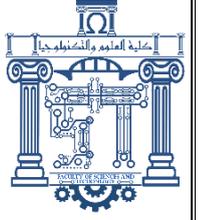




الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية
الشعبية



Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي
التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie électrique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par :

BAKKOUCHE Youcef
HOURIA Mohamed Seghir

Évaluation des performances d'une liaison hybride DWDM FSO

Présenté et soutenu publiquement, le 11/06/2022 devant le jury composé de :

Mme. Bouchemha Amel

MCB

Président

Mr. Ferroudji Karim

MCA

Examineur

Mme. Djellab Hanane

MCA

Encadreur

Promotion : 2021/2022

Dédicace

Nous dédions ce travail à :

À toute la famille

À tous nos amis

À toute personne qu'on aime et qui nous aime
ET bien sûr nos chers parents qui n'ont jamais cessé de nous
donner l'amour nécessaire pour être-ce-que nous sommes
aujourd'hui

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nous tenons à remercier tout particulièrement notre encadrante **Mme. DJELLAB HANANE**, pour l'aide précieuse qu'elle nous a apportée, pour sa patience et son encouragement.

Nous remercions aussi tous ceux qui sont contribué à ce travail de près ou de loin. Nous ne serons finalisés ce travail sans remercier nos familles qui nous ont aidé et supporté durant ces années, l'ensemble des nos collègues et nos amis un grand merci à vous tous.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Table des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Introduction générale	1
1 Le multiplexage WDM	3
1.1 Introduction	4
1.2 Les techniques de multiplexage	4
1.2.1 Le multiplexage temporel (TDM)	4
1.2.2 Le multiplexage par répartition de code (CDM)	5
1.2.3 Le multiplexage fréquentiel (FDM)	6
1.3 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM)	7
1.3.1 Principe et fonctionnement	7
1.3.2 Description	8
1.3.3 Les différents types de multiplexage WDM	8
1.3.3.1 DWDM	8
1.3.3.2 CWDM	8
1.3.3.3 U-DWDM	8
1.4 Conclusion	9
2 La liaison optique en espace libre	10
2.1 Introduction	11

2.2	L'émetteur	11
2.2.1	Codage de la ligne de transmission	11
2.2.1.1	RZ (Return to Zero)	11
2.2.1.2	NRZ (Non Return to Zero)	12
2.2.1.3	Manchester	12
2.2.2	Les sources optiques	13
2.2.2.1	Les diodes électroluminescentes (LED)	13
2.2.2.2	Les diodes lasers (DL)	13
2.2.3	Modulateur	13
2.2.3.1	Modulateur directe	13
2.2.3.2	Modulateur externe	14
2.2.3.3	Le modulateur Mach-Zehnder	15
2.2.4	Amplificateur EDFA (Les amplificateurs à fibre dopée à l'Erbium)	16
2.3	Le récepteur	17
2.3.1	Photodétecteur	17
2.3.1.1	Les photodiodes PIN	17
2.3.1.2	Photodiode APD (Avalanche Photo Diode)	19
2.4	Liaisons optiques en espace libre	19
2.4.1	Système de communication en espace libre	20
2.4.2	Principe de fonctionnement des Liaisons optiques en espace libre	20
2.4.2.1	Généralités	20
2.4.2.2	Principe de fonctionnement	21
2.4.2.3	Schéma de bloc	22
2.4.2.4	Avantages et inconvénients	23
2.4.3	La technologie des systèmes de communication en espace libre et ses applications	23
2.4.3.1	Applications	24
2.4.3.2	La technologie utilisée	24
2.4.3.3	Composants et paramètres d'un système de communication optique en espace libre	25
2.4.4	Effets des turbulences atmosphériques sur les liaisons optiques	27
2.4.4.1	Atténuation géométrique	27

2.4.4.2	Effet du brouillard	28
2.4.4.3	Effet de la pluie	29
2.4.4.4	Effet de la neige	29
2.5	Conclusion	30
3	Étude des performances du liaison hybride	31
3.1	Introduction	32
3.2	Critères du qualité de transmission	32
3.2.1	Taux d'erreur binaire	32
3.2.2	Facteur de qualité Q (Q Factor)	32
3.2.3	Diagramme d'oeil	33
3.3	Conception de la liaison	34
3.3.1	Liaison FSO simple	34
3.3.1.1	L'émetteur	34
3.3.1.2	Le récepteur	35
3.3.1.3	Canal de transmission FSO	35
3.3.2	Description du système DWDM FSO	35
3.4	Résultats de la simulation	37
3.4.1	Débit	38
3.4.2	L'espacement	40
3.4.3	Type de Modulation (NRZ ou RZ)	42
3.4.4	Puissance de la source optique	44
3.4.5	Atténuation de FSO (conditions climatologiques)	46
3.4.5.1	SISO FSO	46
3.4.5.2	MIMO FSO	47
3.5	Conclusion	51
	Conclusion générale et perspectives	52
	Bibliographie	54

Table des figures

1.1	Le Multiplexage temporel des données de 4 utilisateurs.	5
1.2	Schéma de multiplexage par répartition de code des données de 2 utilisateurs.	5
1.3	Diagramme de le FDM	6
1.4	Diagramme de multiplexage WDM.	7
2.1	Codage RZ avec : V^+ jusqu'à le 0 pour le 1 binaire et V^- pour le 0 binaire. [1]	11
2.2	Codage NRZ.	12
2.3	Codage Manchester.	12
2.4	Schéma synoptique de la modulation directe.	14
2.5	Schéma synoptique de la modulation externe.	14
2.6	Le raccordement d'un modulateur Mach-Zehnder dans logiciel "Optisystem".	15
2.7	Interféromètre de Mach-Zehnder. [2]	16
2.8	Amplificateur dopé a l'erbium. [3]	16
2.9	Photodiode PIN. [3]	18
2.10	Photodiode APD. [3]	19
2.11	Le spectre optique.	20
2.12	Une liaison FSO .[4]	20
2.13	Système de communication FSO en visibilité directe	21
2.14	Exemple de terminal de transmission optique en espace libre. [4]	21
2.15	Schéma Bloc du bloc émetteur FSO.	22
2.16	Schéma bloc de récepteur FSO.	22
2.17	Précautions pour l'installation d'un système optique en espace libre.[4]	27

3.1	Diagramme de l’oeil.	33
3.2	Diagramme d’oeil à partir d’optisystem.	33
3.3	Une liaison FSO simple.	34
3.4	Configuration de la source optique.	34
3.5	Configuration canal de transmission FSO.	35
3.6	Système hybride DWDM-FSO.	36
3.7	Paramètres du support FSO.	37
3.8	Le spectre de DWDM pour 90 utilisateurs.	37
3.9	BER en fonction de débit.	39
3.10	Facteur Q en fonction de débit.	39
3.11	BER en fonction de la distance pour chaque espacement.	40
3.12	Facteur Q en fonction de la distance pour chaque espacement.	41
3.13	Diagramme de l’oeil pour chaque espacement.	41
3.14	BER en fonction de codage (NRZ et RZ).	42
3.15	Facteur Q en fonction de codage (NRZ et RZ).	43
3.16	Diagramme d’oeil pour chaque type de codage.	43
3.17	La puissance reçue en fonction de la puissance émise.	45
3.18	BER en fonction des Conditions climatologiques.	46
3.19	Facteur Q en fonction des Conditions climatologiques.	47
3.20	MIMO-FSO 2X2.	47
3.21	MIMO-FSO 3X3.	48
3.22	BER en fonction des conditions climatologiques.	48
3.23	Facteur Q en fonction des conditions climatologiques.	49
3.24	Les diagrammes d’oeil du SISO-FSO à 2 Km dans les différents climats.	50
3.25	Les diagrammes d’oeil du MIMO-FSO 2X2 à 2 Km dans les différents climats.	50
3.26	Les diagrammes d’oeil du MIMO-FSO 3X3 à 2 Km dans les différents climats.	51

Liste des tableaux

2.1	Catégorie des lasers.[5]	24
2.2	Type de liaison FSO disponible dans le marché.[5]	25
2.3	Les valeurs à utiliser dans l'équation 2.5. [6]	28
2.4	L'atténuation en fonction de la visibilité à l'aide de la formule de Kim	29
2.5	Valeurs de niveau d'atténuation en fonction de précipitations de pluie.	29
3.1	Paramètres de la simulation.	38
3.2	Paramètres utilisées dans la simulation pour les différents types de codage	42
3.3	Les résultats pratiques.	45
3.4	Les résultats théoriques.	45
3.5	Conditions climatologiques et leurs atténuations.	46

Introduction générale

L'apparition de nouveaux services gourmands en bande passante, les applications multimédia, l'essor de l'internet, la téléphonie mobile de nouvelle génération et la **voix** sur **IP**, la **vidéo**,... exercent continuellement une pression vers davantage de capacités de transmission. La difficulté majeure ne réside plus vraiment dans le support, possédant une large bande passante et de faibles atténuations, mais sur les modules d'émission, et aussi le besoin d'être transmises simultanément, par multiplexage.

Le multiplexage en longueur d'onde **DWDM** consiste à transmettre simultanément de l'information sur plusieurs longueurs d'onde afin d'exploiter au maximum toute la largeur de bande offerte par le support optique. Ceci permet d'augmenter les débits et le taux de partage dans le réseau, mais malheureusement la sensibilité aux défauts de propagation augmente avec le débit, que ce soit pour les effets linéaires ou les effets non linéaires.

Les liaisons optiques sans fil atmosphériques, dénomination française de « Free Space Optic (**FSO**) », est une technologie optique à faibles coûts, simples et faciles à installer sans aucune licence, qui permet la transmission de tous types de données avec un débit comparable à celui de la fibre optique tout ayant la souplesse et les avantages du sans fil, plus la mobilité dans certaines applications.

Le principal inconvénient d'utiliser un tel support de télécommunication est la forte influence que peut jouer l'atmosphère sur la propagation de la lumière et donc sur la disponibilité et la fiabilité du système.

Notre objectif est d'étudier les performances d'une liaison hybride **FSO**, **DWDM** sous le logiciel **Optisystem** dont le but d'avoir un haut débit, une bonne qualité de service pour les différentes nouvelles applications, comme la future génération mobile et Internet d'objet (**IOT**). En fonction de différents paramètres comme la puissance, la distance parcourue, les turbulences climatologiques. On se focalise sur l'influence de nombre d'antenne

MIMO qui nous a permis d'améliorer les performances de système. L'évaluation été faite par le facteur de qualité (**Q**) et le taux d'erreur binaire (**BER**), ainsi que le diagramme d'œil.

Ce mémoire est structuré sur trois chapitres :

Le premier chapitre décrit les différentes techniques de multiplexage et leurs fonctionnement. On se focalisant sur la technique **DWDM**.

Un second chapitre met en exergue une description générale sur la transmission optique en espace libre, leurs avantages et inconvénients. Ainsi qu'une explication détaillée sur les différents composants qui compose l'émetteur, et le récepteur de cette liaison. Comme nous avons illustré les effets des turbulences atmosphériques telles que la neige, la pluie et le brouillard, tout en donnant leurs modèles mathématiques théoriques.

Le troisième chapitre est consacré aux simulations et évaluations des performances de liaisons **FSO DWDM** en termes de taux d'erreur binaire (**TEB**), facteur de qualité (**Q**), et diagramme d'œil. Ceci en fonction des paramètres tels que l'espacement entre canaux des filtres de multiplexeurs/démultiplexeurs, nombre d'antenne **MIMO**, de la puissance émise, de la distance parcourue et des turbulences atmosphériques. . .

Enfin, nous finalisons notre mémoire par une conclusion générale où nous résumons le travail proposé.

Chapitre 1

Le multiplexage WDM

1.1 Introduction

À la fin des années 90, la demande de bande passante augmentait pour les entreprises et les opérateurs réseaux, et cela à cause de l'augmentation rapide des nouveaux usages d'internet (e-commerce, multimédia...). Cette évolution des usages doit avoir une évolution dans la transmission des données pour faire l'équilibre entre les gros volumes de trafic et la technologie de transmission. En effet les réseaux de transport de données ont évolué pour finalement obtenir le **WDM**.

Le **WDM** (en français : **multiplexage en longueur d'onde**, en anglais : **Wavelength Division Multiplexing**) est une technique de multiplexage utilisée en communication optique qui permet d'augmenter le débit des données, en envoyant plusieurs longueurs d'onde sur une seule fibre. Dans le côté d'émetteur on a un multiplexeur (**MUX**) et dans le côté de récepteur on a un démultiplexeur (**DEMUX**).

1.2 Les techniques de multiplexage

1.2.1 Le multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage temporel (en anglais : **TDM**; Time Division Multiplexing, en français : **MRT**; Multiplexage à répartition temporelle), est une technique de multiplexage utilisée pour transmettre des signaux de plusieurs utilisateurs sur le même canal à base de temps, elle consiste à allouer à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant, chaque utilisateur a un intervalle de temps fixe, ceci est pour tous les utilisateurs, l'axe de temps est divisé en intervalles fixes et égales nommées les '**Time Slots**'. Les utilisateurs utilisent le Time Slot pour transmettre leurs données. Le multiplexage **TDM** permet de regrouper plusieurs canaux de transmission à bas débits pour les envoyer sur un canal à une bande passante plus élevée (par exemple, on a un débit total de **1 Gbits/s** dans un canal, à partir de **8** utilisateurs à **125 Mbits/s** pour chacun).

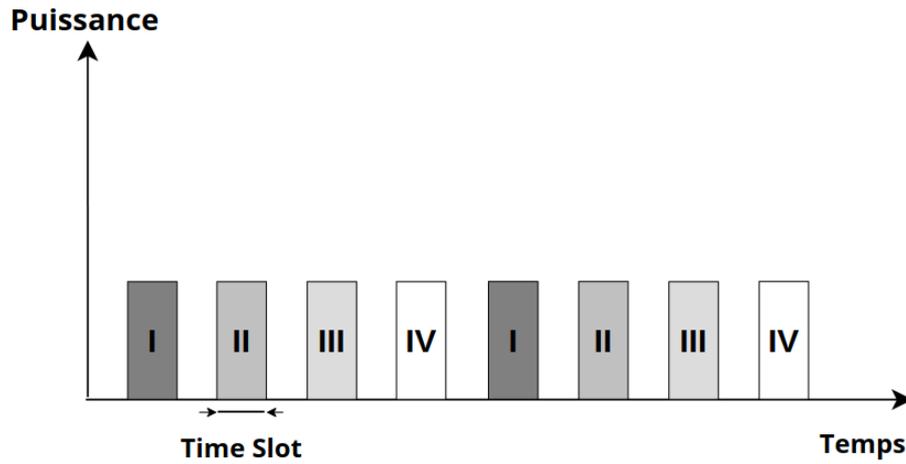


Figure. 1.1 – Le Multiplexage temporel des données de 4 utilisateurs.

1.2.2 Le multiplexage par répartition de code (CDM)

Le multiplexage par répartition de code est une technique de multiplexage à base des codes; consiste à faire correspondre à chaque utilisateur un code appelé 'la signature'. La séquence des données de chaque utilisateur multipliée par une séquence de code.

Cette technique permet d'étaler spectralement le signal transmis sur une bande N fois plus large que celle du signal initial, N étant la longueur de la séquence de code. Cependant, tous les utilisateurs exploitent la même bande spectrale, mais leurs données transmises se distinguent par le code propre à chaque utilisateur, ce qui permet d'éviter les interférences d'accès multiples, à condition que les codes utilisés soient orthogonaux. [7]

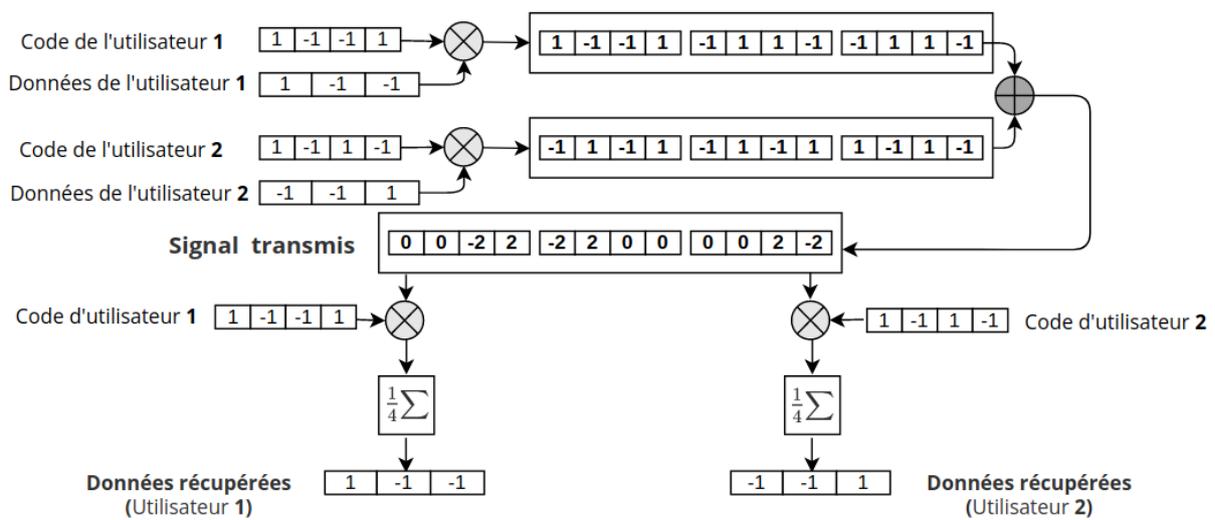


Figure. 1.2 – Schéma de multiplexage par répartition de code des données de 2 utilisateurs.

1.2.3 Le multiplexage fréquentiel (FDM)

Le multiplexage fréquentiel (en anglais: **FDM**; Frequency Division Multiplexing , en français: **MRF** ; , Multiplexage par répartition en fréquences) est une technique de multiplexage basée sur le partage d'une bande fréquentielles; consiste à former un signal composé par translation fréquentielle de certains signaux.

Les utilisateurs se partagent le canal en fréquence sur un même "Support Physique", chaque canal étant associé à une bande de fréquence et une porteuse . L'utilisateur alloue le canal de fréquence peut toujours émettre en continu, mais seulement dans le canal de fréquence qu'il a alloué. A la réception, on utilise un filtre passe-bande pour récupérer le signal correspondant à un unique utilisateur et en évitant les interférences avec les signaux présents.

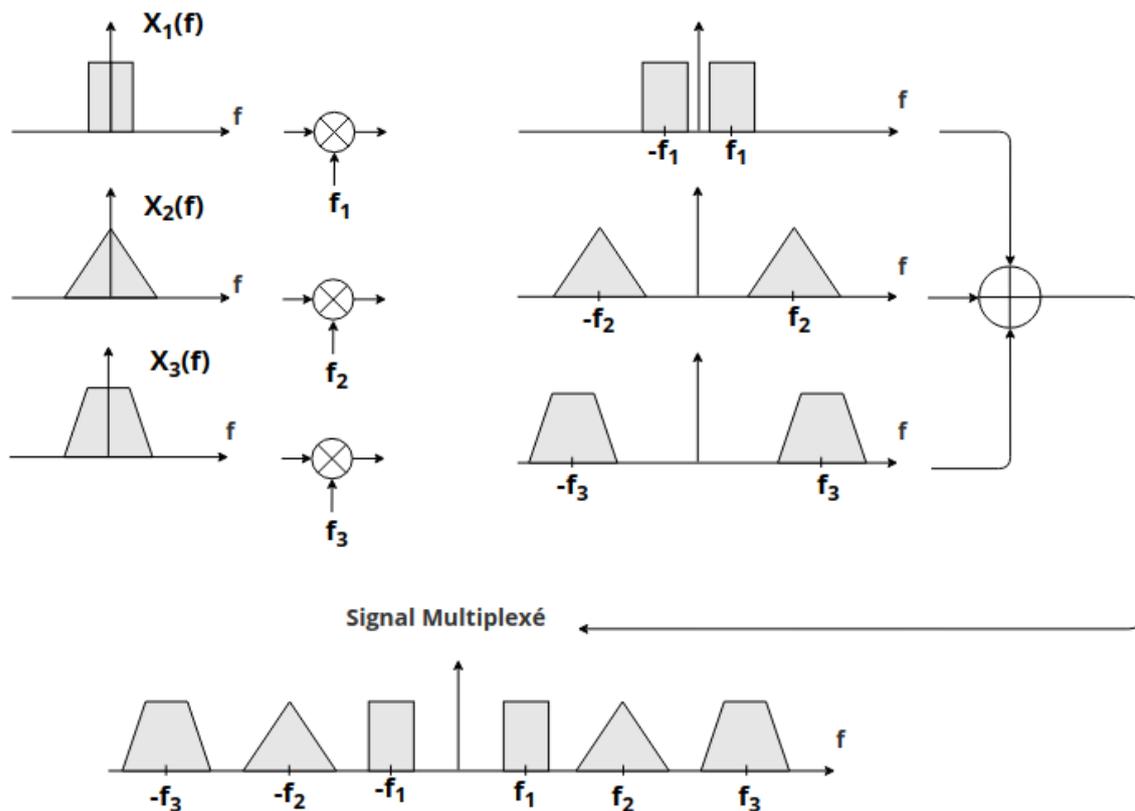


Figure. 1.3 – Diagramme de le FDM .

1.3 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM)

1.3.1 Principe et fonctionnement

Le **WDM** augmente la capacité du support de transmission (fibre optique ou espace libre) .La **WDM** attribue des fréquences de lumière spécifiques (longueurs d'onde) pour les signaux optiques entrants . Ce multiplexage ressemble beaucoup à les stations de de diffusion radio qui diffusent sur différentes fréquences sans interférer les unes avec les autres, parce que chaque canal a une fréquence différente. D'une autre façon de penser, lorsque chaque canal a une couleur de lumière différente dans le **WDM**; les plusieurs couleurs des canaux forment un "Arc-en-ciel".

Dans un système **WDM**, chacune des longueurs d'onde multiplexées sont émis dans la liaison optique et les signaux sont démultiplexés à la réception. Comme le **TDM**, la capacité résultante est un agrégat des signaux d'entrée, mais le **WDM** transporte chaque signal d'entrée d'une façon indépendante à les autres.

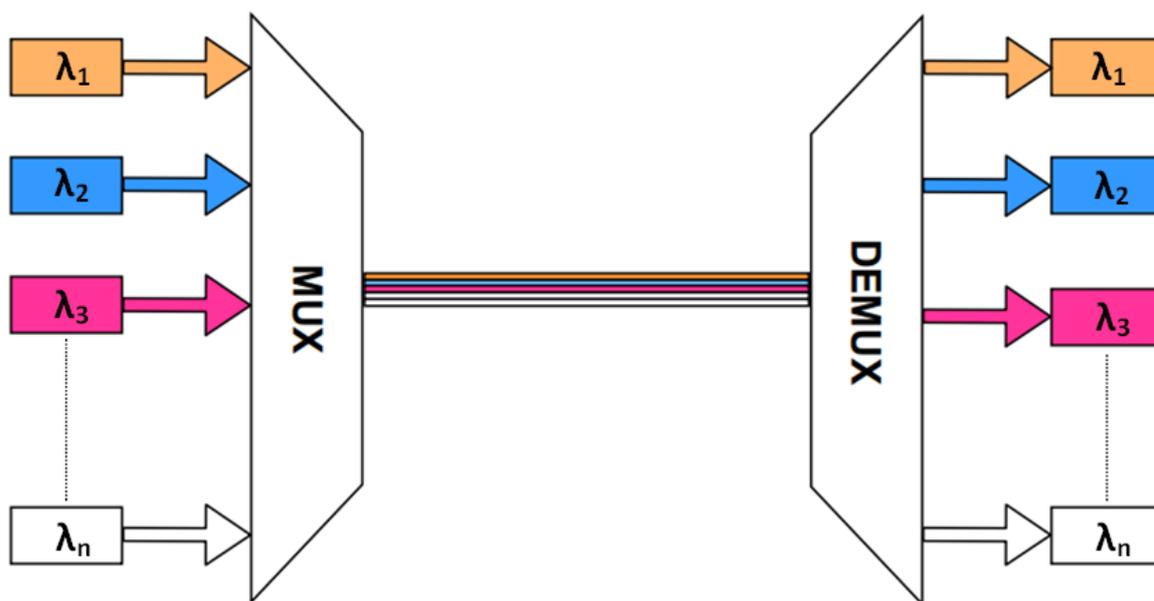


Figure. 1.4 – Diagramme de multiplexage WDM.

1.3.2 Description

Le multiplexage **WDM** nécessite un multiplexeur et démultiplexeur optiques pour combiner et séparer l'ensemble des signaux optiques dans la liaison, un ensemble de diodes **laser** ou **LED** émettant à des longueurs d'ondes différentes et des photodétecteurs pour récupérer les signaux émis.

L'espacement minimum entre les longueurs d'onde des signaux envoyés est important, et pour cela ce dernier là dépend à plusieurs critères :

- La qualité de la fibre ou les conditions météorologiques dans l'espace libre.
- La qualité des équipements (**MUX**, **DEMUX**, Photodétecteurs, Laser).
- Le débit des données.
- La longueur de la liaison.

Le débit transporté en **WDM** égal à : **le nombre des utilisateurs** multiplié par le **débit de chaque utilisateur** ($D_{total} = N_{utilisateur} \cdot D_{utilisateur}$), ça se présente la capacité totale du système.

1.3.3 Les différents types de multiplexage WDM

1.3.3.1 DWDM

La technologie **DWDM** (Dense Wavelength Division Multiplexing) utilise des espacements égale ou inférieur à **100 GHz**. Elle utilise aussi des espacements **0.4 nm** et **0.2 nm** (**50** et **25 GHz**), et permet de contenir respectivement **80** et **160** canaux.

1.3.3.2 CWDM

Dans le système **CWDM**, on peut utiliser des lasers ont un coût moindre, émettent des longueurs d'onde avec un espacement de **20 nm** dans la bande **1270-1610 nm**. Peut offre de **8** à **16** canaux.

1.3.3.3 U-DWDM

U-DWDM (Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing) utilise des espacements plus faibles, il se fonctionne dans des systèmes à **10 GHz** (**0.08 nm**) permet de contenir **400** utilisateurs.

1.4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter les techniques de multiplexages utilisés, on se focalisons sur le multiplexage en longueur d'onde qui est utilisé généralement dans la transmission optique, et nous avons également mentionné les différentes types de ce dernier. Dans le chapitre suivant on va voir la présentation de système **FSO** et leurs caractéristiques.

Chapitre 2

La liaison optique en espace libre

2.1 Introduction

La technologie dans nos jours offrent la possibilité de partager et transmettre des données, images, voix, etc... d'un endroit à un autre sur notre planète ou en dehors. Cette grande quantité d'informations véhiculées produisaient un besoin très glouton pour le débit de transmission. Aujourd'hui les liaisons optiques sont les systèmes des télécommunications les plus utilisés pour transmettre les grandes données. Ces liaisons ont en effet de multiples avantages par rapport aux câbles de cuivre ou les faisceaux hertziens : elles sont plus robustes et sont très peu sensibles aux interférences électromagnétiques et permettent de transmettre des informations sur de courtes ou très longues distances avec de très hauts débits et sans licence.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord aborder les parties "Émetteur" et "Récepteur" dans les liaisons optiques et les types de ces liaisons, et après on va décrire la liaison **FSO**.

2.2 L'émetteur

2.2.1 Codage de la ligne de transmission

2.2.1.1 RZ (Return to Zero)

RZ est une méthode de codage de la ligne utilisée dans la télécommunication dans lequel le signal retourne à la valeur zéro après chaque pulse dans une seule période; dans chaque temps de bit il y a un front montant jusqu'à le V^+ , un front descendant jusqu'à le 0 pour le **1** binaire et un 0 ou un V^- pour le **0** binaire.

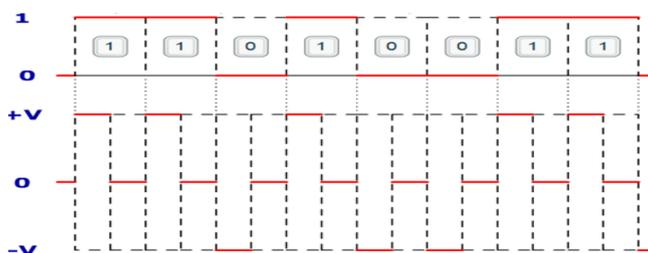


Figure. 2.1 – Codage RZ avec : V^+ jusqu'à le 0 pour le **1** binaire et V^- pour le **0** binaire. [1]

2.2.1.2 NRZ (Non Return to Zero)

NRZ est considéré comme le format de codage le plus simple, il est proche de codage binaire de base. Il améliore légèrement le codage binaire de base en augmentant la différence d'amplitude du signal entre les **0** et les **1**. Il code tous les séries de bits identiques (**0** ou **1**) sans transition pendant chaque temps de bit, ce qui peut produire une perte de synchronisation. Le débit maximum théorique est le double de la fréquence utilisée pour le signal : on transmet deux bits par une période.

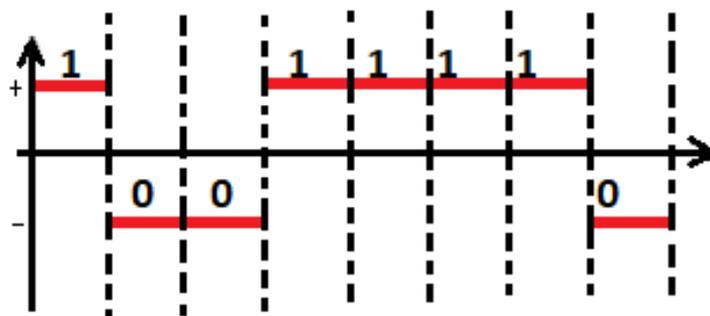


Figure. 2.2 – Codage NRZ.

2.2.1.3 Manchester

Le code Manchester tire son nom de son développeur **l'Université de Manchester**, il introduit une transition au milieu de chaque intervalle de temps de bit (V^+ et V^-); lorsque la donnée est un **0** binaire il sera un front montant de V^- à V^+ et lorsque la donnée est un **1** binaire il sera un front descendant de V^+ à V^- .

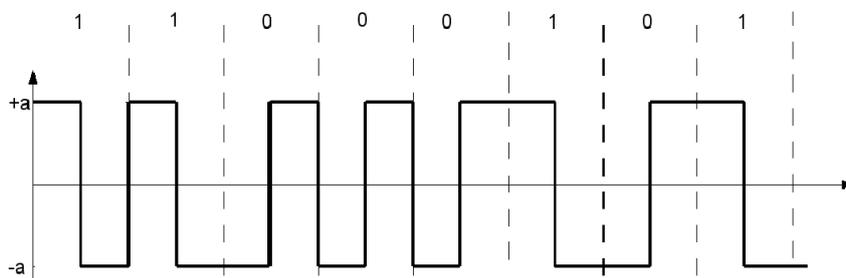


Figure. 2.3 – Codage Manchester.

2.2.2 Les sources optiques

Dans le domaine des communications optiques, il y a deux types de sources lumineuses utilisées : les diodes lasers (**DL**) et les diodes électroluminescentes (**LED**).

2.2.2.1 Les diodes électroluminescentes (**LED**)

LED est l'acronyme de **Light Emitting Diode** (en français : Diode Electro-luminescente), sont des diodes lorsqu'elles sont soumises à un courant électrique émis une lumière, peut produire un rayonnement monochromatique ou polychromatique, utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas des larges bandes passantes, elle offrent un débit bas.

2.2.2.2 Les diodes lasers (**DL**)

Laser (**Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**) , sont basées sur la transmission stimulée, elles sont les mieux adaptées pour les télécommunications optiques car elles produisent une puissance optique beaucoup plus importante que les **LED** ainsi qu'elles permettent d'avoir une meilleure efficacité de couplage optique avec la fibre. Les diodes laser sont des sources cohérentes et monochromatiques, elles sont utilisées dans les systèmes de transmission à très grande distance, et elles sont caractérisées par une faible largeur spectrale comme le montre la figure suivante.[2]

2.2.3 Modulateur

2.2.3.1 Modulateur directe

L'utilisation des lasers à semi-conducteurs pour les systèmes de télécommunications des liaisons optiques nous donne un avantage de facilité de modulation; la modulation du courant qui le traverse module directement l'intensité de la lumière émise. On appelle cette technique une "modulation directe".

Ainsi, il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser. Cette solution de modulation directe requiert assez peu de composants. En dehors de la source optique, le laser, seuls un générateur de courant et un driver sont nécessaires (**Figure 2.4**). Le premier va émettre à un débit donné une séquence de données, expression de l'information à

transmettre. Le rôle du driver est de commander la source optique au niveau des puissances émises en fixant les valeurs du courant d'alimentation. [2]

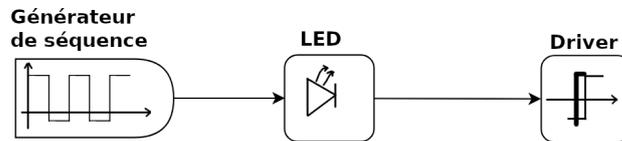


Figure. 2.4 – Schéma synoptique de la modulation directe.

2.2.3.2 Modulateur externe

Le principe d'une modulation externe est d'écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle module le signal de sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser (figure 2.5). La modulation est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable : le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe $v(t)$, modulée et représentative de l'information à transmettre. Cette tension appliquée au modulateur a pour effet de modifier le facteur de transmission en intensité en sortie. En traversant le modulateur, le signal optique continu émis par le laser, subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon $v(t)$. Un driver est souvent présent entre les données et le modulateur afin de fixer les niveaux de $v(t)$ et choisir les modifications du facteur de transmission. Plusieurs types de modulateurs sont disponibles, on cite en particulier un type de modulateur d'amplitude utilisé dans les systèmes de transmission à haut débit : le modulateur "Mach-Zehnder". [2]

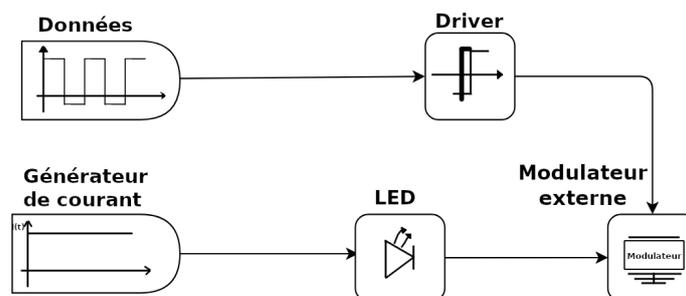


Figure. 2.5 – Schéma synoptique de la modulation externe.

2.2.3.3 Le modulateur Mach-Zehnder

Pour effectuer une transmission des débit élevés une utilise la modulation externe et pour cela on a besoin de modulateur **Mach-Zehnder**. On le considère comme un modulateur électro-optiques car il fait la modulation d'un signal électrique avec un signal porteuse optique (**Figure 2.6**). Ces modulateur basés sur les effets électro-optiques; l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique. On l'utilise pour les applications de télécommunication large bande.

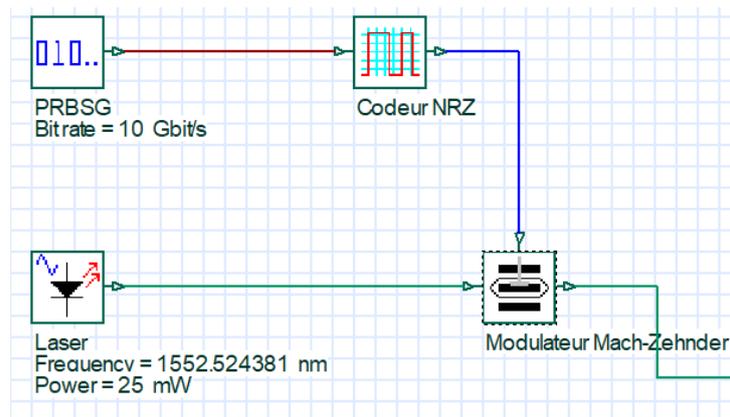


Figure. 2.6 – Le raccordement d'un modulateur Mach-Zehnder dans logiciel "Optisystem".

Les effets électro-optiques linéaires appelés l'**effet Pockels**, c'est à dire que la variation d'indice est proportionnelle au champ appliqué, et **effet Kerr** quand elle est proportionnelle au carré du champ. L'effet Pockels est prépondérant dans certains matériaux et permet des modulations de phase et d'amplitude de la lumière. [3]

Afin d'obtenir des modulateurs d'amplitude indépendants de la polarisation en onde guidée, une solution consiste à travailler en propagation longitudinale. L'onde optique se propageant suivant cet axe voit un indice de réfraction égal à l'indice ordinaire du matériau et quelle que soit sa direction de polarisation dans le plan.

La technique utilisée pour moduler l'amplitude d'un faisceau consiste à lui faire traverser un interféromètre de Mach-Zehnder dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras. [8]

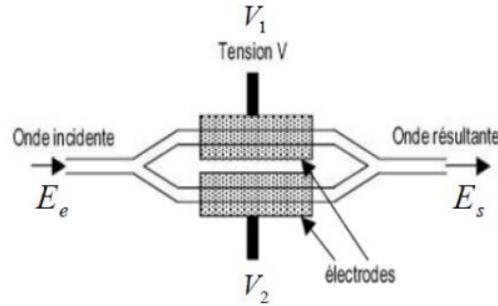


Figure. 2.7 – Interféromètre de Mach-Zehnder. [2]

Avec :

- E_e est le champ électrique du signal optique d’entrée.
- E_s est le champ électrique du signal de sortie.
- V_1 et V_2 sont les tensions de commande des cellules électro-optiques.

2.2.4 Amplificateur EDFA (Les amplificateurs à fibre dopée à l’Erbium)

Dans le domaine de transmission optique l’amplificateur fonctionne directement avec le signal lumineux sans conversion en signal électrique. Un **EDFA** peut être installer chaque **100 km** au long de la ligne de transmission.

Un amplificateur à fibre dopée fonctionne à la manière d’un laser. Une portion de fibre optique est dopée et est pompée optiquement avec un laser afin de placer les ions de dopage dans un état excité. Lorsqu’un signal lumineux passe à travers ce morceau de fibre optique, il désexcite les ions par effet laser en produisant un photon en tout point identique au photon incident. Le signal lumineux a donc été doublé. [8]

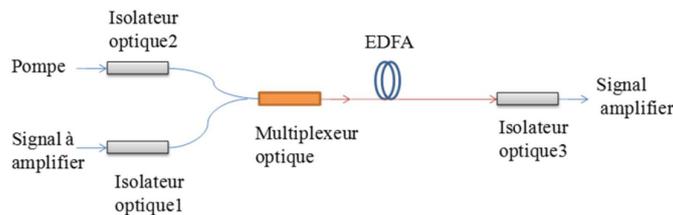


Figure. 2.8 – Amplificateur dopé a l’erbium. [3]

Le signal et la pompe sont multiplexés en longueur d'onde afin de minimiser les pertes. Il est préférable d'ajouter deux isolateurs un à l'entrée et l'autre à la sortie d'un amplificateur dopée à l'erbium, pour que la lumière passe dans un sens afin d'éviter toutes les réflexions qui créent une cavité, osciller le dispositif et le transformer en laser. Pour réduire encore les pertes aux raccordements avec les fibres de ligne, une section de fibres adaptatrices est utilisée, ceci permet d'augmenter la densité de puissance de l'onde pompe, donc le gain et le rendement. On trouve à la sortie un filtre optique, destiné à éliminer les résidus de l'onde pompe et réduire l'émission spontanée amplifiée, ainsi qu'une photodiode permettant de contrôler automatiquement le gain. Un amplificateur **EDFA** permet d'obtenir des gains supérieurs à **28 dB** avec des fortes puissances (**>20 dBm**). [3]

2.3 Le récepteur

2.3.1 Photodétecteur

Un **photodétecteur** converti les photons incidents en électrons provoquent un courant électrique, donc il transforme un signal optique en signal électrique. Les photodétecteurs sont les plus utilisés car ils sont très rapide, ont des dimensions compatibles avec les liaisons optiques et moins coûteux. Ils sont très sensible aux large bande des longueurs d'ondes avec un minimum de bruit.

Un photo-détecteur est caractérisé par :

- Le coefficient d'absorption α : il est mesuré en cm^{-1} . Il dépend du matériau utilisé et caractérise la pénétration de la lumière à l'intérieur du semi-conducteur.
- Le rendement quantique η : Sa valeur est en général inférieure à 1 et augmente avec l'épaisseur de la zone absorbante. Il représente le rapport du nombre de paires de porteurs photo-crées au nombre de photons incidents.

Parmi les photo-détecteurs à semi-conducteurs, on trouve que les photodiodes **PIN** et **APD** sont les plus utilisés.

2.3.1.1 Les photodiodes PIN

Le principal avantage de qualité d'une photodiode **PIN** est que la composante d'entraînement du photocourant domine sur la composante diffusive, parce que la plupart de

la puissance optique incidente est absorbée à l'intérieur de la zone **I** (Figure 2.9). En effet, la zone I est placée entre la zone **P** et la zone **N** d'un semi-conducteur différent dont la bande interdite est choisie afin que les photons incidents soient absorbés seulement dans la zone I de la photodiode (**Figure 2.9**). [2]

La sensibilité, le temps de réponse et le courant d'obscurité sont les paramètres importants qui caractérisent une photodiode **PIN**.

Le photocourant I_{ph} est directement proportionnel à la puissance optique incidente P_{opt} selon la relation suivante [9] :

$$I_{ph} = S \cdot P_{opt} + I_{obs} \quad (2.1)$$

S est la sensibilité de la photodiode est typiquement proche de **0.9 A/W**, mais peut être plus faible suivant le photodétecteur et la longueur d'onde d'attaque λ . En effet, **S** exprime en fonction du rendement quantique [2] :

$$S = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q}{hc} \lambda \quad (2.2)$$

I_{obs} est le courant d'obscurité qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairement. Ce courant ne provient donc pas des photons transmis par la fibre. Il peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite ... Dans la plupart des applications ce courant est négligeable ($I_{obs} < 10$ nA). En ce qui concerne le temps de réponse, les meilleurs photodétecteurs actuels sont utilisables jusqu'à plus de **100 GHz**. [8]

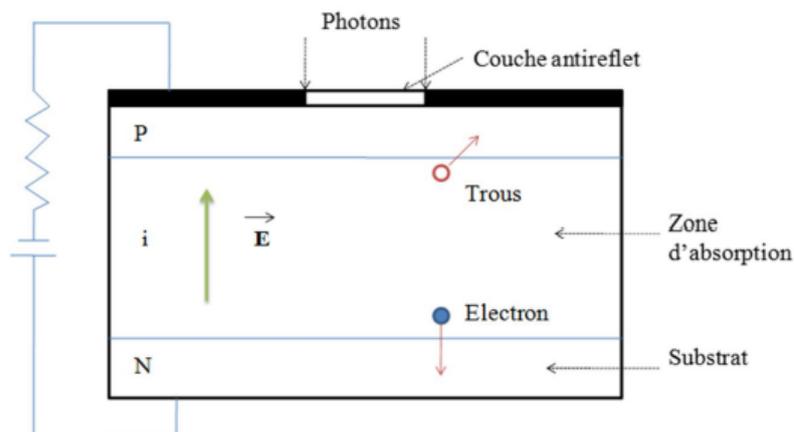


Figure. 2.9 – Photodiode PIN. [3]

2.3.1.2 Photodiode APD (Avalanche Photo Diode)

Les photodiodes **APD** (photodétecteur à gain interne) (**Figure 2.9**) sont des composants semi-conducteurs d'une structure **PIN**. En faisant croître le champ électrique dans la jonction **PIN**, l'énergie des porteurs s'élève, jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaîne se produisent alors et les porteurs se multiplient. Ce phénomène crée un courant électrique conséquent à partir de très peu de photons incidents.

Le gain augmente avec la différence de potentiel appliquée, mais il est limité à une valeur maximale. Si le champ devient trop fort, il y a risque de claquage. Cette valeur limite de tension dépend du matériau et de la structure utilisés.

Tout comme pour les photodiodes **PIN**, il existe plusieurs structures possibles. Voici à titre d'exemple le cas d'une structure dans le Silicium. Elle résulte d'un compromis entre une zone d'absorption large, et une jonction très abrupte pour obtenir un très fort champ électrique.[2]

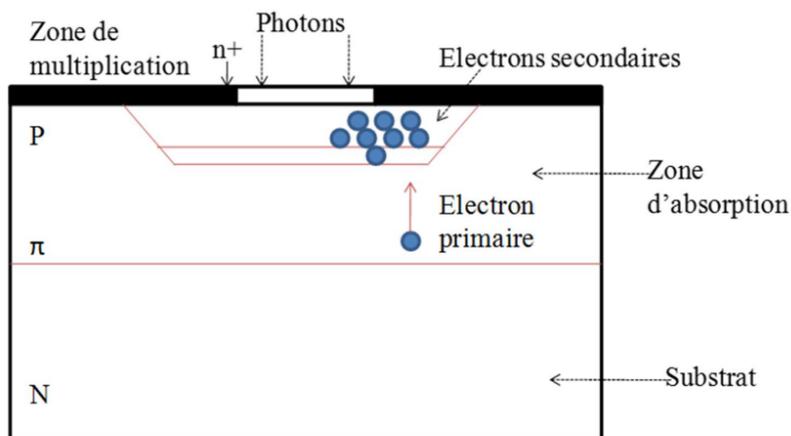


Figure. 2.10 – Photodiode APD. [3]

2.4 Liaisons optiques en espace libre

La transmission optique en espace libre (**FSO**) est une technique de communication sans fil et optique; utilisant l'espace libre comme un support de transmission avec un signal lumineux. Elle est devenue une technique très courante dans le domaine des télécommunications, elle présente un débit de données élevé et plus sécurisée par rapport aux transmissions radio.

2.4.1 Système de communication en espace libre

La liaison **FSO** permet la propagation des signaux lumineux situés dans le spectre optique en espace libre avec une capacité de transmission similaire à celui de la fibre optique.

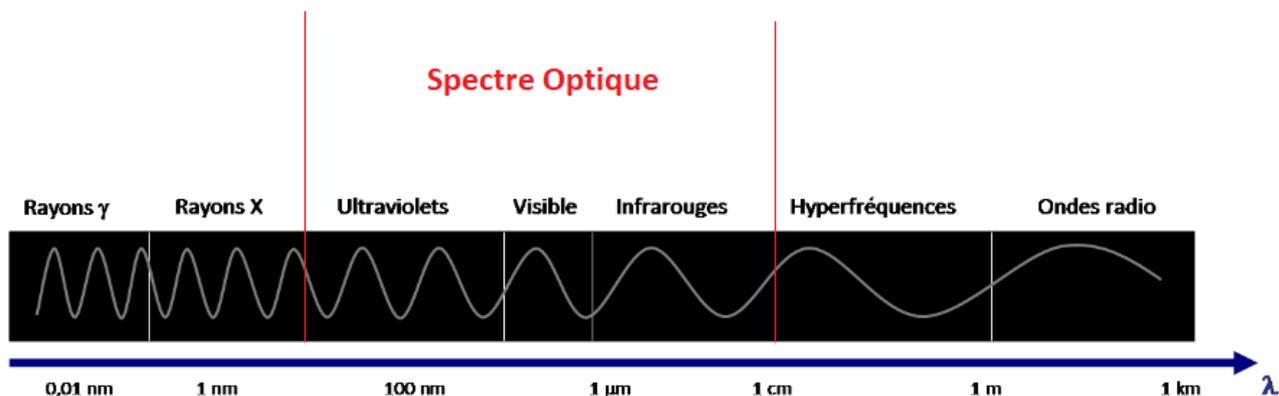


Figure. 2.11 – Le spectre optique.

La liaison **FSO** exige une visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur.

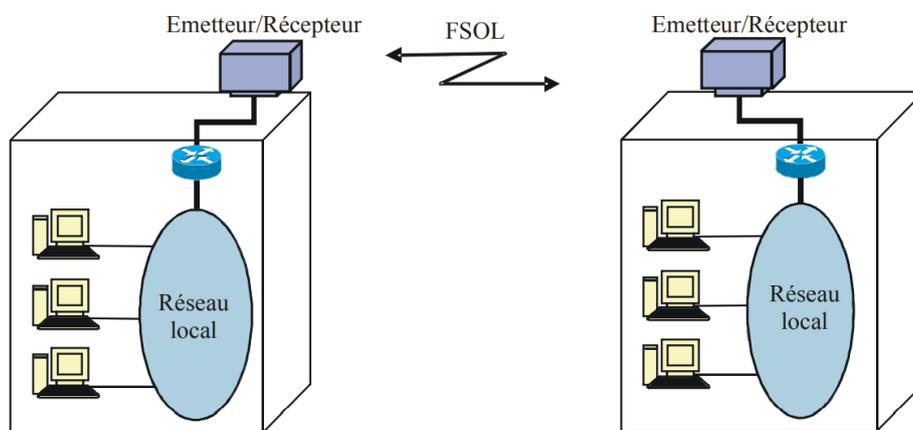


Figure. 2.12 – Une liaison FSO .[4]

2.4.2 Principe de fonctionnement des Liaisons optiques en espace libre

2.4.2.1 Généralités

Comme tous les systèmes de télécommunication, le système de communication avec **FSO** se compose de 3 parties; émetteur, récepteur et un canal de transmission.

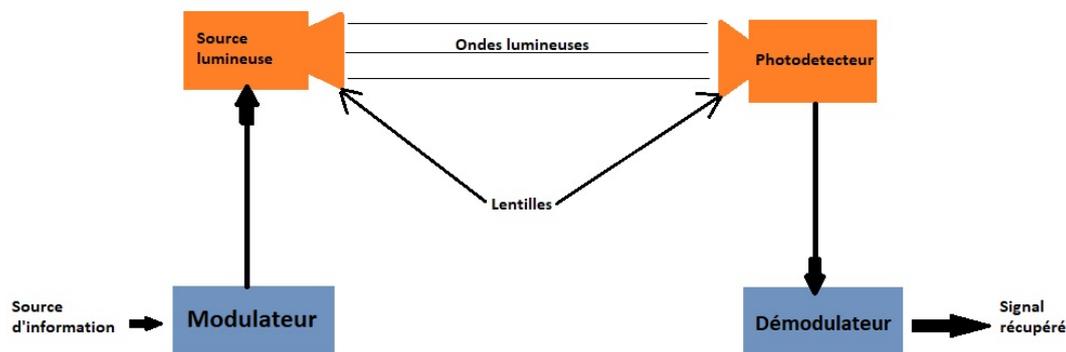


Figure. 2.13 – Système de communication FSO en visibilité directe

2.4.2.2 Principe de fonctionnement

La technologie **FSO** consiste en une transmission des ondes lumineuses en espace libre avec une lumière visible ou infrarouge. Pour effectuer une connexion avec **FSO** il exige une visibilité directe **LOS (Line Of Sight)** entre l'émetteur et le récepteur.

C'est une connexion point à point (un seul récepteur avec un seul émetteur) sans fil, permet de faire connecter deux zones avec le mode "Full-Duplex" donc chaque élément joue le rôle de l'émetteur et le récepteur.

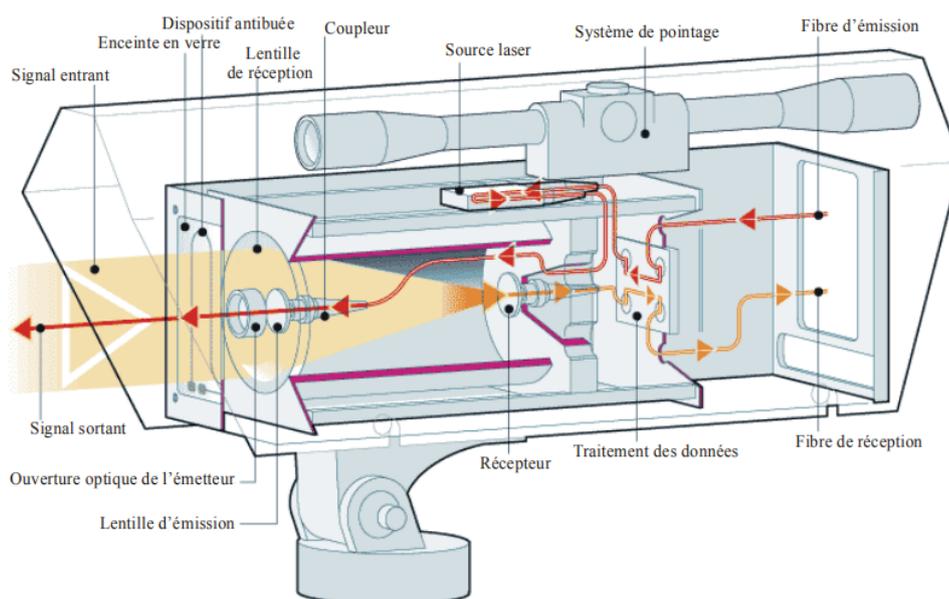


Figure. 2.14 – Exemple de terminal de transmission optique en espace libre. [4]

Chaque équipement comporte plusieurs modules [10] :

(a) **Éléments d'émission :**

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

(b) **Éléments de réception :**

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

2.4.2.3 Schéma de bloc

(a) **Émetteur :**



Figure. 2.15 – Schéma Bloc du bloc émetteur FSO.

(b) **Récepteur :**

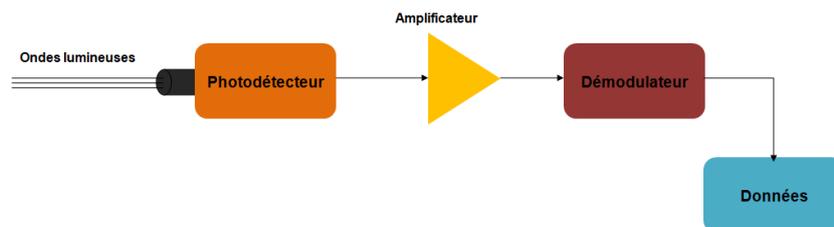


Figure. 2.16 – Schéma bloc de récepteur FSO.

2.4.2.4 Avantages et inconvénients

les liaisons **FSO** offrent plusieurs avantages par rapport à les liaison de fibres optiques et les faisceaux des ondes radio, mais ces avantages ne l'ont pas fait sans inconvénients.

(a) **Avantages :**

- Bande passante large.
- Débit élevé.
- Matériels simples.
- Moins coûteuse par rapport aux autres systèmes.
- Équipements flexibles et rapides à installer.
- Réutilisation des liaisons et rapidité de déplacement.
- Plus de sécurité par rapport aux systèmes radioélectriques.

(b) **Inconvénients :**

- Difficulté d'alignement du faisceau pour avoir une visibilité directe.
- Les effets de scintillations et la présence d'aérosols reliés à la composition de l'atmosphère affecte l'atténuation atmosphérique.
- La portée est plus limitée par rapport aux faisceaux des ondes radio.
- Rayonnement solaire.
- Dispersion du faisceau.
- Entre l'émetteur et le récepteur il y a une présence des obstructions physique.

2.4.3 La technologie des systèmes de communication en espace libre et ses applications

La **FSO** résoudre des problèmes des liaisons à fibre optique comme le coût d'installation. Elle offre un haut débit avec une sécurité naturelle et elle ne nécessite pas une licence de fonctionnement avec une absence d'interférences, donc cette technologie offre des avantages aussi par rapport les communication hertziennes classiques.

2.4.3.1 Applications

Les systèmes **FSO** sont utilisés dans plusieurs domaines et applications, nous mentionnons ce qui suit :

- Transmission optique avec satellite.
- Réseaux informatiques.
- Installation d'urgence en cas de pannes des liaisons à fibres optiques (liaison de secours).
- infrastructure mobile pour les liaison **2G**, **3G** et **4G**.
- La téléphonie.
- Domaine militaire.
- Liaison pour une évènement particulière.
- Installation des liaisons temporaires.

2.4.3.2 La technologie utilisée

Ce **tableau 2.1** représente la catégorie laser de l'équipement, elle conditionne les modalités plus ou moins aisées pour l'installation et la maintenance de la liaison **FSO**. Les facteurs à prendre en compte pour définir la classe laser sont : la longueur d'onde du signal, la puissance et la forme du faisceau.[5]

Classification de laser	Puissance (mW)	Taille d'ouverture (mm)	Distance (m)	Densité de puissance (mW/cm^2)
Longueur d'onde 850 nm				
Classe 1	0.78	7	14	2.03
		50	2000	0.04
Classe 1M	0.78	7	100	2.03
		500	7	14
	50		2000	25.48
Longueur d'onde 1550 nm				
Classe 1	10	7	14	26
		25	2000	2.04
Classe 1M	10	3.5	100	103.99
		500	7	14
	25		20	101.91

Tableau. 2.1 – Catégorie des lasers.[5]

Le **tableau 2.2** présente des liaisons FSO avec leurs débits et leurs portées recommandés par leurs fabricants.

Laser 2000		
Type liaison FSO	Débit	La portée
Liaison Laser FSO	100 Mbps	500 m
	1000 Mbps	1000 m
Liaison Laser Gigabit	1 Gbps	500 m
Liaison Laser AirBridge SX WideBeam Light Point	1 Gbps	200 m
Liaison Laser AirBridge SX WideBeam Light Point 500 m	1 Gbps	500 m
Liaison Laser AirBridge SX WideBeam Light Point 1500 m	1 Gbps	1500 m
Trimble FSO		
PXAT3000FT/ PXAT3000FTH	100Mb Ethernet	200-3000m
PXATW3000GT/ PXATW3000GTH	Gigabit TX/FX Ethernet	200-3000m
PXAF500FT/ PXAF500FTH	100Mb TX Ethernet	100-500m
PXAF1000FT/ PXAF1000FTH	100Mb TX Ethernet	500-1000m
PXAFW500GT/ PXAFW500GTH	Gigabit TX/FX Ethernet	100-500m
PXMF400GT/ PXMF400GTH	Gigabit TX/FX Ethernet	20-400m
PXMF400GT/ PXMF400GTH	Gigabit TX/FX Ethernet	20-400m

Tableau. 2.2 – Type de liaison FSO disponible dans le marché.[5]

2.4.3.3 Composants et paramètres d’un système de communication optique en espace libre

-a) L’émetteur FSO

L’émetteur de **FSO** se compose de : un codeur, un modulateur et un Led ou un Laser (voir la partie “émetteur” au **chapitre 2.2**).

● Paramètres d’un émetteur FSO :

L’émetteur de **FSO** se caractérise par certains paramètres :

- **Puissance d’émission** : exprimée en **dBm** ou en **mW**; est la puissance émise par la surface d’émission d’un émetteur **FSO**.
- **La longueur d’onde** (λ) : La longueur d’onde de base utilisée exprimée en **nm**.
- **Divergence du faisceau** (θ) : cette valeur est importante pour déterminer la catégorie de sécurité laser et pour calculer la marge de liaison. Exprimée en milli radian (**mrad**); est la valeur maximale de l’angle compris entre l’axe central du faisceau

correspondant à la densité de puissance maximale et la direction correspondant à une densité de puissance inférieure de -3 dB.

- **Surface d'émission** : exprimée en m^2 ; est la surface de la fenêtre d'émission utilisée par l'émetteur **FSO**.

-b) Le récepteur FSO

Pour récupérer l'information émise dans une liaison **FSO** nous avons besoin de : un Photodétecteur (voir la partie "récepteur" au **chapitre 2.3**), démodulateur et un décodeur.

• Paramètres d'un récepteur FSO :

Les paramètres qui caractérisent un récepteur **FSO**, sont :

- **La surface de réception** : exprimée en m^2 ; est la surface de la fenêtre de réception.
- **Sensibilité** : exprimée en dB; est le seuil minimal pour une qualité de transmission des données qui doit être respectée.
- **Champ de vision** : la valeur peut être exprimée comme un demi-angle ou comme un angle total, mais il faut le préciser; l'unité utilisée peut être le milliradian (**mrاد**); elle est l'angle entre l'axe central et la direction à -3 dB.
- **Sensibilité à saturation** : exprimée en dB; est le seuil de niveau optique maximale pour une qualité de transmission des données considérée. La différence entre la sensibilité et la sensibilité à saturation nous donne la gamme dynamique.

-c) Canal de transmission

L'atmosphère est le milieu de propagation d'un faisceau du **FSO**. Ce milieu est très dynamique et complexe, ces derniers caractéristique affectent les faisceaux émis. La propagation d'un faisceau lumineux dans l'atmosphère est affectée par la diffusion de rayonnement solaire et l'absorption des particules qui composent ce milieu. L'installation du liaison **FSO** faut prendre en compte de certains paramètres et de certaines précautions pour tenir la validité et disponibilité :

- Des études techniques pour la liaison (la météo, la bande passante nécessaire et simulation avec des logiciels).
- La visibilité directe.
- Installation dans haut lieu.

– Et quelques précautions montrées dans la **Figure 2.17** :

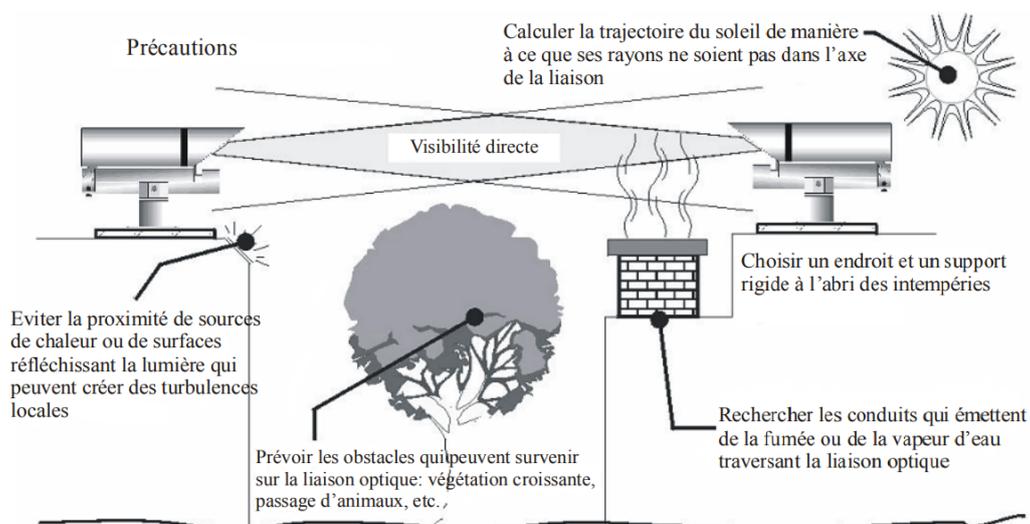


Figure. 2.17 – Précautions pour l’installation d’un système optique en espace libre.[4]

2.4.4 Effets des turbulences atmosphériques sur les liaisons optiques

2.4.4.1 Atténuation géométrique

Cette type d’atténuation est indépendante du temps. L’atténuation géométrique se produit à cause de divergence de faisceau lumineux au long de son trajet de propagation. Elle dépend des paramètres d’installation des **FSO** selon la formule suivante [11] :

$$Att_{geo}(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{d_2^2}{(d_1 + \theta \cdot L)^2} \right) \quad (2.3)$$

Où :

- d_2 : diamètre d’ouverture du récepteur en (**m**).
- d_1 : diamètre d’ouverture de l’émetteur en (**m**).
- θ : divergence de faisceau en milliradian (**mrad**).
- L : la distance entre l’émetteur et le récepteur en (**km**).

2.4.4.2 Effet du brouillard

Généralement, il est difficile de mesurer la densité du brouillard et obtenir des données statistiques, on peut juste l'estimer. Elle dépend à le nombre de particules existe dans lui (densité du brouillard).

L'effet de l'affaiblissement du brouillard $Att_{\text{brouillard}}$ (dB/km) peut être relié à la visibilité atmosphérique V (km) et ϵ (dans la littérature, on trouve que $\epsilon = 0.02$ et 0.05 . [4]) avec l'équation suivante [4] :

$$Att_{\text{brouillard}}(dB/km) = 10 \log_{10}(\epsilon)/V \quad (2.4)$$

L'équation 2.4 est éprouvé et peut être appliquée pour tous les types de brouillard et tous les longueurs d'onde et une visibilité V inférieure à **3 km**.

On peut aussi calculer l'atténuation causée par le brouillard avec le "modèle **Kim**". Ce modèle est exprimée par cette équation [11] :

$$\alpha_{\text{brouillard}}(dB/km) = \frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda}{550nm} \right)^{-q} \quad (2.5)$$

où :

- V : la visibilité en **km**.
- λ : est la longueur d'onde en **nm**.
- q : un paramètre lié à la distribution de la taille des gouttelettes.

Les valeurs nécessaire pour utiliser l'équation 2.5 :

V (km)	q (tailles de particule en nm)
$V > 50$	1.6
$6 < V < 50$	1.3
$1 < V < 6$	$0.16 V + 0.34$
$0.5 < V < 1$	$V - 0.5$
$V < 0.5$	0

Tableau. 2.3 – Les valeurs à utiliser dans l'équation 2.5. [6]

On utilise l'équation 2.5 pour calculer l'atténuation avec :

- V (km) : "0.2, 0.9, 4, 20, 60".
- q (nm) : d'après le tableau 2.3.
- Longueur d'onde: $\lambda = 1550$ nm.

Résultats :

V (km)	0.2	0.9	4	20	60
q (nm)	0	0.4	0.98	1.3	1.6
Atténuation (dB/km)	19.56	2.87	0.354	0.051	0.0124

Tableau. 2.4 – L’atténuation en fonction de la visibilité à l’aide de la formule de Kim .

2.4.4.3 Effet de la pluie

l’affaiblissement de pluie est causé par la diffusion géométrique due aux gouttes, cette diffusion géométrique cause des effets ne peuvent pas être ignorés. Les gouttelettes de pluie provoque une réflexion et une réfraction de faisceau lumineux.

On exprime l’atténuation de pluie en (dB/km) par l’équation suivant [4] :

$$\alpha_{pluie}(dB/km) = 1.076 \cdot R^{0.67} \tag{2.6}$$

Où :

- R: le taux de précipitations de pluie en **mm/h**.

On prend ce tableau comme un exemple d’atténuation de pluie :

Pluie	Atténuation (dB/km)
faible (1 mm/h)	1.076
modérée (3 mm/h)	2.24
forte (9 mm/h)	4.69

Tableau. 2.5 – Valeurs de niveau d’atténuation en fonction de précipitations de pluie.

2.4.4.4 Effet de la neige

l’atténuation à cause de neige est relative à la précipitation **S (mm/h)** et la longueur d’onde selon les relations suivantes :

1. **Neige humide** altitude au dessous de 500 m [4] :

$$Att_{neige}(dB/km) = (0,0001023 \cdot \lambda + 3,7855466) \cdot S^{0.72} \tag{2.7}$$

2. **Neige sèche** altitude au dessus de 500 m [4] :

$$Att_{neige}(dB/km) = (0,0000542 \cdot \lambda + 5,4958776) \cdot S^{1.38} \quad (2.8)$$

Où :

- λ : est la longueur d'onde en **nm**.
- **S** : le taux de précipitations de neige en **mm/h**

2.5 Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous pouvons dire que l'espace libre utilisé en tant que support de transmission pour les faisceaux lumineux est devenue un élément clé des systèmes des télécommunications optiques. La propagation du signal optique dépend de la composition chimique de l'atmosphère, les différentes conditions climatologiques qui peuvent réduire la puissance et la qualité de transmission. Nous avons vu les caractéristiques des équipements **FSO**, les avantages, les inconvénients et leurs applications possibles. Dans le prochain chapitre nous simulons une liaison utilisant ce que nous avons vu dans les deux chapitres précédents.

Chapitre 3

Étude des performances du liaison hybride

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter une liaison optique **DWDM** sous un canal **FSO**, la partie théorique précédente nous a permis de développer une simulation introduite sous le logiciel **Optisystem**. D'abord, on va analyser les paramètres qui influence sur la performance de la liaison **DWDM-FSO**. Ensuite nous allons évaluer les performances du système **hybride DWDM-FSO** de 90 canaux sous les paramètres internes et externes. On utilise le taux d'erreur binaire (**BER**) et facteur de qualité (**Q**) comme des métrique de performance.

3.2 Critères du qualité de transmission

3.2.1 Taux d'erreur binaire

Le **TEB** (ou **BER** en anglais) est le rapport du nombre d'erreurs de transmission; il suffit donc de comparer la séquence de symboles envoyés à celle de symboles reçus et de compter les erreurs; c'est-à-dire du nombre de fois où un "1" a été détecté à la place d'un "0" ou vice-versa, sur le nombre total de bits transmis.

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

Dans les liaisons optiques, le système considéré comme un système sans erreur est celui qui a un **TEB** environ 10^{-12} .

3.2.2 Facteur de qualité Q (Q Factor)

Le facteur **Q** est un critère de qualité optique, Il contient les statistiques des bruits des niveaux 1 et 0 du signal défini par cette formule [6]:

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

I_1 et I_0 désignent les valeurs moyennes des niveaux "1" "0" du signal.

σ_1 et σ_0 désignent leurs écarts-types.

3.2.3 Diagramme d’œil

Le diagramme d’œil représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise , ça dépend le type de codage utilise comme il est montrer dans la figure 3.1.

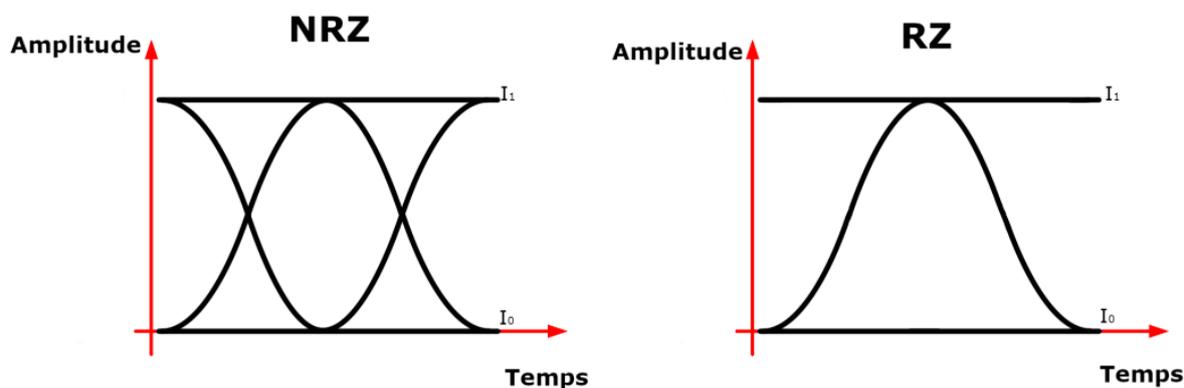


Figure. 3.1 – Diagramme de l’œil.

on peut visualiser d’après ce diagramme [12] :

- Les interférences entre symboles qui sont la conséquence principale de l’élargissement temporel des impulsions du signal due à la dispersion ou d’autres problèmes.
- Bruit d’amplitude qui résulte de l’accumulation du bruit d’émission spontanée amplifiée sur le signal tout au long de son parcours dans la liaison.
- Gigue temporelle provoqué par la dispersion de mode de polarisation mais également du couplage entre les impulsions et le bruit d’émission spontanée amplifiée.

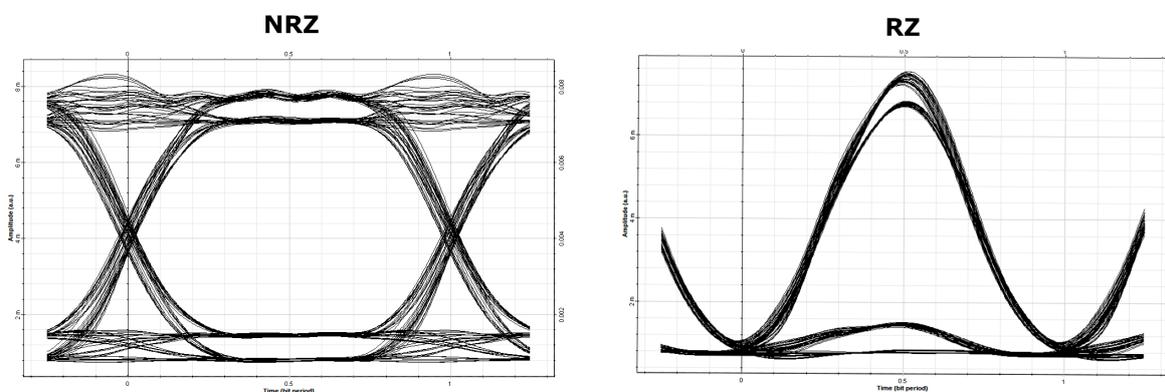


Figure. 3.2 – Diagramme d’œil à partir d’optisystem.

3.3 Conception de la liaison

3.3.1 Liaison FSO simple

Nous avons une liaison de transmission optique simple (**Figure 3.3**) utilisant la technologie **FSO**, cette liaison se compose de trois parties :

- L'émetteur.
- Canal de transmission **FSO**.
- Le récepteur.

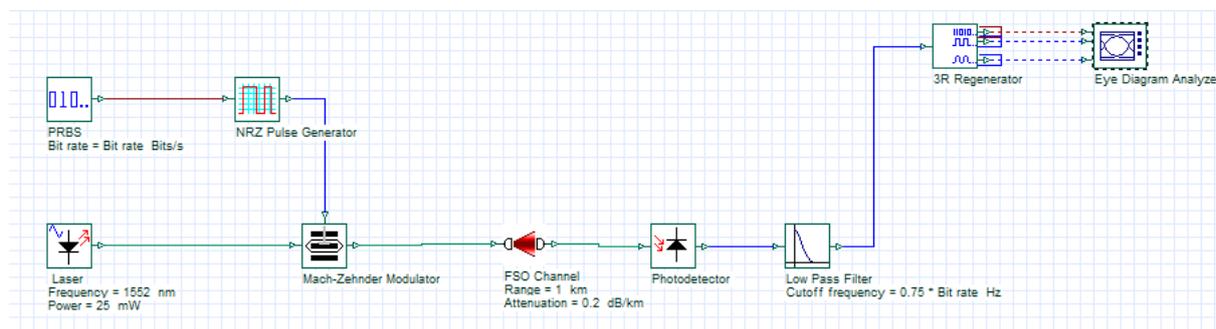


Figure. 3.3 – Une liaison FSO simple.

3.3.1.1 L'émetteur

L'émetteur dans cette liaison se constitue d'une **diode laser**, un générateur de séquence des bits pseudo-aléatoires et un modulateur externe type de **Mach-Zendzer**.

Les paramètres disponible dans la source optique :

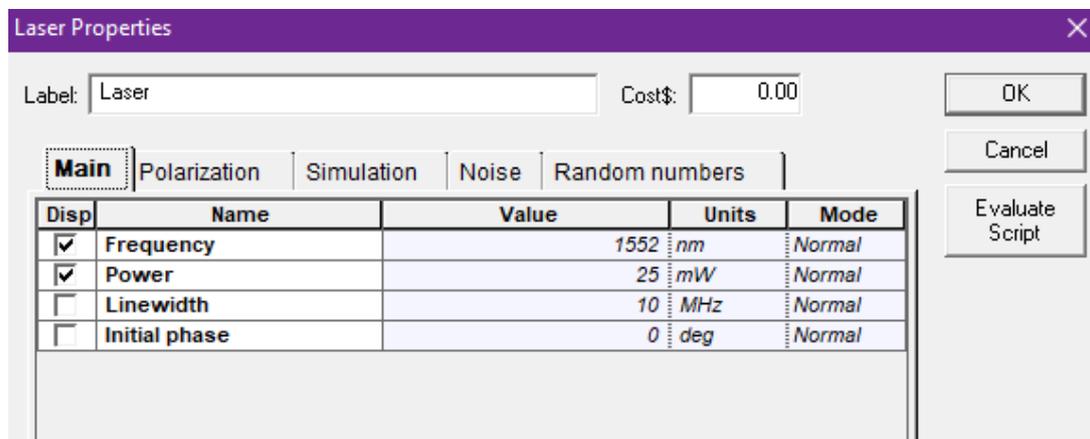


Figure. 3.4 – Configuration de la source optique.

3.3.1.2 Le récepteur

Pour récupérer le signal transmis, nous avons un **photodétecteur** (APD ou PIN) et un filtre passe-bas (**Bessel**, **Rectangle** ou **Gaussien**)

3.3.1.3 Canal de transmission FSO

La transmission en espace libre est affectée par plusieurs paramètres :

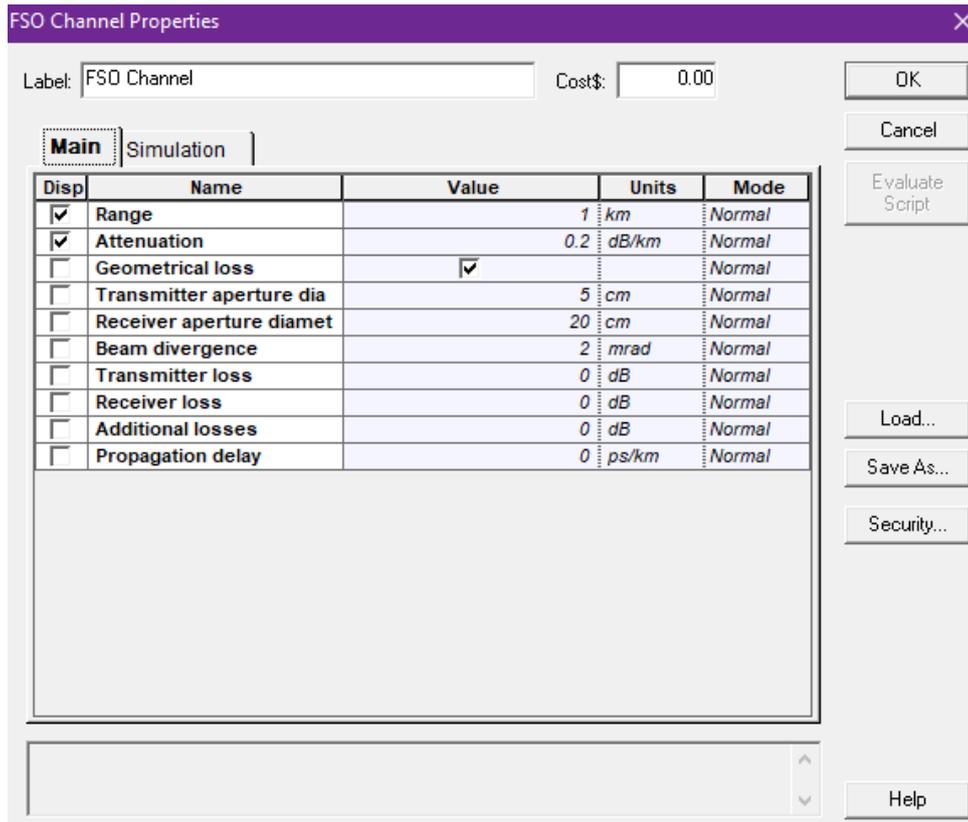


Figure. 3.5 – Configuration canal de transmission FSO.

3.3.2 Description du système DWDM FSO

Le système simulé est constitué de trois parties, à savoir l'émetteur, la liaison optique en espace libre (**FSO**) et le récepteur.

L'émetteur du système est composée de **90** utilisateurs où chaque un génère à l'aide d'un générateur de séquences binaires pseudo-aléatoires (**PRBS**) un débit de **60 Gbps** qui est modulées optiquement par une source laser avec un modulateur externe (**Modulateur**

Mach-Zehnder : MZM), générant des signaux **OOK-NRZ**. Ces utilisateurs sont multiplexés en longueur d'onde **DWDM** pour donner un débit de **5.4 Tbps** et transmises sur une liaison optique en espace libre **FSO**. Les caractéristiques du canal **FSO** sont rapportées sur la figure **3.8**.

Le récepteur est composé d'un démultiplexeur **DWDM**. Le signal désiré est détecté par une photodiode **PIN** dont la valeur du courant d'obscurité est de **10 nA** et son coefficient de bruit thermique est de $1.8 \cdot 10^{-23} \text{ W / Hz}$, filtré par un filtre **Bessel** passe-bas d'ordre 4 (fréquence de coupure de **0.75** fois la fréquence du rythme). On place au bout de notre chaîne un analyseur pour chaque utilisateur, qui nous donne le taux d'erreur binaire **TEB**, le facteur **Q**, et le diagramme de l'œil.

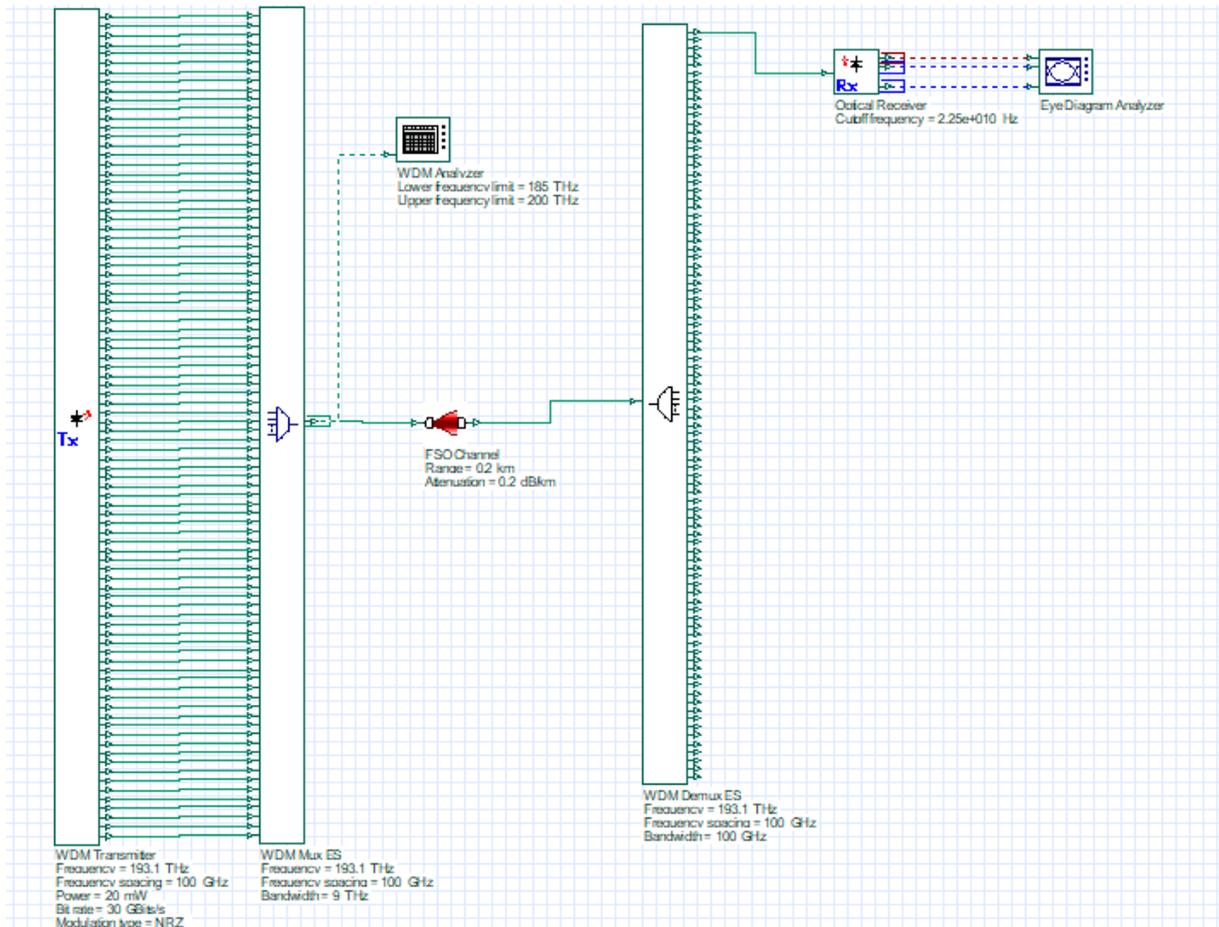


Figure. 3.6 – Système hybride DWDM-FSO.

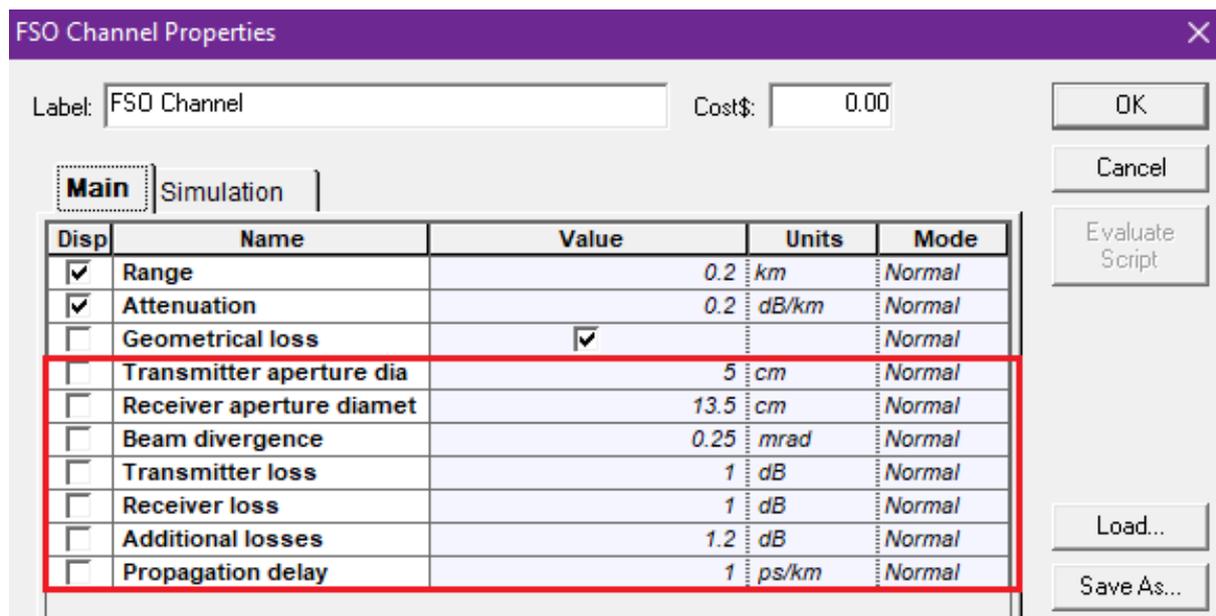


Figure. 3.7 – Paramètres du support FSO.

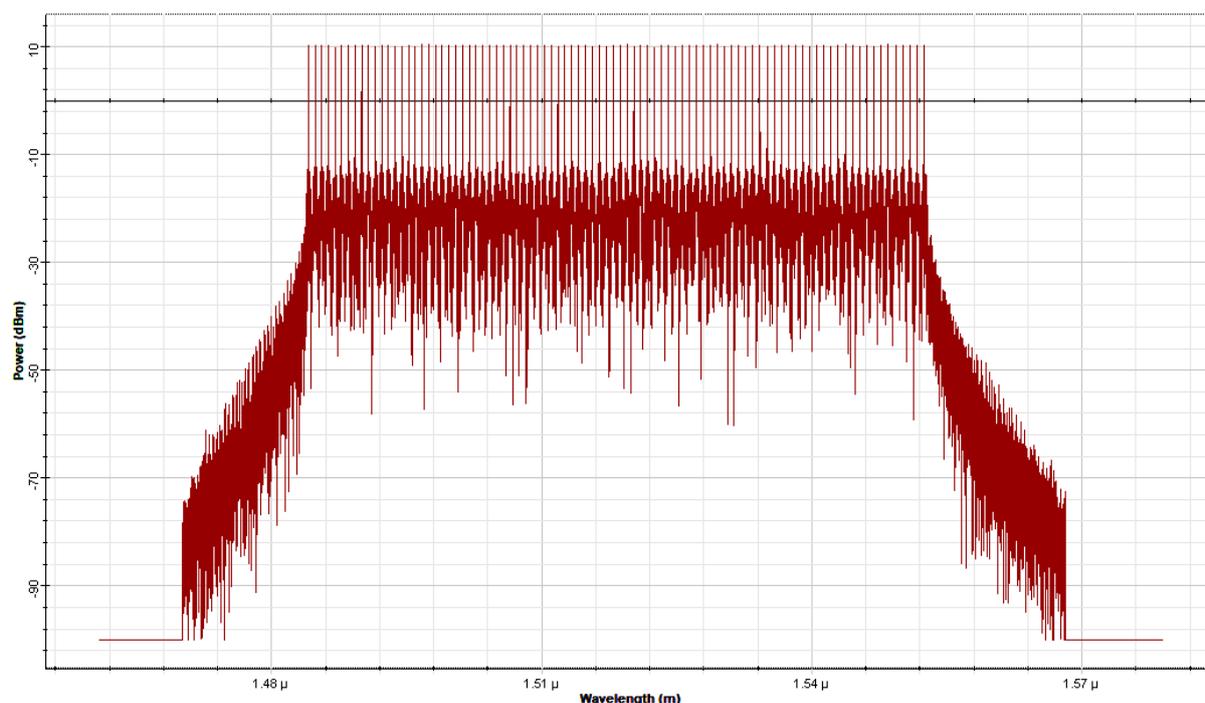


Figure. 3.8 – Le spectre de DWDM pour 90 utilisateurs.

3.4 Résultats de la simulation

Dans cette partie, nous discutons les résultats de simulation obtenus du système optique DWDM-FSO (Figure 3.6). On analyse la qualité de signal reçu pour un seul

utilisateur (**Utilisateur 90**) en fonction de :

- L'espacement.
- Type de Modulation (**NRZ** ou **RZ**).
- Puissance de la source optique.
- Débit.
- Conditions climatologiques

3.4.1 Débit

Notre objectif est d'atteindre une liaison comporte **90** utilisateurs en haut débit pour chacun, et de plus une bonne qualité de transmission. Mais cela ne signifie pas que nous n'aspirons pas plus de débit pour augmenter la capacité de canal sans perte de qualité de transmission.

On va voir l'augmentation de débit en fonction de **BER**.

les paramètres utilisées :

Espacement	0.8 nm
Portée de FSO	0.2 km
Atténuation de FSO	0.2 dB/km
Type de source optique	EML
Type de modulation	NRZ
Puissance de la source optique	25 mW

Tableau. 3.1 – Paramètres de la simulation.

La **figure (3.9)** montre la valeur **BER** en **dB** pour chaque débit utilisé et la **figure (3.10)** présente le valeur de **facteur Q** avec les mêmes paramètres.

les figures révèlent que nous pouvons maintenir un **TEB** environ $9 \cdot 10^{-12}$ avec un débit allant à **60 Gbps** pour atteindre un système à haut débit d'une capacité **5.4 Tbps** au delà la liaison sera perturbé.

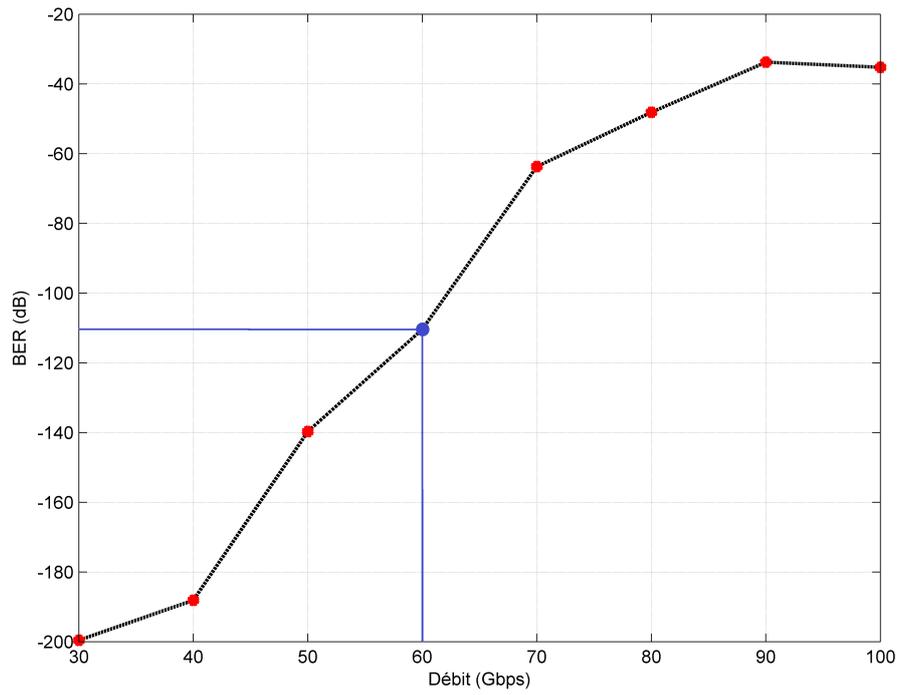


Figure. 3.9 – BER en fonction de débit.

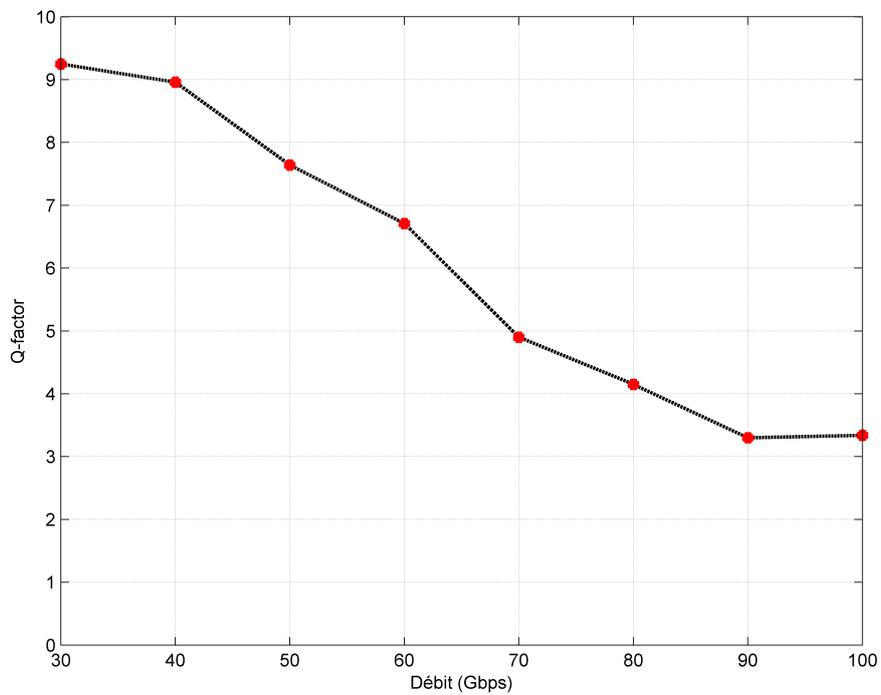


Figure. 3.10 – Facteur Q en fonction de débit.

3.4.2 L'espaceur

Notre système comporte **90 utilisateurs**, nous devons choisir l'espaceur qui donne la meilleur qualité de transmission avec une conservation maximale de la bande passante pour avoir un système évolutif. La technique **DWDM** utilise des espaceur inférieur ou égale à **0.8 nm (100 GHz)**, donc on a deux autres espaceurs disponibles; **0.2 nm (25 GHz)** et **0.4 nm (50 GHz)**.

Nous allons tester l'effet de la portée pour chaque espaceurs, avec un pas de **0.5 Km**. On va garder les paramètres de le section précédente avec un débit de **60 Gbps**.

La **figure (3.11)** montre la valeur **BER** en **dB** pour chaque espaceur utilisé avec une variation de la distance, la **figure 3.12** présente la valeur de **facteur Q** avec les mêmes paramètres et la **figure 3.13** pour le diagramme de l'oeil.

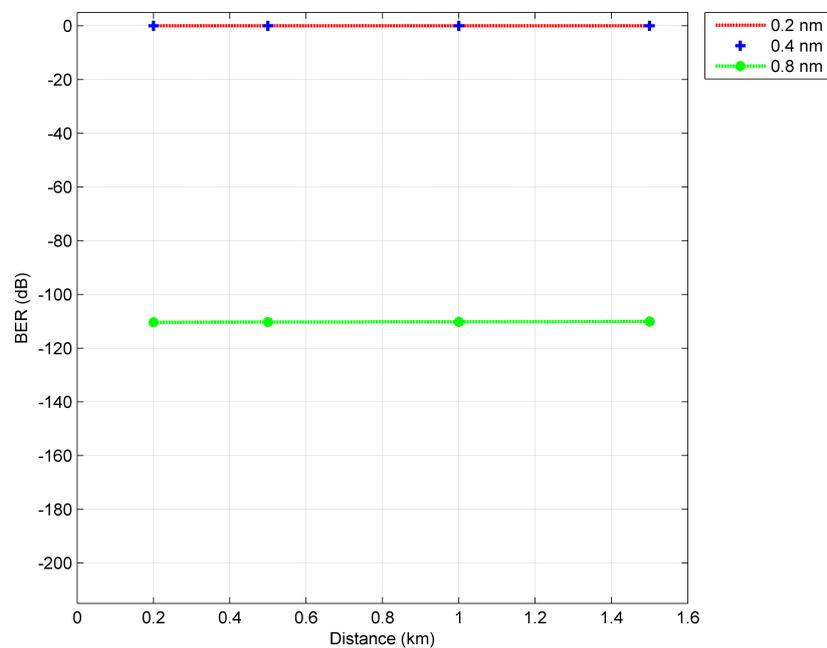


Figure. 3.11 – BER en fonction de la distance pour chaque espaceur.

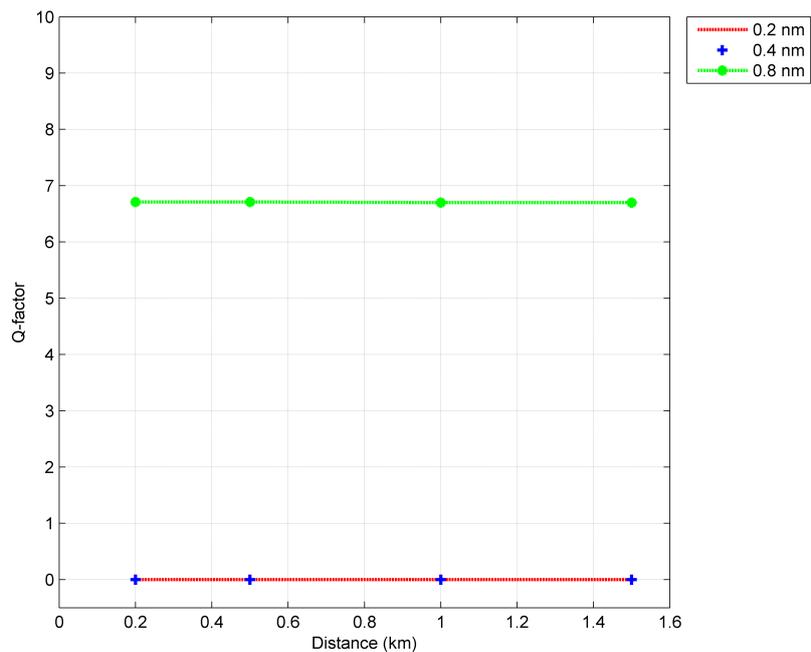


Figure. 3.12 – Facteur Q en fonction de la distance pour chaque espacement.

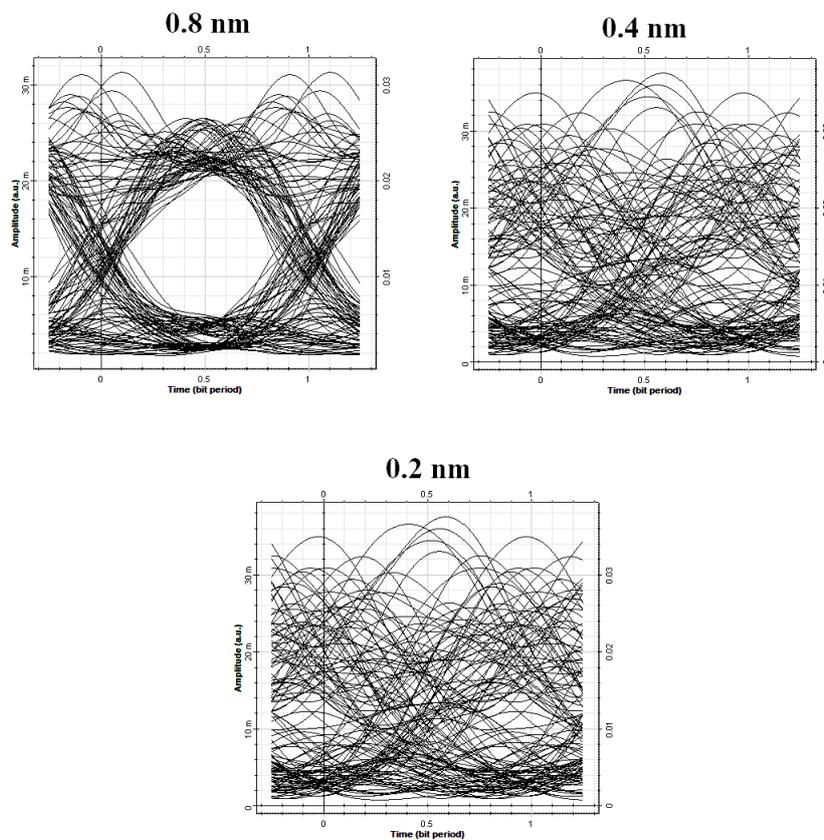


Figure. 3.13 – Diagramme de l’œil pour chaque espacement.

Les espacements **0.2** et **0.4 nm** donnent une liaison corrompue avec un **BER** de **1** et un **facteur Q** de **0**, par contre le **0.8 nm** a la meilleur qualité de transmission d' un **BER** de l'ordre de $9 \cdot 10^{-12}$ et d'un facteur de qualité **Q** de **6.71**, donc on le garde dans la suite de notre travail.

3.4.3 Type de Modulation (NRZ ou RZ)

Nous allons étudier l'effet de la modification du type de codage au niveau d'émetteur, pour observer les résultats on va faire la simulation avec le **NRZ** puis le **RZ** en fonction de la distance, avec les paramètres suivante :

Débit	60 Gbps
Atténuation de FSO	0.2 dB/km
Type de source optique	EML
Espacement	0.8 nm
de la source optique	25 mW
Portée	0.2, 0.5, 1, 1.5 Km

Tableau. 3.2 – Paramètres utilisées dans la simulation pour les différentes types de codage

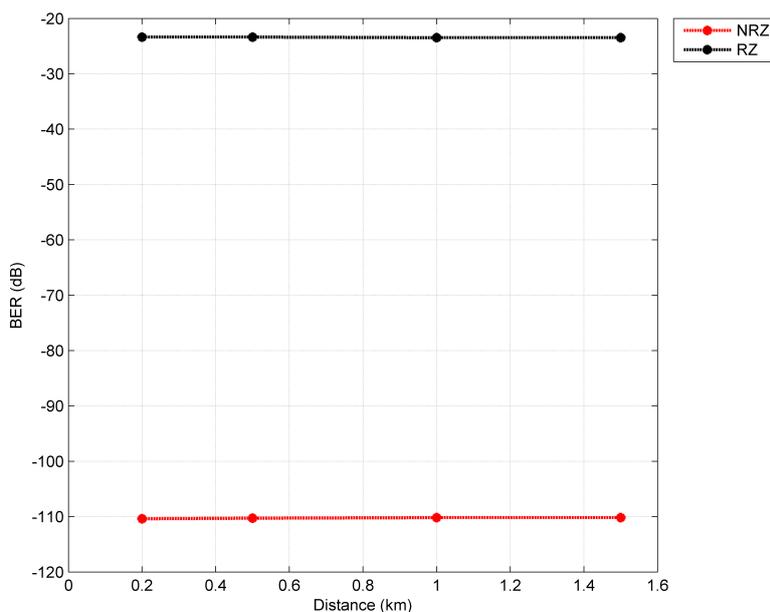


Figure. 3.14 – BER en fonction de codage (NRZ et RZ).

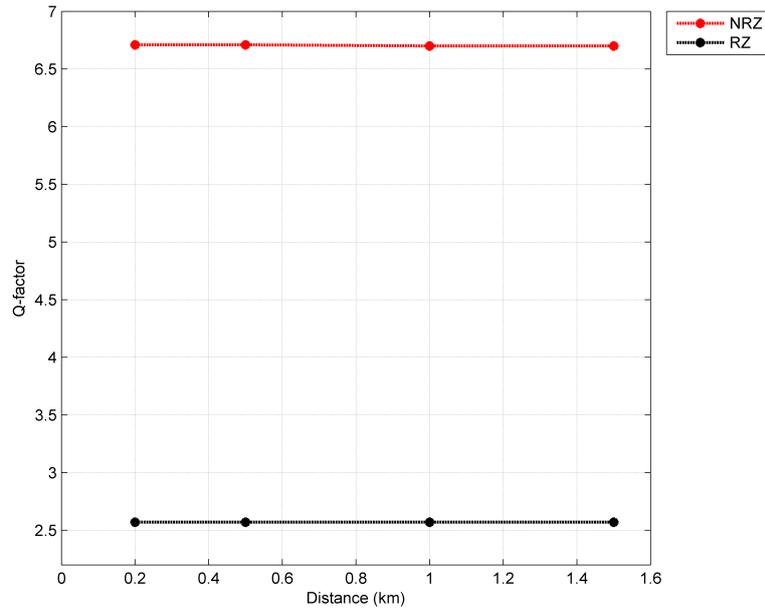


Figure. 3.15 – Facteur Q en fonction de codage (NRZ et RZ).

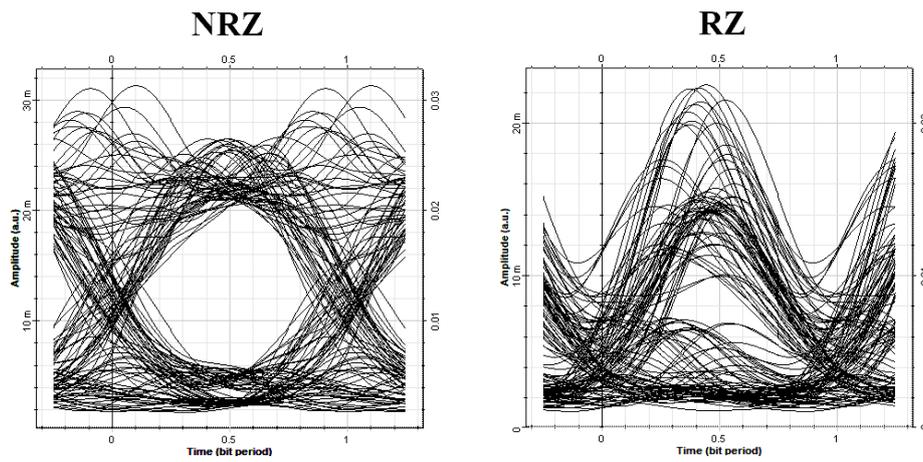


Figure. 3.16 – Diagramme d’œil pour chaque type de codage.

À partir de ces résultats on va continuer notre étude avec le codage **NRZ**, car il nous donne des résultats meilleurs avec un **BER** de l’ordre de $9 \cdot 10^{-12}$ et $Q= 6.71$.

3.4.4 Puissance de la source optique

Dans le marché parmi les meilleures ventes de source laser qui utilise la troisième fenêtre optique de **1550 nm**, nous avons trouvé plusieurs modèles, la première chose qui a retenu notre attention en plus du prix est la puissance d'émission de la source optique différentes entre eux; le modèle **LDI-1550-DFB-2.5G-20/70-B-2-SM1-FA-0.5** utilise une puissance de **20 mW**, le modèle **1550LD-2-0-0 / LASER-DIODE** utilise **40 mW** et le **RLS/7115-0000** utilise **500 mW**.

Dans cette partie, nous allons varier la puissance de l'émetteur optique pour avoir son effet sur le récepteur; si l'augmentation ou la diminution de la puissance d'émission fera une différence positive puis mesurer la puissance de réception à l'aide de l'**appareil de mesure (Optical power meter)** et le comparer avec le résultat théorique de l'équation [13]:

$$P_r(W) = P_e \frac{d_r^2}{d_T + \theta R} 10^{\frac{-\alpha R}{10}} \quad (3.3)$$

P_e : Puissance d'émission (**W**).

P_r : Puissance de réception.

d_R : Diamètre d'ouverture du récepteur (**m**) .

d_T : Diamètre d'ouverture de l'émetteur (**m**) .

θ : Divergence du faisceau (**mrاد**) .

R : Portée (**km**) .

α : Atténuation atmosphérique (**dB/km**) .

Nous avons utilisé dans les études précédentes une puissance de la source optique de **25 mW**, maintenant on va utiliser les puissances du modèles commerciales réelles que nous avons mentionnés (**20, 40, 500 mW**).

On gardons les mêmes paramètres avec différentes puissances d'entrées de la source optique.

Les résultats obtenus dans les tableaux 3.3 et 3.4 :

Puissance de Laser	20 mw	40 mw	500 mw
Puissance émise de FSO (W)	9.79E-01	1.95	24.46
puissance reçue (W)	8.46E-01	1.69	21.14

Tableau. 3.3 – Les résultats pratiques.

Puissance de Laser	20 mw	40 mw	500 mw
Puissance émise de FSO (W)	9.79E-01	1.95	24.46
puissance reçue (W)	1.76	3.53	44.18

Tableau. 3.4 – Les résultats théoriques.

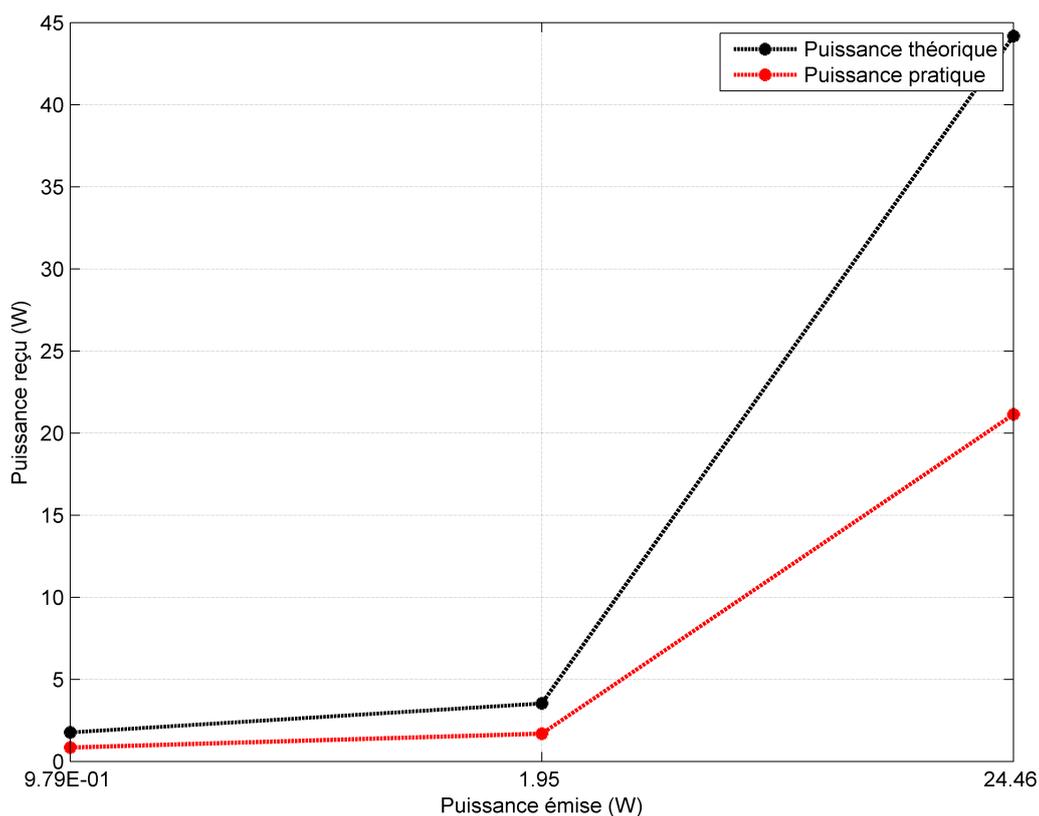


Figure. 3.17 – La puissance reçue en fonction de la puissance émise.

La puissance reçue est proportionnelle à la puissance émise, pour les deux puissances les courbe sont très proches pour les petites valeurs de la puissance émise, lorsque on l'augmente on peut voir la divergence entre les deux courbes, cette différence est causée

par des paramètres présents dans le FSO qui n'existe pas dans l'équation mathématique 3.3. D'où l'augmentation de puissance implique le coût de la source optique. Donc il faut faire un compromis entre le coût et la puissance choisie.

3.4.5 Atténuation de FSO (conditions climatologiques)

3.4.5.1 SISO FSO

La portée de la liaison est directement lié aux conditions climatologiques. Dans cette partie nous étudions l'effet de turbulences climatologiques en fonction de la portée de FSO, avec une distance allant à 5 Km. On utilise les valeurs d'atténuation des conditions climatologiques indiquées dans le tableau suivant :

Conditions climatologiques	Atténuation (db/Km)
Climat clair	0.2
Pluie forte	6.9
Brouillard épais	18.3

Tableau. 3.5 – Conditions climatologiques et leurs atténuations.

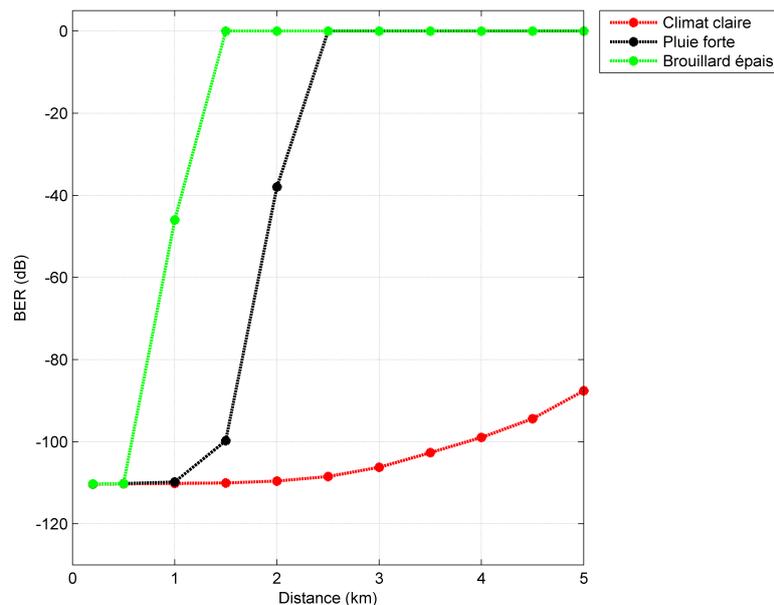


Figure. 3.18 – BER en fonction des Conditions climatologiques.

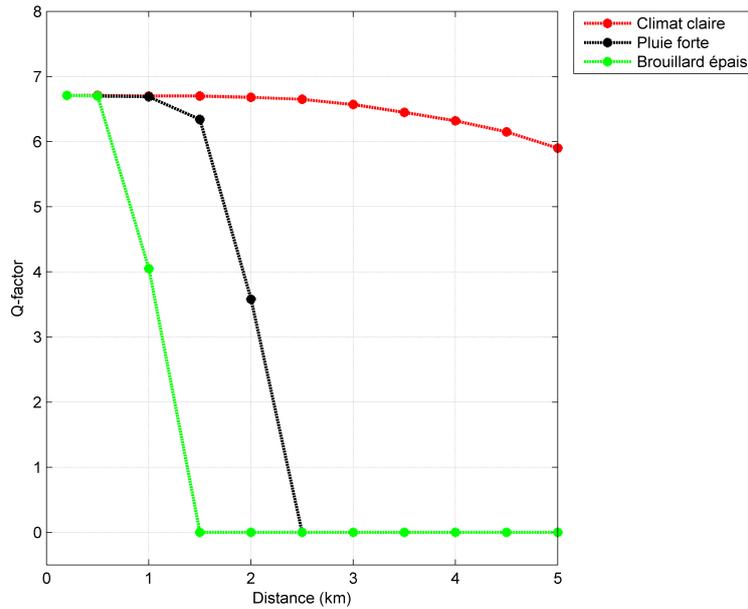


Figure. 3.19 – Facteur Q en fonction des Conditions climatologiques.

La figure (3.18) représente les valeurs de BER en dB et la figure (3.19) présente les résultats de de facteur Q .

Les figures révèlent que nous pouvons maintenir un TEB environ $9 \cdot 10^{-12}$ avec le climat clair allant à 1800 m, et sera dégradé avec un climat de brouillard épais dans une portée moins de 600 m et 1 Km pour la pluie forte.

3.4.5.2 MIMO FSO

Pour cette section, nous comparons les performances du système DWDM proposé sous liaison MIMO-FSO 3X3 et 2X2 et SISO-FSO, nous examinons les systèmes proposés et nous gardons les paramètres déjà utilisés.

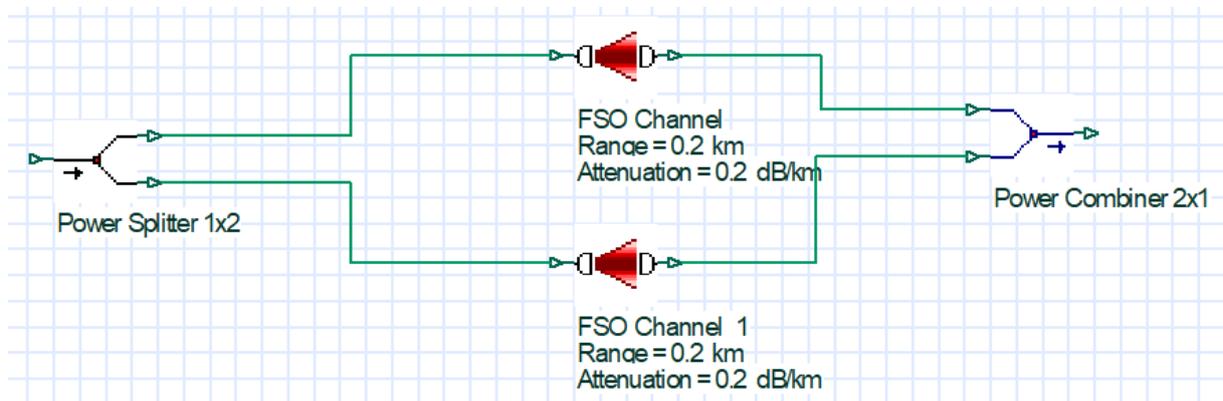


Figure. 3.20 – MIMO-FSO 2X2.

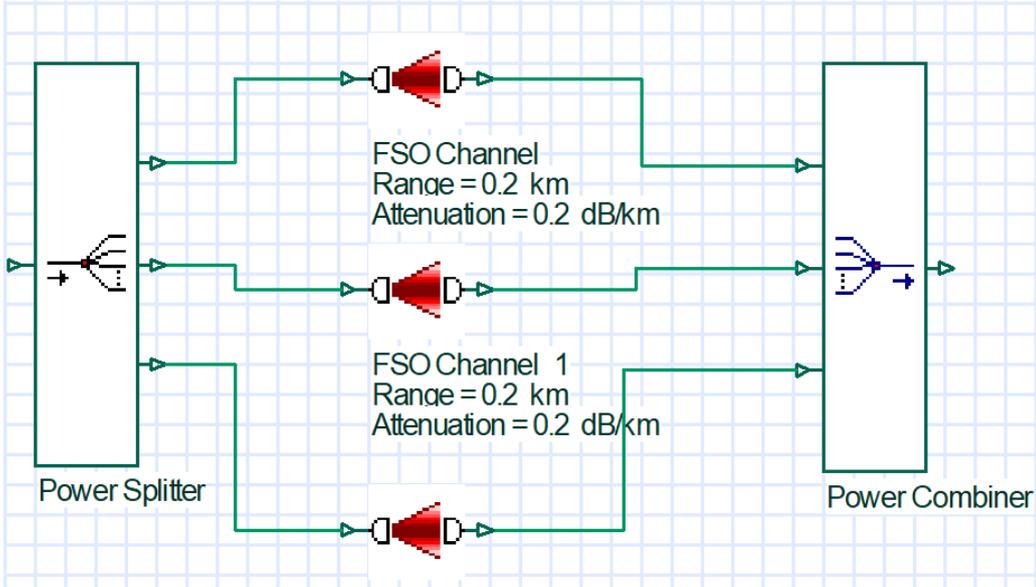


Figure. 3.21 – MIMO-FSO 3X3.

Dans cette partie on va changer les conditions climatologiques ,on gardons les paramètres précédent de système.

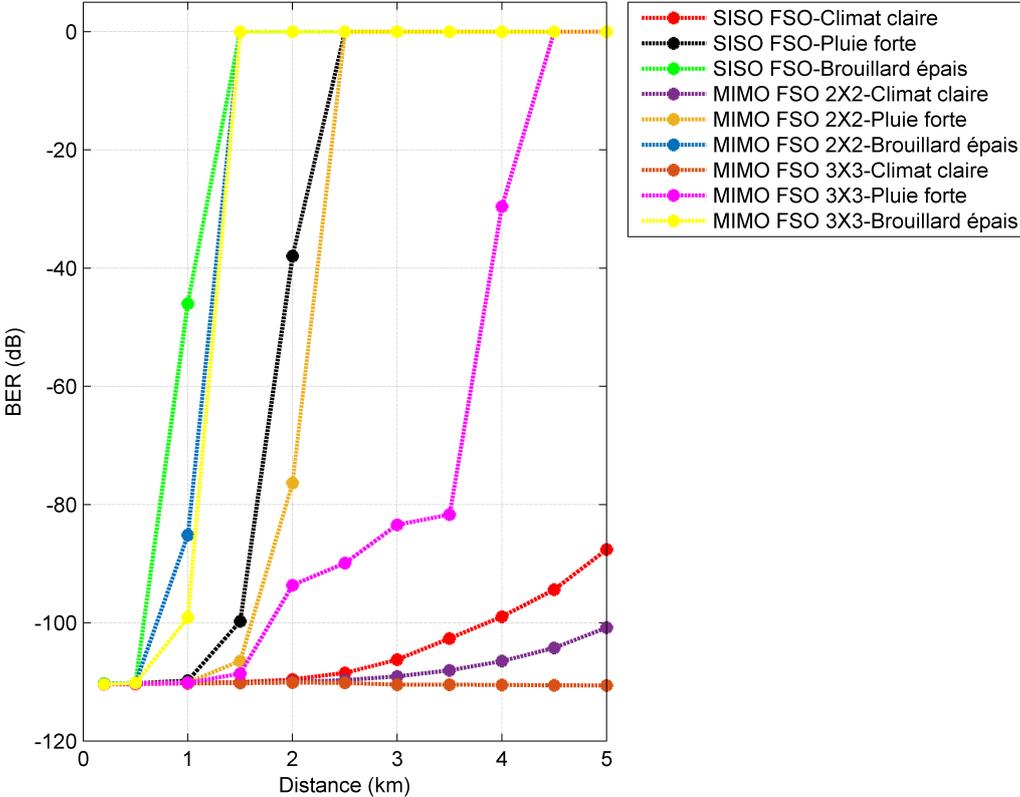


Figure. 3.22 – BER en fonction des conditions climatologiques.

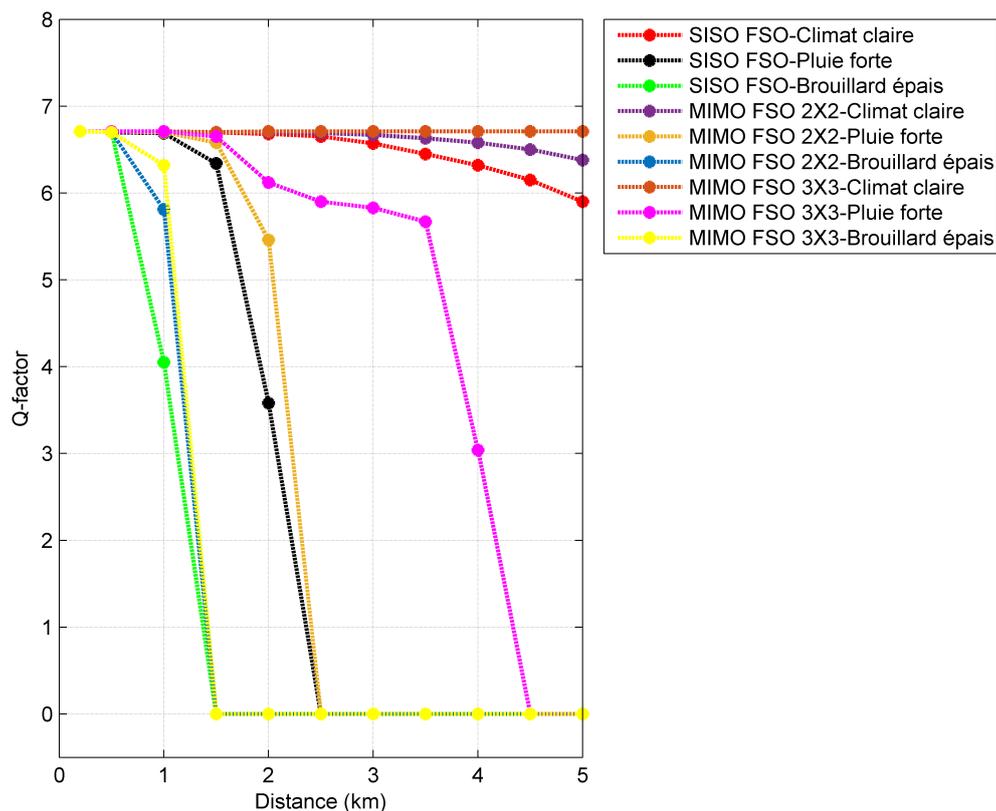


Figure. 3.23 – Facteur Q en fonction des conditions climatologiques.

Les figures 3.22 (BER) et 3.23 (Facteur Q) révèlent que les MIMO-FSO 2X2 et 3X3 améliorent la performance de la liaison.

Dans le climat clair les liaisons SISO, MIMO 2X2 et MIMO 3X3 gardent une bonne qualité de service jusqu'au 1.8 Km, 2 Km et 5 Km respectivement. Par contre la liaison MIMO 3X3 résiste aux turbulences climatologiques et allant à 800 m pour le brouillard épais et 1.5 Km pour la pluie forte comparativement avec les deux autres liaisons.

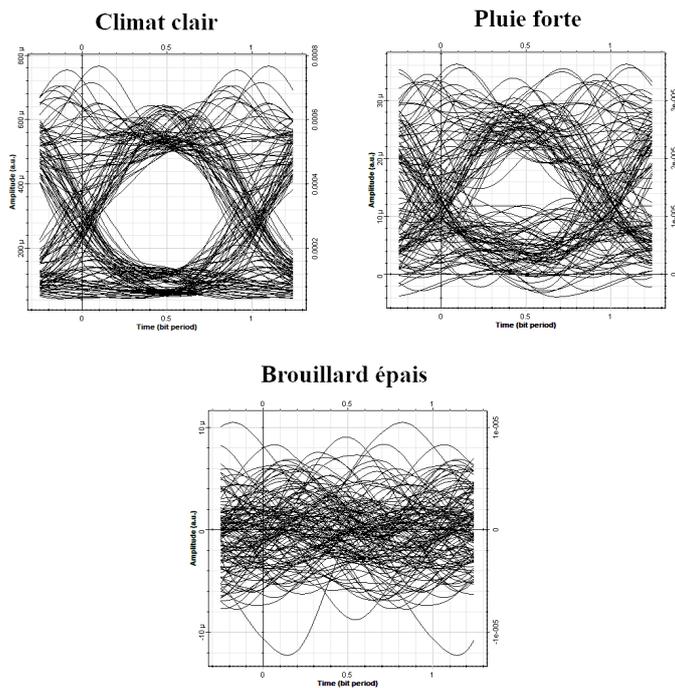


Figure. 3.24 – Les diagrammes d’œil du SISO-FSO à 2 Km dans les différents climats.

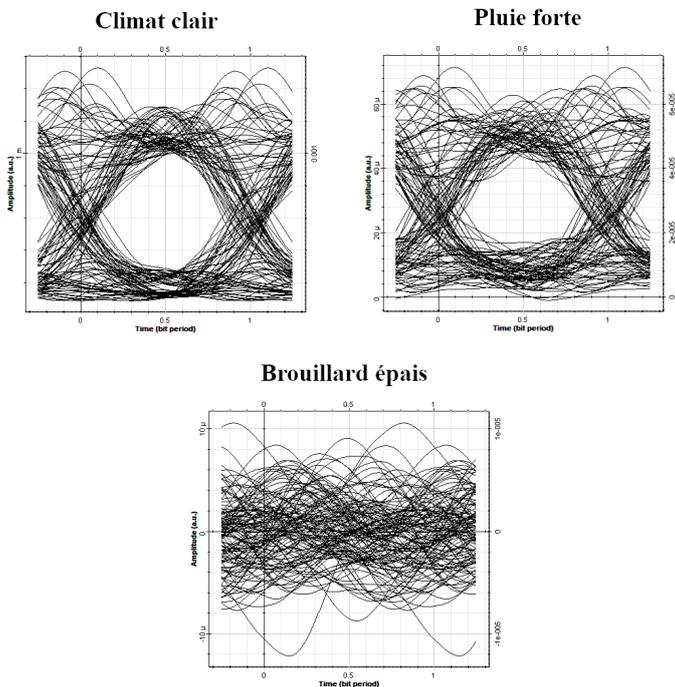


Figure. 3.25 – Les diagrammes d’œil du MIMO-FSO 2X2 à 2 Km dans les différents climats.

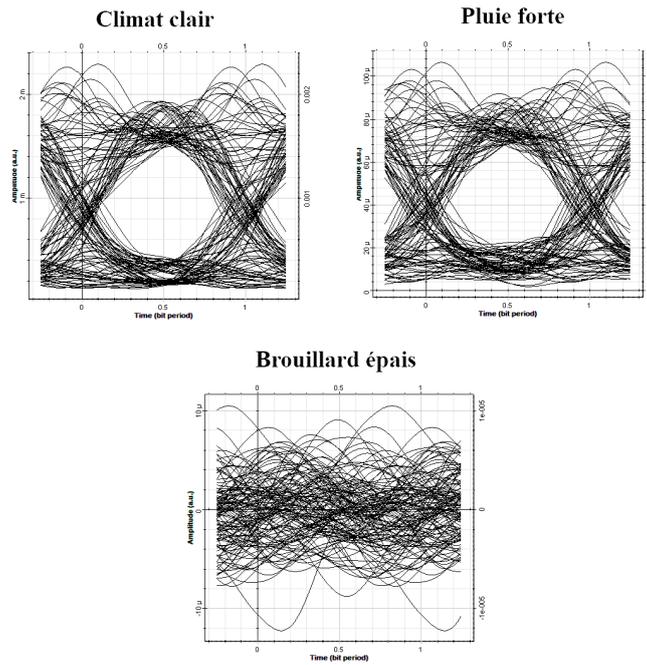


Figure. 3.26 – Les diagrammes d’œil du MIMO-FSO 3X3 à 2 Km dans les différents climats.

En observant les digrammes de l’œil, on peut facilement relever que le climat clair fournit une meilleure performance et une plus grande ouverture visuelle que celles de pluie fort et brouillard épais; le **TEB** diminue, ce qui augmente les interférences entre les symboles et pénalise la liaison.

3.5 Conclusion

Les atténuations causées par les conditions climatologiques avec le mauvais choix des paramètres de transmission constituent un obstacle majeur dans un système de communication **FSO** ce qui limite son utilisation dans les transmissions à longue distance. À partir des résultats obtenus et des paramètres choisis lors de notre étude, on peut constater qu’avec un multiplexage **DWDM** de **0.8 nm** et une antenne **FSO SISO** nous avons atteint un débit de l’ordre de **5.4 Tbps** allons à une distance de **1.8 Km** avec le climat clair et pour les deux autres climats (brouillard épais et pluie forte) respectivement **600 m** et **1 km**. Notre contribution est d’améliorer la qualité de transmission avec un **MIMO 3X3** allant à **5 km** pour le climat clair et pour les deux autres climats brouillard épais et pluie forte respectivement **800 m** et **1.5 Km** . Dans le but d’utiliser ce système hybride **DWDM-FSO MIMO 3X3** dans les nouvelles génération mobile **5G**, **6G** et **IOT**.

Conclusion générale et perspectives

La communication optique en espace libre (**FSO**), également appelée optique sans fil, est une technologie de communication optique basant sur la transmission des impulsions de lumière dans le champ de visibilité directe. En plus, elle est toujours essayée de satisfaire le besoin d'une bande passante élevée sur de courtes distances. Au lieu de transmettre les impulsions de lumière à travers la fibre optique. Les liaisons **FSO** sont de faibles coûts, simples et faciles à installer sans aucune licence. Mais le **FSO** est limité à des plages plus courtes en raison des turbulences atmosphériques, car les liaisons **FSO** dépendent fortement des conditions météorologiques.

Le succès de multiplexage en longueur d'onde **DWDM** consiste à exploiter au maximum toute la largeur de bande offerte par le support optique qui permet d'augmenter le débit en faisant circuler plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes sur ce support, en les mélangeant à l'entrée à l'aide d'un multiplexeur et en les séparant à la sortie au moyen d'un démultiplexeur.

Ce mémoire a pour but d'étudier les performances du système hybride **DWDM-FSO**. Notre objectif était d'étudier, et d'améliorer les performances d'un système **DWDM** en espace libre **FSO** utilisant une source lumineuse (**EML**) avec une puissance de **20 mW**, pour avoir un haut débit de l'ordre de **5.4 Tbps** avec **90** utilisateurs, en fonction de différents paramètres comme la puissance émise, la distance parcourue, les turbulences climatologiques.

Les performances de système hybride sont évaluées en termes de taux d'erreur binaire (**TEB**) de facteur de qualité (**Q**) et de diagramme d'œil, ceci en fonction des paramètres caractéristiques de la liaison **FSO**, à savoir: le débit, le type de modulation, la distance parcourue, les différents états climatologiques, ainsi que l'influence de nombre d'antenne. La contribution de cette étude, nous a permis d'avoir des meilleures qualités de service avec

une antenne **MIMO 3X3**, de facteur de qualité (**Q**) **6.3** et d'un taux d'erreur binaire (**BER**) de l'ordre de 10^{-10} avec le brouillard épais et une distance de **1000 m**.

Notre perspective est d'utiliser ce système hybride **DWDM FSO MIMO 3X3** haut débit dans la future génération **5G**, **6G** et **IOT**.

Bibliographie

- [1] HAUCHE Salim BOULILA Rachid. *'Etude des différents multiplexages dans les liaisons par fibre optique '*. 2012.
- [2] Difallah Billal Agoune Abdelouaheb. *'Analyse de la Suppression du Bruit pour les Systèmes SAC-OCDMA avec les Codes à Inter-Corrélation Fixe'*. 2020.
- [3] MILOUDI Walid BENAMMAR Amine. *'Etude d'une liaison optique WDM Radio sur Fibre'*. 2017.
- [4] *'RAPPORT UIT-R F.2106 Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre '*. 2007.
- [5] MESRI Lamia. *'Etude et analyse des performances du système FSO-SAC-OCDMA sous l'effet de mauvaises conditions météorologiques '*. 2019.
- [6] Ilyas BENKRAOUDA Yassine HARICHANE. *'Étude et évaluation des performances d'un système de communication sans fil optique en espace libre (FSO)'*. Juillet 2019.
- [7] AMMOUR ZOHRA BELHADJ HIBA NOUR EL IMENE. *'Etude et Simulation d'une liaison optique avec la technique WDM'*. jul 2019.
- [8] AISSA MADAOUI Soumia LARIBI Hidayet Fatima Zohra. *'Réseaux Mobiles et Services de Télécommunication '*. 2016.
- [9] Victor Girondin. *'Etude et modélisation d'un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio sur fibre de signaux ULB aux fréquences centimétriques - Simulation système et caractérisation d'une liaison radio sur fibre à modulation externe'*. Mai 2016.
- [10] BENARBIA Khalida. *'Etude des performances d'un système de communication optique dans l'espace libre (FSO) en utilisant la technologie DWDM'*. juin 2017.
- [11] Salaheldeen Khider Khalfalla Mohammed Ahmed. *'ANALYSIS OF FSO SIGNAL TRANSMISSION USING DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING TECHNOLOGY'*. 2021.

- [12] Moussaoui Faiza Rahmouni Imen. *'Etude et Optimisation des liaisons optiques'*. 2021.
- [13] J. Schuster H. Willebrand S. Bloom, E. Korevaar. *'Understanding the performance of free-space optics'*. juin 2003.

Résumé

Dans le cadre des systèmes de communications moderne, **5ème** génération et internet d'objet qui nécessite un haut débit et une bonne qualité de service performante, on s'est intéressé aux systèmes combinant la technique **DWDM** (multiplexage en longueur d'onde dense) et **FSO** (optique en espace libre).

La mémoire consiste à étudier les performances de système hybride **DWDM FSO**, en premier lieux on a étudié les différentes techniques de multiplexage, les composants qui constituent une liaison optique avec un rappel sur les différents types de sources optiques, des techniques de modulation. Nous avons vu par la suite la transmission optique en espace libre (**FSO**) avec les conditions climatologiques qui est un facteur néfaste dégrade la qualité de service de la liaison.

On s'intéresse à développer les performances de système hybride **DWDM-FSO** sous le logiciel Optisystem pour avoir un haut débit de l'ordre de **5.4 Tbps** avec **90** utilisateurs utilisés pour les future générations mobile (**5G,6G**) et l'internet d'objet (**IOT**), en fonction de différents paramètres comme la puissance ,la distance parcourue , les turbulences climatologiques. On se focalise sur l'influence de nombre d'antenne **MIMO FSO** qui nous a permis de donner des meilleures performances pour notre système hybride **DWDM MIMO FSO**.L'évaluation été faite par le facteur de qualité (**Q**) et le taux d'erreur binaire (**BER**), ainsi que le diagramme d'œil.

Abstract

In the context of modern communications systems, **5th** generation and Internet of Things that requires a high speed and a good quality of service performance, we are interested in systems combining the **DWDM** technic (dense wavelength division multiplexing) and **FSO** (free space optics).

The thesis consists in studying the performance of hybrid **DWDM FSO** system; first we studied the different multiplexing techniques, the components that constitute an optical link with a reminder on the different types of optical sources, modulation techniques. We saw thereafter the optical transmission in free space (**FSO**) with the climatologically conditions which is a harmful factor degrades the quality of service of the link.

We are interested in developing the performance of hybrid **DWDM-FSO** system under the Optisystem software to have a high throughput of the order of **5.4 Tbps** with **90** users used for future generations of mobile (**5G,6G**) and Internet of Things (**IOT**), depending on different parameters such as power, distance traveled, turbulence climate. We focus on the influence of the number of **MIMO FSO** antennas that allowed us to give better performance for our hybrid **DWDM MIMO FSO** system. The evaluation was done by the quality factor (**Q**) and the bit error rate (**BER**), as well as the eye diagram.

ملخص

وفي في إطار أنظمة الاتصالات الحديثة، والحيل الخامس و إنترنت الأشياء التي تتطلب سرعة عالية و خدمة عالية الجودة، نحن مهتمون بأنظمة تجمع بين تقنية DWDM (Dense wavelength division multiplexing) و الاتصالات البصرية في الفضاء الحر. تتكون هاته الأطروحة من دراسة أداء نظام DWDM FSO hybride ، أولاً درسنا تقنيات الإرسال المتعدد المختلفة، المكونات التي تشكل الروابط البصرية مع ذكر أنواع مختلفة من المصادر البصرية، وتقنيات التعديل. رأينا لاحقاً انتقالاً بصرياً في الفضاء الحر (FSO) مع ظروف مناخية وهو عامل ضار بجودة خدمة الاتصال. نحن مهتمون بتطوير أداء نظام DWDM FSO hybride في إطار برنامج Optisystem للحصول على سرعة اتصال عالية في حدود 5.4 تيرابت مع 90 مستخدماً نستخدمها للأجيال المستقبلية للهواتف الخلوية وإنترنت الأشياء (IOT) ، مرتكزا على عدة إعدادات مثل الطاقة المستخدمة، مسافة الإتصال و الاضطرابات الجوية. نركز على تأثير العديد من هوائيات MIMO-FSO التي سمحت لنا بتقديم أداء أفضل لنظام DWDM MIMO hybride . تم إجراء تقييم النتائج بواسطة عامل الجودة (Q) ومعدل الخطأ (BER) ، بالإضافة إلى Diagramme d'œil .