.564	282.564
	Légère pluie et brouillard	282.464	282.464	282.464	282.464	282.464	282.464	282.464
	Fort pluie et brouillard	277.188	277.188	277.188	277.188	277.188	277.188	277.188

Tableau 3.3 : Influence du nombre de canaux sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux.

#### 3.5.2. Influence de la puissance optique d'émission

Afin d'étudier et analyser l'impact de la puissance optique de l'émetteur sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux proposé, nous avons tracé la variation de facteur de qualité en fonction de la puissance optique d'émission (voir figure 3.7). Dans les simulations,



nous avons conservées des paramètres de simulations suivants : l'émetteur optique est basé sur le codage NRZ avec une distance de la liaison FSO de 10 km. L'atténuation de l'environnement des canaux FSO est variée en fonction de chaque cas météorologiques et la puissance optique d'émission est variée depuis -10 jusqu'à 80 dBm.

Selon les résultats obtenus dans la figure (3.7), l'augmentation de la puissance optique d'émission du système proposé a une influence considérable sur le facteur de qualité du système WDM/ FSO multifaisceaux. Comme observé dans le résultat du cas de la simulation en WDM/FSO, lorsque la puissance optique d'émission augmente le facteur de qualité augmente puis il devient constant. Ceci est similaire pour les quatre cas de l'environnement. Donc, d'après les résultats obtenus la puissance optique d'émission a une influence important sur la qualité de transmission du système WDM/FSO multifaisceaux. En conclusion, la portée de la liaison WDM/FSO peut être optimisée grâce à l'augmentation de la puissance de l'émetteur optique.

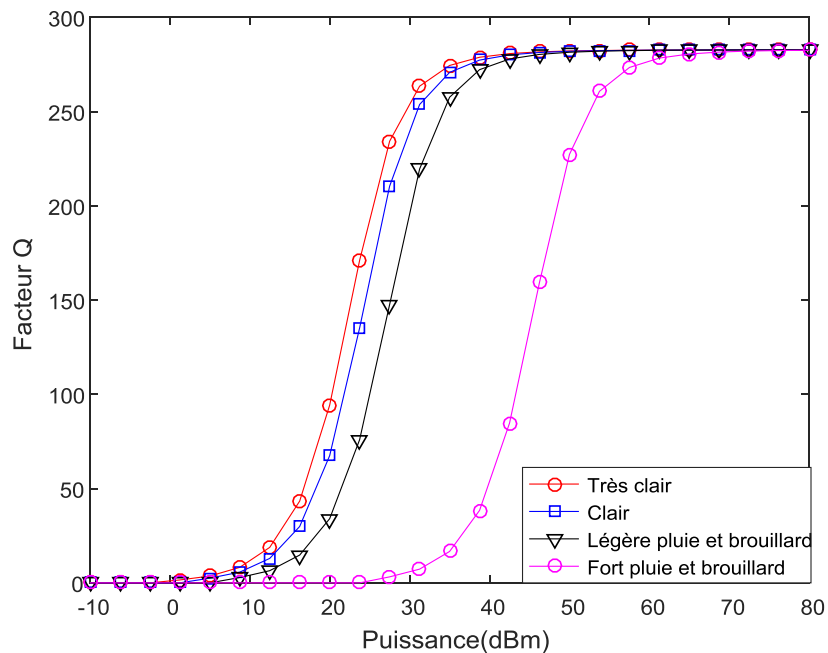


Figure 3.7 : Evolution du facteur de qualité en fonction de la puissance optique d'émission pour le système WDM/FSO multifaisceaux.

Pour une puissance optique d'émission de 50 dBm nous remarquons que le diagramme de l'œil est ouvert pour l'environnement très clair. Par contre, pour la même valeur de la puissance

optique d'émission, dans le cas d'environnement fort pluie et brouillard, nous remarquons qu'il n'y a pas d'une différence significative entre le diagramme de l'œil de ce cas et le premier cas. Ce qui montre que cette valeur critique de la puissance optique d'émission.

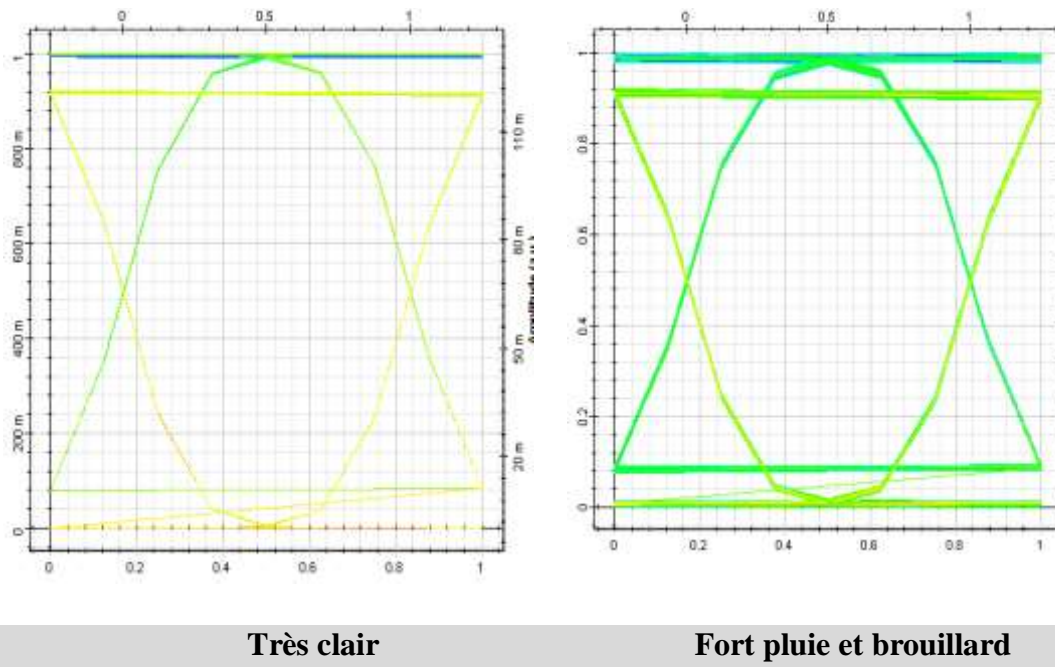


Figure 3.8 : Diagramme de l'œil du système WDM/FSO pour une puissance optique d'émission de 50 dBm et deux conditions météorologiques.

### 3.5.3. Influence du porté de la liaison FSO

La figure (3.9) présente la variation de facteur de qualité en fonction du porté du canal FSO pour un système WDM/FSO utilisant le format de modulation NRZ. Ce porté est varié de 1 km à 200 km, avec une puissance optique d'émission constante de 60 dbm. L'atténuation de l'environnement des canaux FSO est variée en fonction de chaque cas météorologiques. D'après les résultats obtenus, nous remarquons que le facteur de qualité diminue quand la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente. Par conséquent, nous constatons que lorsque la distance de des systèmes WDM/FSO multifaisceaux augmente, la qualité du signal reçu diminue.

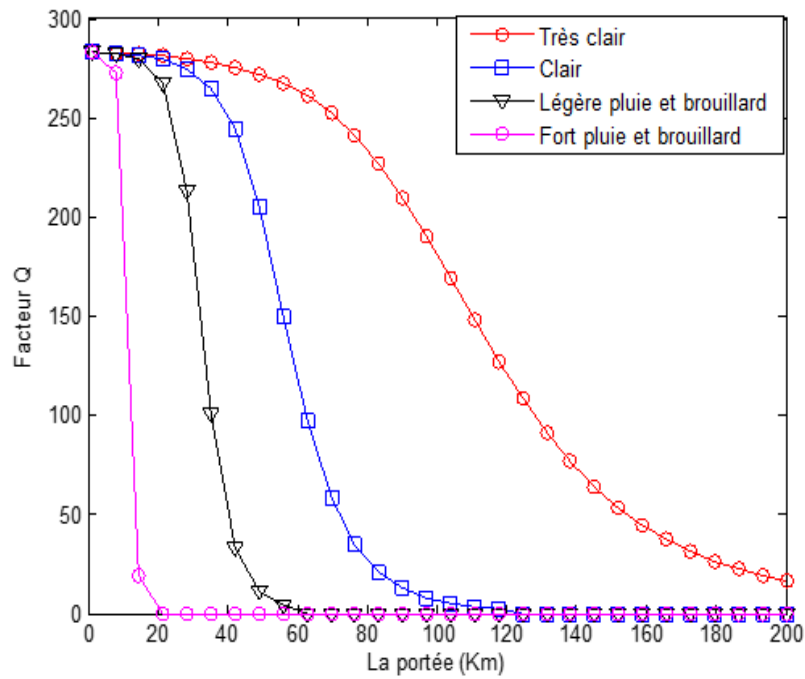


Figure 3.9: Evolution du facteur de qualité en fonction de la portée de liaison FSO pour le système WDM/FSO multifaisceaux.

Comme illustré dans la figure (3.10), pour une portée de la liaison FSO de 202 km et un environnement très clair nous remarquons que le diagramme de l'œil est ouvert. Par contre, pour une portée de la liaison FSO de 18 km et un environnement fort pluie et brouillard, nous remarquons que le diagramme de l'œil est fermé. Ce qui montre que ces valeurs représentent les valeurs critique de la portée de liaison FSO. Donc la portée de la liaison à une influence sur la qualité de transmission du système WDM/FSO multifaisceaux.

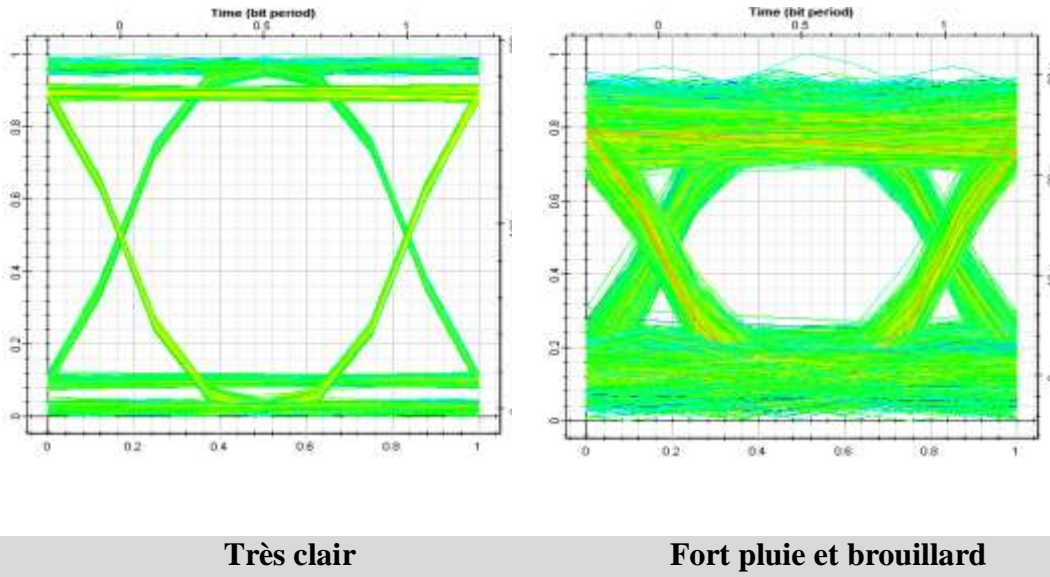


Figure 3.10 : Diagramme de l'œil du système WDM/FSO multifaisceaux pour deux valeurs de la portée de la liaison FSO et deux conditions météorologiques.

### 3.5.4. Influence de débit de donnée

Dans cette partie, nous allons présenter l'influence du débit de données sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux proposée. Pour cela, nous avons fixé les paramètres suivants : l'émetteur optique est basé sur le format de modulation NRZ, l'atténuation du canal FSO est varié en fonction de chaque cas météorologiques, la puissance optique d'émission est de 50 dbm et le TEB est de  $10^{-9}$ .

Selon les résultats obtenus dans les tableaux (3.4), (3.5), (3.6) et (3.7), l'augmentation de débit binaire de transmission pour chaque condition météorologique n'a aucune influence sur le facteur de qualité et donc sur la qualité de transmission. En effet, d'après les résultats présentés dans ces tableaux nous remarquons que le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire (TEB) restent constants lorsque le débit binaire augmente. Par contre, pour chaque condition météorologique nous remarquons que la distance entre l'émetteur et le récepteur diminue. Nous constatons donc que le débit binaire n'influe pas sur les performances du système WDM/FSO proposé mais plutôt sur la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Débit (Gbit/s)	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
Facteur(Q)	5.86	5.74	5.98	5.65	5.96	5.99	5.84	5.94
Distance	243.1	229.3	218.96	215.17	208.62	205.17	203.10	199.31
TEB ( $\times 10^{-9}$ )	2.2	4.72	1.06	7.85	1.19	1.02	2.47	1.40

Tableau 3.4 : Influence de débit de données sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux pour un environnement très clair.

Débit (Gbit/s)	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
Facteur(Q)	5.71	5.70	5.86	5.71	5.75	5.96	5.96	5.97
Distance	101.03	96.37	93.27	91.72	90.17	88.62	87.58	86.55
TEB ( $\times 10^{-9}$ )	5.38	5.80	2.22	5.39	4.44	1.25	1.19	1.12

Tableau 3.5 : Influence de débit de données sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux pour un environnement clair.

Débit (Gbit/s)	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
Facteur(Q)	5.92	5.89	5.72	5.89	5.75	5.95	5.84	5.74
Distance	52.75	50.68	49.65	48.62	48.10	47.41	47.06	46.72
TEB ( $\times 10^{-9}$ )	1.58	1.85	5.10	1.92	4.35	1.30	2.48	4.70

Tableau 3.6 : Influence de débit de données sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux pour un environnement légère pluie et brouillard

Débit (Gbit/s)	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
Facteur(Q)	5.69	5.69	5.84	5.82	5.98	5.79	5.88	5.71
Distance	16.55	16.03	15.68	15.48	15.27	15.20	15.06	15
TEB ( $\times 10^{-9}$ )	6.14	6.32	2.48	2.86	1.09	3.39	1.99	5.52

Tableau 3.7 : Influence de débit de données sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux pour un environnement fort pluie et brouillard

Pour un débit de données de 2.5 GHz et une distance de 243.1 km nous remarquons que le diagramme de l'œil est fermé pour l'environnement très clair. Pour la même valeur de débit de données et une distance de 16.55 km, nous remarquons que le diagramme de l'œil est fermé aussi pour le cas d'environnement fort pluie et brouillard. Ce qui montre que le débit binaire n'a aucune influence sur le facteur de qualité et donc sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux dans tous les conditions météorologiques.

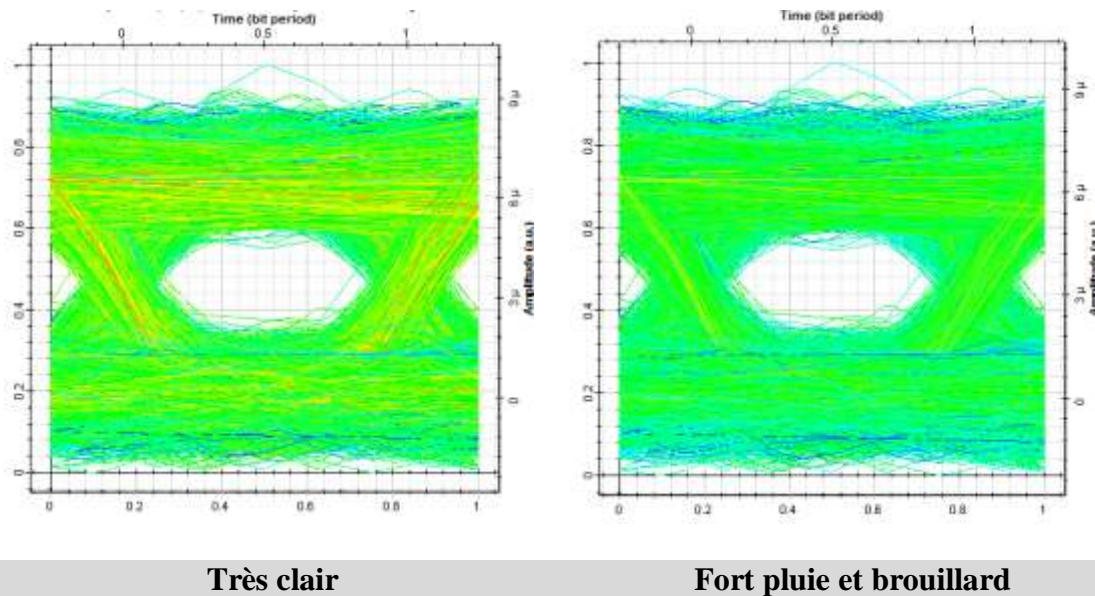


Figure 3.11 : Diagramme de l'œil du système WDM/FSO multifaisceaux pour un débit binaire de 2.5 Gbits/s et deux conditions météorologiques.

### 3.5.5. Influence du format de modulation

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet du format de modulation au niveau d'émetteur optique (NRZ et RZ) sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux. Pour cela, les simulations ont été effectués pour chaque type de format de modulation, une distance des canaux FSO variée de 10 km à 50 km et une atténuation de l'environnement variée en fonction de chaque condition météorologiques. La puissance optique d'émission est de 60 dbm et le débit binaire est de 10 GHz.

D'après les résultats obtenus dans les tableaux (3.8) et (3.9) pour les deux types de format de modulation NRZ et RZ nous avons observé que le facteur de qualité obtenu pour le système WDM/FSO multifaisceaux utilisant le codage RZ est plus élevé que celui utilisant le format de modulation NRZ. En effet, l'ouverture de l'œil pour le format RZ est beaucoup mieux que le format NRZ (voir la figure 3.12). Par conséquent, le format de modulation RZ présente une meilleure performance par rapport au format de la modulation NRZ.

Distance		10	20	30	40	50
Facteur Q	Très clair	1280.47	1279.16	1268.19	1242.48	1197.87
	Clair	1280.72	1271.73	1212.51	1047.38	766.29
	Légère pluie et brouillard	1280.43	1202.02	733.82	219.34	44.55
	Fort pluie et brouillard	902.00	2.88	0	0	0

Tableau 3.8 : Performances du système WDM/FSO multifaisceaux utilisant le format de modulation RZ.

Distance		10	20	30	40	50
Facteur Q	Très clair	268.89	268.56	268.04	267.26	266.13
	Clair	268.83	268.17	266.49	262.38	252.26
	Légère pluie et brouillard	268.68	266.23	250.57	160.94	42.69
	Fort pluie et brouillard	257.93	3.06	0	0	0

Tableau 3.9 : Performances du système WDM/FSO multifaisceaux utilisant le format de modulation NRZ.



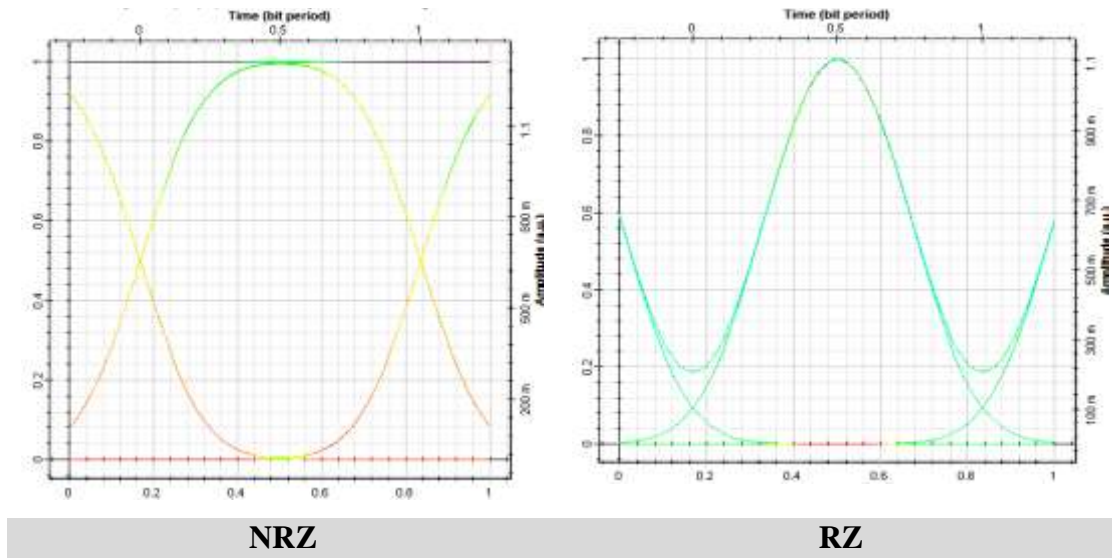


Figure 3.12 : Diagramme de l'œil du système WDM/FSO multifaisceaux utilisant deux formats de modulation NRZ et RZ.

### 3.6. Performances du système CWDM/FSO multifaisceaux

Dans cette section, nous discutons les résultats de simulation obtenus pour un système de télécommunication optique CWDM/FSO multifaisceaux. Les performances du système proposé sous les conditions météorologiques ont été étudiées en termes de facteur de qualité et de diagramme de l'œil.

#### 3.6.1. Influence du nombre de canaux de transmission FSO

L'objectif de cette partie est de vérifier l'influence du nombre de canaux sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux. Dans les simulations, l'émetteur optique est basé sur le codage NRZ, les conditions météorologiques sont spécifiées par les valeurs de l'atténuation selon le tableau (3.2), la distance du canal FSO est de 10 km et la puissance optique d'émission est de 60 dbm.

À partir des résultats obtenus (voir tableau (3.10)), nous remarquons que le facteur de qualité du système CWDM/FSO multifaisceaux proposée est presque constant pour toutes conditions météorologiques. Par conséquent, pour chaque cas météorologiques le nombre de canaux FSO n'affecte pas les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux.



Nombre de canaux		N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8
Facteur Q	Très clair	283.337	283.337	283.337	283.337	283.337	283.337	283.337
	Clair	283.299	283.299	283.299	283.299	283.299	283.299	283.299
	Légère pluie et brouillard	283.196	283.196	283.196	283.196	283.196	283.196	283.196
	Fort pluie et brouillard	277.865	277.865	277.865	277.865	277.865	277.865	277.865

Tableau 3.10 : Influence du nombre de canaux sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux.

### 3.6.2. Influence de la puissance optique d'émission

La figure (3.13) montre la variation du facteur de qualité en fonction de la puissance optique d'émission pour un système de télécommunication optique CWDM/FSO multifaisceaux. Dans les simulations : la distance du canal FSO est de 10 km et son atténuation est variée en fonction de chaque cas météorologiques comme illustré dans le tableau (3.2), la puissance optique d'émission est variée de -10 dBm à 80 dBm.

Comme pour le système précédent (WDM/FSO multifaisceaux), nous remarquons que le facteur de qualité augmente puis il devient constant lorsque la puissance optique d'émission augmente. L'évolution du facteur de qualité est similaire pour les quatre conditions météorologiques. En conséquence, il est tout à fait clair que l'augmentation de la puissance optique d'émission a un impact significatif sur la performance du système CWDM/FSO multifaisceaux.

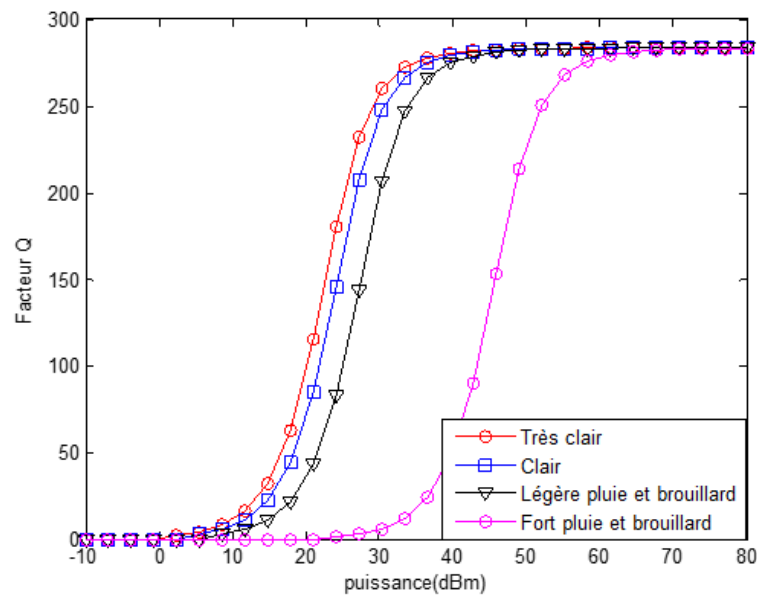
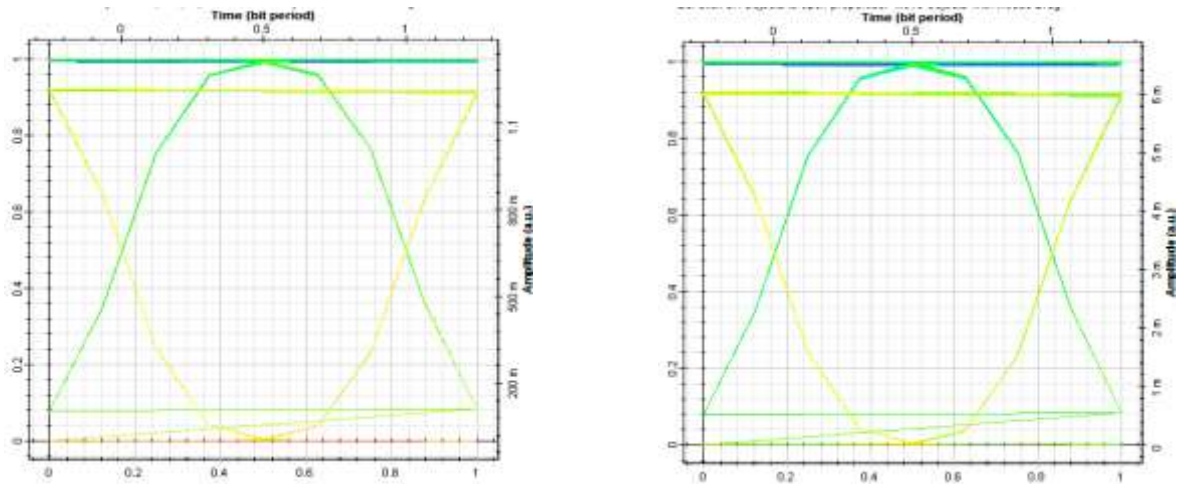


Figure 3.13: Evolution du facteur de qualité en fonction de la puissance optique d'émission pour le système CWDM/FSO multifaisceaux.

Pour confirmer l'influence de la puissance optique d'émission sur les performances du système CWDM/FSO, nous avons tracé le diagramme de l'œil du système pour deux conditions météorologiques et une puissance optique d'émission de 60 dBm. Comme illustré sur la figure (3.14), nous remarquons que le diagramme de l'œil est ouvert pour les deux conditions météorologiques (très clair et fort pluie et brouillard). Ce qui montre que cette valeur présente une valeur critique pour la puissance optique d'émission et pour tous les conditions météorologiques.



**Très clair**

**Fort pluie et brouillard**

Figure 3.14 : Diagramme de l'œil du système WDM/FSO multifaisceaux pour une puissance optique d'émission de 60 dBm et sous l'effet de deux conditions météorologiques.

### 3.6.3. Influence du porté de la liaison FSO

Dans cette partie, nous allons évaluer l'influence de la portée du canal FSO sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux proposé de la figure (3.3). La portée de la liaison CWDM/FSO multifaisceaux est variée de 1 km à 200 km, avec une puissance d'émission constante de 60 dbm et format de modulation NRZ. L'atténuation des canaux FSO est variée en fonction de chaque condition météorologique. A partir de la figure 3.15, nous observons que le facteur de qualité diminue quand la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente. Cela signifie que l'augmentation de la portée de la liaison du canal FSO peut dégrader les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux. Donc, si la distance augmente, la qualité du signal reçu dégradée.

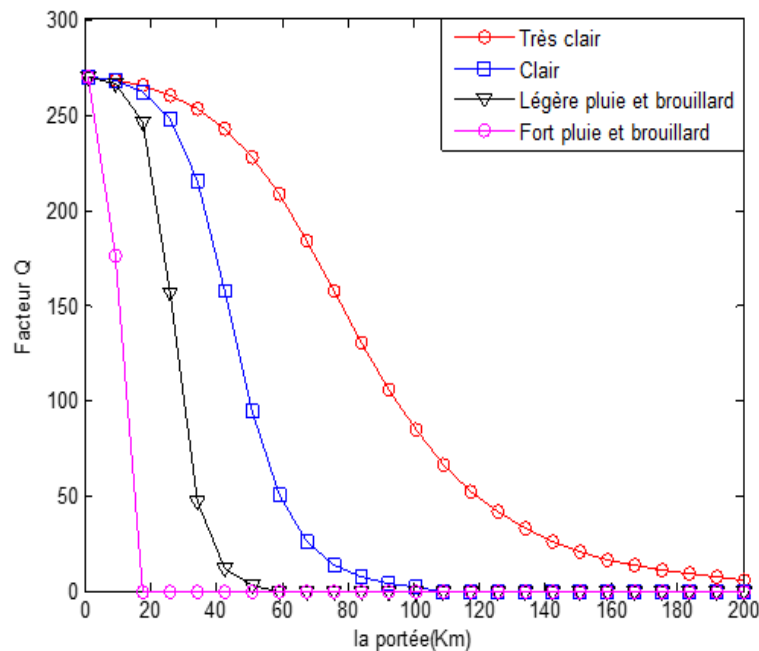


Figure 3.15: Evolution du facteur de qualité en fonction de la portée de la liaison FSO pour le système CWDM/FSO multifaisceaux.

D'autre part, la meilleure façon d'évaluer la qualité du signal optique transmis dans ce type de système multifaisceaux est d'observer son diagramme de l'œil. Comme illustré dans la figure (3.16), le diagramme de l'œil est ouvert pour une portée de la liaison FSO de 202 km et un environnement très clair. Par contre, pour une portée de la liaison FSO de 18 km et un environnement fort pluie et brouillard, le diagramme de l'œil est fermé. Cela montre que la qualité de transmission est dégradée. Donc la portée de la liaison a une influence important sur la qualité de transmission du système CWDM/FSO multifaisceaux. Par conséquent, ces valeurs représentent les valeurs critiques de la portée de la liaison FSO dans le système CWDM/FSO multifaisceaux.

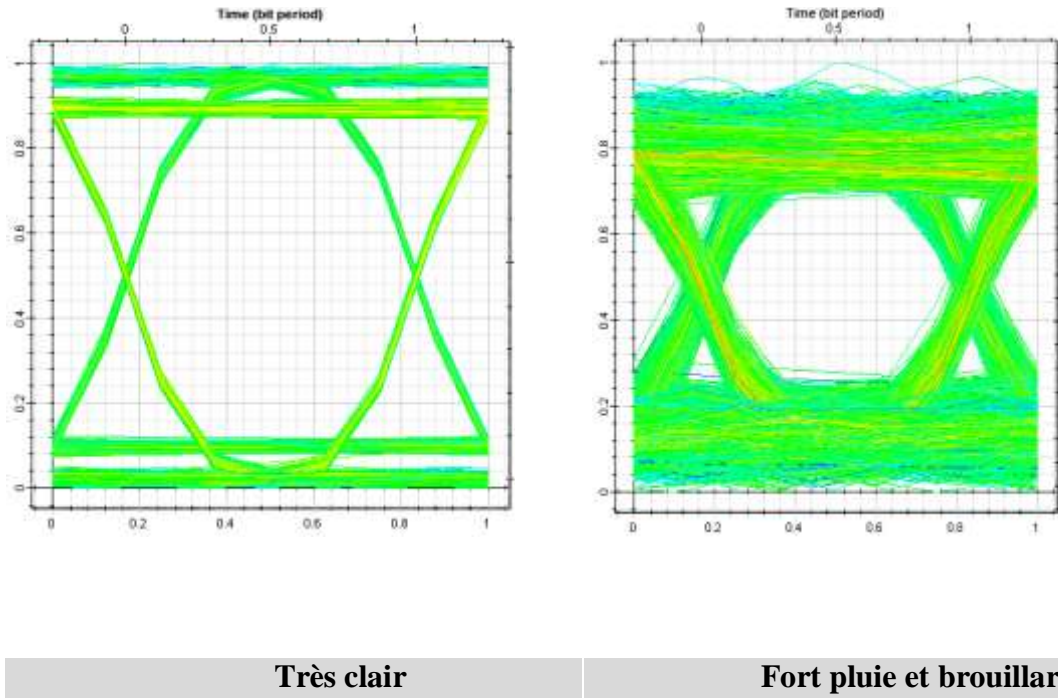


Figure 3.16 : Diagramme de l'œil du système CWDM/FSO pour deux valeurs de la portée de la liaison FSO et sous l'effet de deux conditions météorologiques

#### 3.6.4. Influence de débit de donnée

Après les résultats obtenus précédemment à propos de l'influence du porté de la liaison FSO sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux, nous avons étudié l'influence de débit binaire de transmission sur les performances de ce système. Pour cela, nous avons fixé les paramètres suivants : l'émetteur optique est basé sur le format de modulation NRZ, l'atténuation du canal FSO est varié en fonction de chaque condition météorologique, la puissance optique d'émission est de 50 dbm, le TEB est de  $10^{-9}$ .

A partir des résultats présentés dans les tableaux (3.11), (3.12), (3.13), (3.14), nous observons que pour chaque condition météorologique le taux d'erreur binaire et le facteur de qualité restent constants et la distance entre l'émetteur et le récepteur diminue. Par conséquent, Comme pour le système précédent le débit binaire n'affecte pas les performances du système CWDM/FSO mais plutôt sur la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Débit (Gbit/s)	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
Facteur Q	5.81	5.68	5.96	5.97	5.81	5.93	5.98	5.93
Distance	243.79	230	227.93	213.44	210	205.86	202.14	199.65
TEB ( $\times 10^{-9}$ )	2.96	6.38	1.24	1.17	2.97	1.43	1.09	1.48

Tableau 3.11 : Influence de débit de donnée sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux pour un environnement très clair.

Débit (Gbit/s)	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
Facteur (Q)	5.75	5.67	5.97	5.90	5.93	5.92	5.93	5.94
Distance	100.03	96.55	93.10	91.37	89.82	88.79	87.75	86.72
TEB ( $\times 10^{-9}$ )	4.28	6.99	1.12	1.80	1.46	1.54	1.46	1.39

Tableau 3.12 : Influence de débit de donnée sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux pour un environnement clair.

Débit (Gbit/s)	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
Facteur (Q)	5.96	5.93	5.76	5.92	5.79	5.99	5.88	5.77
Distance	52.75	50.68	49.65	48.62	48.10	47.41	47.06	46.72
TEB ( $\times 10^{-9}$ )	1.24	1.45	4.07	1.51	3.45	1.02	1.96	3.75

Tableau 3.13 : Influence de débit de donnée sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux pour un environnement légère pluie et brouillard.

Débit (Gbit/s)	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
Facteur(Q)	5.73	5.72	5.75	5.73	5.89	5.83	5.79	5.75
Distance	16.55	16.03	15.72	15.51	15.31	15.20	15.10	15
TEB ( $\times 10^{-9}$ )	4.88	5.06	4.24	4.87	1.91	2.69	3.42	4.42

Tableau 3.14 : Influence de débit de donnée sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux pour un environnement fort pluie et brouillard

D'après les résultats présentés précédemment, nous avons analysé l'influence de débit de donnée sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux via un diagramme de l'œil. Comme illustré sur la figure (3.17), pour un débit de données de 2.5 Gbits/s et une distance de 243.79 km nous remarquons que le diagramme de l'œil est fermé pour l'environnement très clair. Pour la même valeur de débit de données, une distance de 16.55 km et un environnement fort pluie et brouillard, nous remarquons que le diagramme de l'œil est fermé aussi. Ce qui montre que le débit binaire n'a aucune influence sur le facteur de qualité et donc sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux dans tous les conditions atmosphériques.

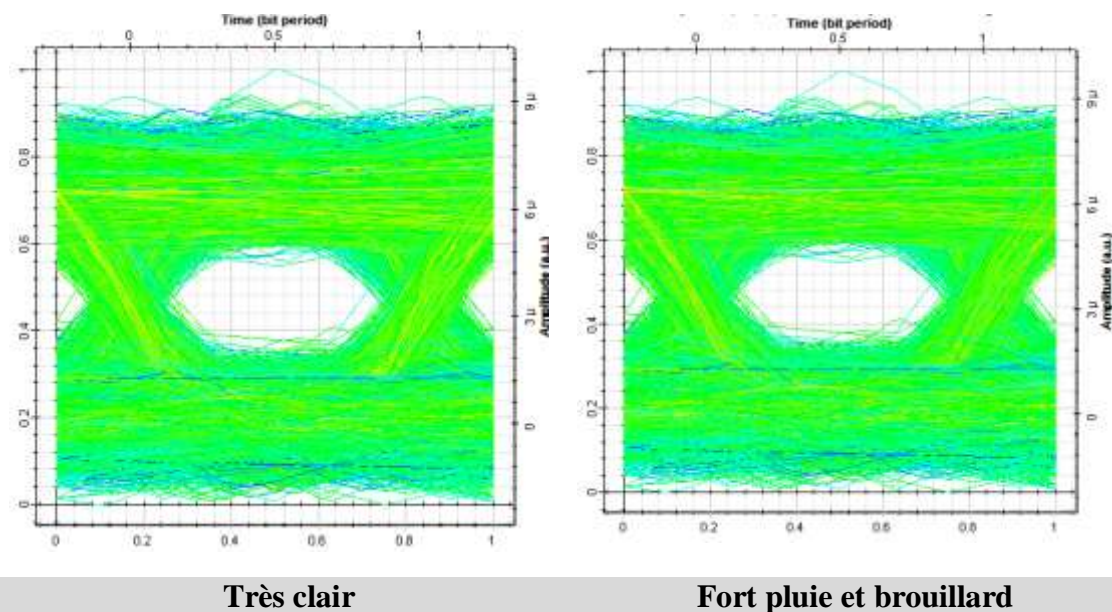


Figure 3.17 : Diagramme de l'œil du système CWDM/FSO pour un débit de données de 2.5 Gbits/s et sous l'effet de deux conditions météorologiques.

### 3.6.5. Influence du format de modulation

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet du format de modulation au niveau de l'émetteur optique sur les performances du système CWDM/FSO multifaisceaux. De ce fait, nous prenons une distance des canaux FSO variée de 10 à 50 km pour deux types du format de modulation (NRZ et RZ). L'atténuation du canal FSO est variée en fonction de chaque condition météorologique, la puissance optique d'émission est de 60 dbm et le débit binaire est fixé à 10 Gbits/s.



Selon les résultats présentés dans les tableaux (3.15) et (3.16) pour les deux types du format de modulation (NRZ et RZ), nous remarquons que le système CWDM/FSO multifaisceaux utilisant le format de modulation RZ est plus efficace que celle utilisant le format de modulation NRZ. À titre d'exemple, lorsque le format de modulation RZ est utilisé, le facteur de qualité obtenu pour le système CWDM/FSO multifaisceaux est plus élevé que celui utilisant le format de modulation NRZ. Ainsi, l'œil du système est mieux ouvert pour le format RZ (voir la figure 3.18). Par conséquent, nous concluons que le format de modulation RZ montre une meilleure performance par rapport au format de modulation numérique NRZ. Ce format de modulation reste plus efficace pour le système CWDM/FSO multifaisceaux.

Distance		10	20	30	40	50
Facteur Q	Très clair	1288.51	1284.5	1271.18	1243.34	1196.22
	Clair	1288.23	1275.17	1211.61	1039.12	755.325
	Légère pluie et brouillard	1286.61	1200.58	723.41	219.92	44.87
	Fort pluie et brouillard	890.54	2.90	0	0	0

Tableau 3.15 : Performances du système CWDM/FSO multifaisceaux utilisant le format de modulation RZ.

Distance		10	20	30	40	50
Facteur Q	Très clair	269.97	269.61	269.06	268.25	267.09
	Clair	269.91	269.20	267.46	263.24	253.02
	Légère pluie et brouillard	269.75	267.19	251.31	161.64	42.98
	Fort pluie et brouillard					

Tableau 3.16 : Performances du système CWDM/FSO multifaisceaux utilisant le format de modulation NRZ.



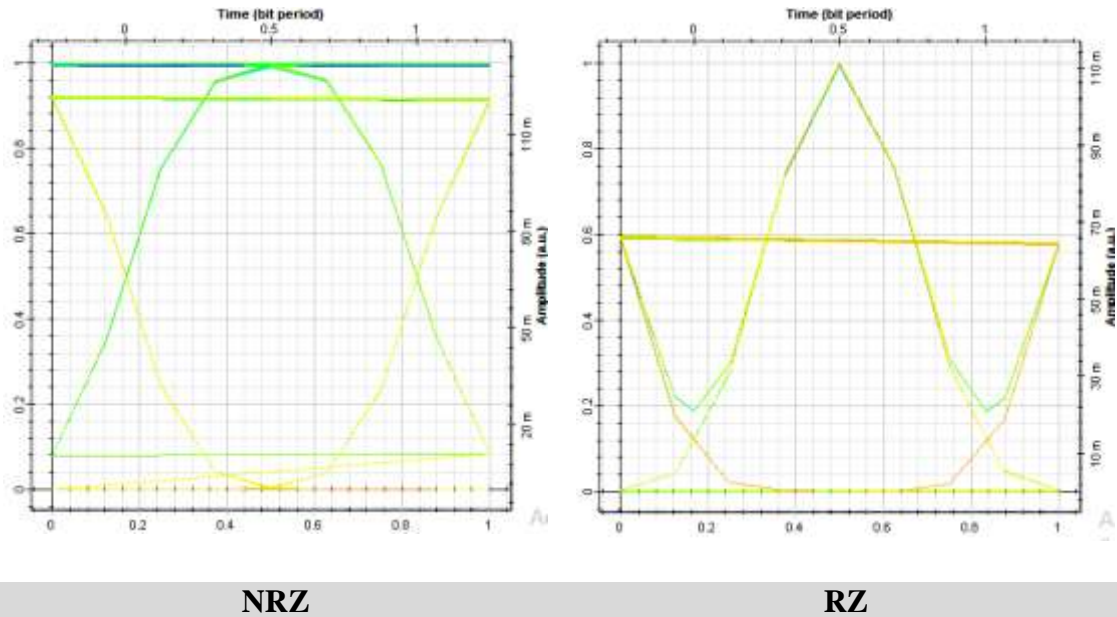


Figure 3.18: Diagramme de l'œil du système CWDM/FSO utilisant deux formats de modulation NRZ et RZ.

### 3.7. Etude comparatif entre les systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux

Le tableau (3.17) présente les valeurs optimales de la puissance optique d'émission, la portée de la liaison FSO et le débit de transmissions obtenues pour les deux types de systèmes multifaisceaux proposés dans ce travail (systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO). Ces valeurs sont choisies pour un facteur de qualité de 6 ( $TEB = 10^{-9}$ ), et pour l'environnement fort pluie et brouillard.

Nous remarquons que les deux systèmes ont les mêmes paramètres optimaux. Ce qui montre que la technique de multiplexage WDM n'a aucune influence sur les performances des systèmes FSO multifaisceaux. Par conséquent, les deux techniques de multiplexage en longueur d'onde WDM permet d'obtenir des meilleures performances.

	Système WDM/FSO Multifaisceaux	Système CWDM/FSO Multifaisceaux
Puissance optique d'émission	<b>68.75 dBm</b>	<b>68.75 dBm</b>
Portée de la liaison FSO	<b>21.6 km</b>	<b>21.63 km</b>
Débit de transmission	<b>20 Gbit/s</b>	<b>20 Gbit/s</b>
Format de modulation	<b>RZ</b>	<b>RZ</b>

Tableau 3.17 : Les valeurs optimales des paramètres pour les systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux.

### 3.8. Conclusion

Les techniques du multiplexage WDM et CWDM sont des solutions prometteuses pour augmenter la capacité de transmission de données dans les systèmes de télécommunication optiques WDM/FSO. Dans ce chapitre, l'évaluation des performances des systèmes WDM/FSO proposés est jugée par des critères de qualité comme le facteur de qualité et le diagramme de l'œil qui nous a permis de suivre la qualité de transmission et déterminer toute dégradation pouvant l'affecter. Les résultats obtenus montrent que les performances des systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux sont limitées sous l'effet des conditions météorologiques et cela en termes de la puissance optique d'émission, la portée de la liaison FSO, le débit de transmission, le type du format de modulation (NRZ et RZ) et le nombre de canaux FSO. Ce chapitre nous a permis donc de conclure que les conditions météorologiques constituent un obstacle majeur dans un système de télécommunication optique WDM/FSO car ils limitent son distance de transmission. L'étude comparative entre les performances des deux systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux a révélé aussi que les techniques du multiplexage par répartition en longueur d'onde n'influent pas sur les performances du système WDM/FSO multifaisceaux.

# Conclusion générale

La technologie WDM est une révolution dans les réseaux optiques. Elle est capable d'augmenter la capacité du système de transmission optique via l'augmentation du nombre de canaux. Ainsi, cette technologie peut augmenter la capacité de transmission des systèmes optiques FSO. En examinant les performances d'un système de télécommunication optique WDM/FSO multifaisceaux, il est important de prendre en compte plusieurs paramètres de canal de propagation en espace libre. Ces paramètres peuvent être divisés en deux parties : les paramètres internes et externes. Les paramètres internes incluent le nombre de canaux de transmission FSO, la puissance optique d'émission, la portée de la liaison FSO, le débit de donnée et le type du format de modulation. Par contre, les paramètres externes sont liés au milieu de propagation (conditions météorologiques). L'objectif de ce travail est l'étude et analyse des performances d'un système de transmission optique WDM/FSO multifaisceaux. L'étude de performance du système FSO conçue a été effectuée en utilisant deux techniques de multiplexage WDM et CWDM avec différents paramètres.

Les résultats des simulations du système WDM/FSO multifaisceaux utilisant la technique WDM à 32 canaux et CWDM à 16 canaux sous l'effet des conditions météorologiques sont obtenus à l'aide du logiciel OptiSystem. Les performances des systèmes (WDM/FSO et CWDM/FSO) multifaisceaux proposés dans ce mémoire sont analysées, en prenant le facteur de qualité et le diagramme de l'œil comme critères de qualité. Le nombre de canaux FSO pour chaque cas de l'environnement n'a aucune influence sur les performances des systèmes multifaisceaux proposé. Par contre, la puissance optique d'émission influe considérablement sur les performances des systèmes WDM/FSO multifaisceaux proposé et la portée de la liaison FSO peut dégrader les performances de ces systèmes. D'autre part, le débit de donnée n'influe pas sur les performances des systèmes WDM/FSO proposé mais plutôt sur la distance entre l'émetteur et le récepteur. L'utilisation du format de modulation (NRZ et RZ) dans l'émetteur optique est

importante pour les systèmes proposés. Le format de modulation RZ donne des meilleures performances par rapport au format de modulation NRZ.

Les résultats obtenus pour le système WDM/FSO multifaisceaux sont similaires avec celles obtenus pour le système CWDM/FSO multifaisceaux, Ce qui montre que la technique de multiplexage WDM n'a aucune influence sur les performances des systèmes FSO multifaisceaux. Par conséquent, les deux techniques de multiplexage en longueur d'onde WDM permet d'obtenir des meilleures performances. Le travail de ce mémoire montre donc clairement les potentiels ainsi que les limites du système WDM/FSO sous l'influence de différentes conditions météorologiques.

## Références bibliographiques

- [1] Rouissat Mehdi, « Etude et Modulation d'une liaison Optique Sans Fil », thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2012-2013.
- [2] Yassine Harichane, Ilyas Benkraouda, « Étude et évaluation des performances d'un système de communication sans fil optique en espace libre (FSO) », mémoire de master, Chlef, Juillet 2019.
- [3] Mellouk Abdellatif et Ziani Oualid Farid, « Analyse des performances d'un système de communication optique en utilisant différents canaux : FSO, OWC et SMF », Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen, 2017.
- [4] Mesri Lamia, « Etude et analyse des performances du système FSOSAC-OCDMA sous l'effet de mauvaises conditions météorologiques », thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi- Bel-Abbes, 2019.
- [5] Vincent Foucal, « Conception d'interconnexions optiques haut débit courte distance en espace libre ». Prototypage de modules de communication pour applications embarquées. Thèse de doctorat, à Strasbourg, 2010.
- [6] UIT-R F.2106, « Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre », Rapport, 2007.
- [7] Y. Cojan et J. C. Fontanella, « Propagation du rayonnement dans l'atmosphère », Techniques de l'ingénieur, Traité Electronique, Paris, Dec.1995.
- [8] Octave Ringar, « Utilisation des techniques avancées d'Emission/Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande », Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop (Dakar), Français, 2015.
- [9] Arun.K. Majumdar, « Free-space laser communication performance in the atmospheric channel », Journal of Optical and Fiber Communications Research, Science Business Media LLC, pp. 61, Springer, 2008.

- [10] 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.
- [11] Ammar Belgacem et Harizi Abdelaziz, « Analyse des performances d'une communication optique en espace libre », mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2015/2016.
- [12] Boudaoud Radhwane, « Contribution à l'étude des performances et limitations d'une liaison CDMA optique haut débit », mémoire de magister, université Abou Bakr Belkaid -Telemcen, 2010.
- [13] Benarbia khalida, « Etude des performances d'un système de communication optique dans l'espace libre (FSO) en utilisant la technologie DWDM », mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2017.
- [14] Arribi Meriem et Elmahi Aicha, « La technique WDM en télécoms optiques avancées », mémoire de Master, université Mustapha Stambouli de Mascara, 23 juin 2016.
- [15] Khalil Merzouk, « étude d'un système bas cout de transmission optique par multiplexage temporel », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble- INPG, 08 Avril 2008.
- [16] Pierre Ferdinand, « Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg-Analyse, multiplexage et application », Techniques de l'ingénieur ,10 octobre 2018.

## Résumé

La transmission optique en espace libre (FSO) est une technologie récente qui nécessite une visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur pour transmettre des données sans erreurs. Les performances des liaisons FSO sont dégradées par l'atténuation atmosphérique due aux différentes conditions météorologiques. L'objectif de projet de fin d'étude de master est d'étudier et analyser des performances des systèmes de télécommunications WDM/FSO multifaisceaux sous l'influence des différentes conditions météorologiques. Dans le but d'effectuer une simulation réelle, une modélisation du système WDM/FSO a été faite sous le logiciel OptiSystem en tenant compte des différentes pertes dues au canal FSO et d'insertion des composants constituant le système de transmission. Les performances des systèmes WDM/FSO multifaisceaux proposées, tels que le facteur de qualité (facteur Q) et le diagramme de l'œil sont analysés en fonction de la distance de liaison optique FSO, le débit binaire de transmission, la puissance optique d'émission et le type du format de modulation employé. Les résultats obtenus montrent que la neige et la pluie ont un impact important sur les performances du système WDM/FSO, contrairement au brouillard qui altère les faisceaux lumineux grâce aux très fines gouttelettes qui le constituent. Le système WDM/FSO présente des mêmes performances pour les deux types de techniques de multiplexages WDM et CWDM.

**Mots clés : FSO, WDM, CWDM, TEB, facteur de qualité, OptiSystem, brouillard, pluie, neige, scintillation.**

## **Abstract**

Optical Free Space (FSO) is a recent technology that requires line-of-sight between transmitter and receiver to transmit error-free data. The performance of FSO links is degraded by atmospheric attenuation due to different meteorological conditions. The main objective of the master graduation project is to study and analyze the performance of multibeam WDM/FSO telecommunication system under the influence of different weather conditions. In order to perform a real simulation, a modeling of the WDM/FSO system was made using OptiSystem software, taking into account the various losses due to the FSO channel and the insertion of the components constituting the transmission system. The performance of the proposed multibeam WDM/FSO telecommunication system, such as quality factor (Q factor) and eye diagram are analyzed based on FSO optical link distance, bit rate, transmitted optical power and the type of modulation format. The obtained results show that snow and rain have a significant impact on the performance of the WDM/FSO system, unlike fog which alters the light beams thanks to the very fine droplets that constitute it. The WDM/FSO system has the same performance for both types of WDM and CWDM multiplexing techniques.

**Keywords:** FSO, WDM, CWDM, BER, quality factor, OptiSystem, fog, rain, snow, scintillation.