

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

UNIVERSITE Dr. TAHAR MOULAY – SAIDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de

Master en Télécommunication

Option : Système des télécommunications

## THEME

**Analyse comparative et simulation des performances des systèmes**

**(WDM/FSO et CWDM/FSO) multifaisceaux**

Présenté par

Megherbi Rahal & Berrahou Yasma

Soutenu publiquement, le 22/06/2023 devant le jury composé de :

Pr. Djellouli Bouazza	Président	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Dr. Berber Redouane	Examineur	Dr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Pr. Driss Khodja Fatima Z	Encadreur	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Dr. Khalfallah Bouhafs	Co-encadreur	Dr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda

*Année Universitaire 2022- 2023*

# Remerciements

*A*vant tout, nous remercions le bon Dieu de nous avoir aidé à réaliser ce présent travail.

*C*e travail a été effectué sous la direction de Madame **Driss Khodja Fatima Zohra**, Professeur à l'Université de Saïda. Nous tenons à la remercier pour la confiance qu'elle nous a témoignée, pour la disponibilité dont elle a fait preuve tout le long de ce travail et ses conseils judicieux nous furent d'une très grande utilité.

*E*n toute complémentarité, Monsieur **Khalfallah Bouhafs**, Docteur à l'Université de Saïda, a co-dirigé ce travail. Il a suivi ce travail avec beaucoup d'intérêt. Nous avons bénéficié pour la réalisation d'une partie de ce travail de son aide. Nous lui exprimons notre profonde reconnaissance pour son attention, sa disponibilité et ses encouragements

*N*ous sommes reconnaissantes à Monsieur **B. Djellouli**, Professeur à l'Université de Saïda, pour l'attention qu'il a portée à ce travail et nous le remercions d'avoir accepté de présider le Jury.

*N*ous tenons à manifester notre gratitude à Monsieur **R. Berber** Maître de Conférences à l'Université de Saïda, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail et nous le remercions d'avoir accepté de faire partie du Jury.

*E*nfin, nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants de la faculté de Technologie qui ont contribué à notre formation.

# Dédicaces

*Nous dédions ce modeste travail :*

*A Nos parents : Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de nos études.*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer nos respects, notre considération et*

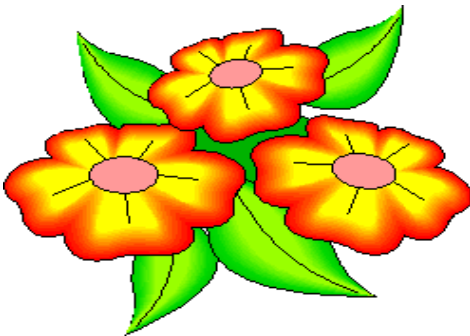
*Nos profonds sentiments envers eux.*

*A nos sœurs et nos frères*

*Qu'ils trouvent ici l'expression de nos sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de nous porter.*

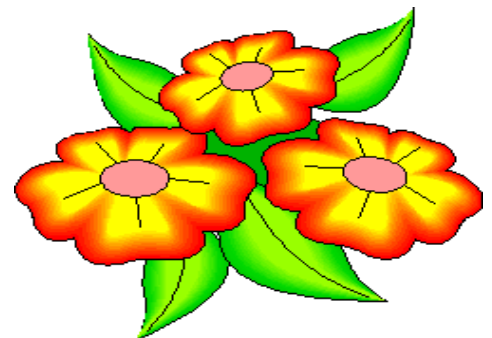
*A tous nos amis et nos collègues qu'ils trouvent ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.*

*A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin durant nos études.*



*BERRAHOU Yasma*

*MEGHERBI Rahal*



## **Résumé**

L'optique en espace libre (FSO) est une technologie clé capable à offrir un système de transmission optique à haut débit, plus sécurisé et économique aux systèmes de communication conventionnels. Elle présente de nombreux avantages, à savoir : une bande passante élevée, des taux de transmission de données très élevés, un spectre sans licence, un déploiement rentable, une faible consommation d'énergie et un coût moins élevé.

Les liaisons optiques atmosphériques sont aujourd'hui une technologie bien établie capable de transmettre des informations à très grande largeur de bande en utilisant un faisceau lumineux d'un point à un autre dans l'atmosphère. Cependant, les performances des liaisons FSO sont dégradées par l'atténuation atmosphérique due aux différentes conditions météorologiques.

Les liaisons FSO peuvent être déployées pour diverses applications, telles que : les liaisons inter-satellites, les liaisons terrestres et aussi dans les applications militaires. L'utilisation des techniques du multiplexage WDM et CWDM servent à augmenter la capacité d'exploitation de la liaison FSO, ainsi la transmission de données dans les systèmes de télécommunication optiques. L'étude des performances du système FSO conçue sera effectuée en utilisant deux techniques de multiplexage WDM et CWDM avec différents paramètres.

Le travail porte sur l'étude, l'évaluation et la comparaison des performances des deux systèmes de télécommunications WDM-FSO et CWDM-FSO multifaisceaux sous l'influence des différentes conditions météorologiques.

**Mots clés :** Liaison optique, FSO, transmission optique, WDM, CWDM, simulation, étude, qualité de transmission, facteur de qualité, TEB, diagramme de l'œil, OptiSystem, atténuation atmosphérique, conditions météorologiques.

## **Summary**

Free-space optics (FSO) is a key technology capable of providing a high-speed optical transmission system that is more secure and economical than conventional communication systems. Its many advantages include high bandwidth, very high data transmission rates, license-free spectrum, cost-effective deployment, low power consumption and lower cost.

Atmospheric optical links are today a well-established technology capable of transmitting very high bandwidth information using a beam of light from one point to another in the atmosphere. However, the performance of FSO links is degraded by atmospheric attenuation due to different weather conditions.

FSO links can be deployed for a variety of applications, including inter-satellite links, terrestrial links and military applications.

The use of WDM and CWDM multiplexing techniques serves to increase the operating capacity of the FSO link, and thus data transmission in optical telecommunication systems. The performance of the designed FSO system will be studied using two multiplexing techniques, WDM and CWDM, with different parameters.

The work covers the study, evaluation and comparison of the performance of the two WDM-FSO and CWDM-FSO multi-beam telecommunication systems under the influence of different weather conditions.

**Keywords :** Optical link, FSO, optical transmission, WDM, CWDM, simulation, study, transmission quality, quality factor, BER, eye diagram, OptiSystem, atmospheric attenuation, weather conditions.

## ملخص

تعد FSO Optics Space (Free) تقنية أساسية قادرة على توفير نظام نقل ضوئي عالي السرعة يكون أكثر أماناً وفعالية من حيث التكلفة من أنظمة الاتصالات التقليدية. لها العديد من المزايا، وهي: عرض النطاق الترددي العالي، ومعدلات نقل البيانات العالية جداً، والطيف غير المرخص، والنشر الفعال من حيث التكلفة، والاستهلاك المنخفض للطاقة، والتكلفة المنخفضة. الروابط البصرية في الغلاف الجوي هي الآن تقنية راسخة قادرة على نقل المعلومات بسرعات عالية جداً باستخدام حزمة من الضوء من نقطة إلى أخرى في الغلاف الجوي. ومع ذلك، فإن أداء توصيلات FSO يتدهور بسبب التوهين الجوي بسبب الظروف الجوية المختلفة. يمكن نشر روابط FSO لتطبيقات مختلفة، مثل وصلات بين الأقمار الصناعية ووصلات التوصيل وكذلك في التطبيقات العسكرية. يزيد استخدام تقنيات تعدد إرسال WDM و CWDM من القدرة التشغيلية لوصلة FSO، فضلاً عن نقل البيانات في أنظمة الاتصالات الضوئية. سيتم إجراء دراسة أداء لنظام FSO المصمم باستخدام تقنيات تعدد إرسال WDM و CWDM بمعلومات مختلفة. يركز العمل على دراسة وتقييم ومقارنة أداء أنظمة الاتصالات متعددة الحزم WDM-FSO و CWDM-FSO تحت تأثير ظروف الأرصاد الجوية المختلفة. الكلمات المفتاحية: الارتباط البصري، FSO، الإرسال البصري، WDM، CWDM، المحاكاة، الدراسة، جودة الإرسال، عامل الجودة، معدل خطأ البتات (BER) مخطط العين، التوهين الجوي، الظروف الجوية

# Table des matières

# Table des matières

Résumé	i
Table des matières	ii
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Liste des abréviations	viii
Introduction générale	1

## Chapitre I : Composants optoélectroniques pour un système FSO

I.1	Introduction	3
I.2	L'émetteur FSO	3
I.2.1	Sources optiques	3
I.2.2	Les modulateurs optiques	6
I.2.3	Les amplificateurs optiques	10
I.2.4	Paramètres d'un émetteur optique	11
I.3	Canal optique atmosphérique (FSO)	11
I.4	Le récepteur FSO	12
I.4.1	Photodiode PIN	12
I.4.2	Photodiode à avalanche PDA	12
I.4.3	Paramètres de récepteur optique	13
I.5	Conclusion	13

## CHAPITRE II : Les différentes techniques de multiplexages optiques dans les télécommunications

II.1	Introduction	14
II.2	Définition de multiplexage	14
II.3	Fonctionnement de système de multiplexage en optique	15
II.4	Les techniques de multiplexage	15
II.5	Principe de multiplexage en longueur d'onde	18
II.6	Les types de multiplexage WDM	18
II.7	Différents composants d'un système WDM	19
II.8	Les paramètres importants d'un système WDM	22
II.9	Avantages et inconvénients du multiplexage en longueur d'onde	23
II.10	L'avenir WDM	23
II.11	Le multiplexage en longueur d'onde CWDM	24
II.11.1	Principe	24
II.11.2	Caractéristique du multiplexage CWDM	25

II.11.3	Avantages et inconvénients du multiplexage CWDM	25
II.12	Une généralité sur les autres techniques	26
II.13	Conclusion	26

### **Chapitre III : Liaison optique FSO (Free Space Optic)**

III.1	Introduction	27
III.2	Principe de fonctionnement de FSO	27
III.3	Architecture de base de la technologie FSO	29
III.4	Caractéristiques d'une liaison FSO	30
III.5	Les paramètres d'une liaison FSO	31
III.6	Les avantages et les inconvénients des FSO	34
III.7	Applications des FSO	35
III.8	Atténuation	35
III.9	Sécurité	36
III.10	Conclusion	36

### **Chapitre IV : Résultats et discussion**

IV.1	Introduction	37
IV.2	Présentation du logiciel Optisystem	37
IV.3	Critères d'évaluation de la qualité d'une transmission	40
IV.4	Etude d'une liaison WDM/FSO	42
IV.4.1	Influence du débit sur la qualité de transmission	43
IV.4.2	Influence de la distance sur la qualité de transmission	45
IV.4.3	Effets de l'atmosphère sur la qualité de transmission du système WDM/FSO	46
IV.4.4	Distance maximale du système WDM/FSO dans différents cas climatiques	46
IV.4.5	Débit maximal du système WDM/FSO dans différents cas climatiques	47
IV.5	Etude d'une liaison CWDM/FSO	49
IV.5.1	Etude du débit maximal de la liaison CWDM/FSO pour différents cas de Pluie	50
IV.5.2	Etude de la distance de la liaison CWDM/FSO pour différents cas de Pluie	52
IV.6	Comparaison du System WDM/FSO et CWDM/FSO conçus	53
IV.7	Conclusion	54
	Conclusion générale	55
	Bibliographie	57

# Liste des tableaux

# Liste des tableaux

III-1	Évolution de débit chez « MRV », l'un des leaders dans l'industrie FSO	30
III-2	Valeurs de niveau d'atténuation en fonction de précipitations de pluie	36
IV-1	Longueurs d'ondes utilisées pour le système WDM/FSO	43
IV-2	Variation du facteur de qualité Q en fonction du débit	43
IV-3	Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance	45
IV-4	Les conditions climatiques et leurs atténuations	46
IV-5	Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance dans différents cas climatiques pour un system WDM/FSO	46
IV-6	Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie faible pour un système WDM/FSO	48
IV-7	Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie modéré pour un système WDM/FSO	48
IV-8	Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie forte pour un système WDM/FSO	48
IV-9	Longueurs d'ondes utilisées pour le système CWDM/FSO	50
IV-10	Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie faible pour un système CWDM/FSO	51
IV-11	Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie faible pour un système CWDM/FSO	51
IV-12	Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie modéré pour un système CWDM/FSO	51
IV-13	Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie forte pour un système CWDM/FSO	51
IV-14	Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance dans différents cas climatiques pour un system CWDM/FSO	52

# Liste des figures

# Liste de figures

I-1	Schéma synoptique du bloc émetteur FSO	3
I-2	Diode électroluminescente (DEL)	4
I-3	Les couleurs de diodes	4
I-4	Fonctionnement d'une LED	5
I-5	Principe de base d'une chaîne de transmission optique avec une modulation directe	6
I-6	Principe de base d'une émission à modulation externe	6
I-7	Synoptique de la modulation directe	7
I-8	Synoptique de la modulation externe	7
I-9	La modulation PSK	8
I-10	La modulation ASK	9
I-11	La modulation QAM	9
I-12	La modulation FSK	9
I-13	Les différentes utilisations des amplificateurs optiques	10
I-14	Récepteur optique	12
II-1	Schéma de principe d'un système de multiplexage	14
II-2	Schéma de principe de multiplexage temporel	16
II-3	Schéma de principe de multiplexage fréquentiel	16
II-4	Système utilisant la technique du CDMA	17
II-5	La technique de multiplexage WDM	18
II-6	Schéma de principe du multiplexage en longueur d'onde	18
II-7	Multiplexeur à insertion/ extraction (Add/Drop)	21
II-8	Principe du Multiplexage CWDM	24
III-1	Système de communication FSO en visibilité directe	27
III-2	Schéma d'une liaison optique sans fil terrestre	28
III-3	Transmetteurs (Tx-Rx) d'une unité FSO	28
III-4	Communication FSO	29
III-5	Topologies de réseaux optiques en espace libre	30
IV-1	Fenêtre principale du logiciel Optisystem a fenêtre réparti en plusieurs parties	38
IV-2	Bibliothèque des composants	38
IV-3	Default	38

IV-4	Recherche d'un Générateur de bit aléatoire	39
IV-5	Éditeur du layout	40
IV-6	Navigateur de projet	40
IV-7	Diagramme de l'œil	41
IV-8	Taux d'erreur binaire en fonction de facteur de qualité	42
IV-9	Chaîne de transmission WDM/FSO de 8 canaux	43
IV-10	Variation du facteur de qualité Q en fonction du débit	43
IV-11	Diagramme de l'œil du canal 1 (a) et canal 7 (b) pour un débit de 1Gbps et 4km de distance dans un système WDM/FSO	44
IV-12	Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance	45
IV-13	Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance dans différents cas climatiques	47
IV-14	Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal dans trois intensités de pluie (faible, modéré et forte) pour une liaison WDM/FSO	49
IV-15	Variation du facteur de qualité en fonction du débit par liaison dans trois intensités de pluie (faible, modéré et forte) pour une liaison WDM/FSO	49
IV-16	Chaîne de transmission CWDM/FSO de 8 canaux	50
IV-17	Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal dans trois intensités de pluie (faible, modéré et forte) pour une liaison CWDM/FSO	52
IV-18	Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance dans différents cas climatiques pour un système CWDM/FSO	53

# Liste des abréviations

## Liste des abréviations

<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BF</b>	Base Fréquence
<b>CDM</b>	Code Division Multiplexing
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CWDM</b>	Coarse Wavelength Division Multiplexing
<b>DEL</b>	Diode Electroluminescente
<b>DD</b>	Détection Directe
<b>DL</b>	Diode Laser
<b>DWDM</b>	Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>EDFA</b>	Erbium Doped Fiber Amplifier
<b>FDM</b>	Frequency Division Multiplexing
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>FSK</b>	Frequency Shift Keying
<b>IMZ</b>	Interféromètre de Mach Zehnder
<b>IWOC</b>	Indoor Wireless Optical communications
<b>LASER</b>	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>LOA</b>	Liaison Optique Atmosphérique
<b>LOS</b>	Line-Of-Sight
<b>MEA</b>	Modulateur électro-absorbant
<b>MUX</b>	Multiplexeur
<b>OADM</b>	Optical Add /Drop MuX
<b>OFDM</b>	Optic Frequency Division Multiplexing
<b>OTDM</b>	Optic Frequency Division Multiplexing
<b>PDA</b>	Photo Diode à Avalanche
<b>PIN</b>	Positive Intrinsic Negative Photodiodes
<b>PN</b>	Positive Negative Photodiodes
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying

<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>SOA</b>	optique à semi-conducteurs
<b>SNR</b>	Signal Noise Ration
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing
<b>WDMA</b>	Wavelength Division Multiple Access
<b>WOC</b>	Wireless Optical Communication
<b>WWDM</b>	Wide Wavelength Division Multiplexing
<b>U-DWDM</b>	Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>ULH</b>	Ultra Long Haul
<b>VLH</b>	Very Long Haul

# Introduction générale

# Introduction Générale

Au cours des dernières décennies, les nouvelles technologies de transmission et la mise en réseau ont connu une croissance considérable. Les systèmes de télécommunication optiques mettent en jeu un ensemble d'éléments, à commencer par les composants d'émission/réception de la lumière, le média de propagation qu'est la fibre optique, les amplificateurs optiques, ainsi que les composants spécifiques pour le multiplexage en longueur d'onde.

Free Space Optics (FSO) est une technologie qui permet la transmission de données à haut débit à l'aide de faisceaux lumineux. Les premières recherches sur la communication optique en espace ouvert ont commencé dans les années 1960. À l'époque, les chercheurs étudiaient la possibilité d'utiliser des lasers pour transmettre des signaux entre des stations au sol et des satellites.

Dans les années 1980 et 1990, plusieurs entreprises et chercheurs ont commencé à développer des systèmes FSO pour des applications terrestres. Les progrès des lasers, des détecteurs et de la technologie de modulation optique ont amélioré la portée et la fiabilité de la transmission. Au début du 21<sup>e</sup> siècle, les premiers systèmes FSO commerciaux ont été introduits. Ils étaient principalement utilisés pour les connexions à haut débit dans les zones urbaines où les câbles optiques souterrains étaient coûteux ou difficiles à déployer.

Au fil des ans, la technologie FSO n'a cessé d'évoluer et de s'améliorer. Amélioration des performances du système de traçage automatique des rayons, de la résistance aux intempéries, du brouillard, de la pluie et de la neige.

Le FSO est devenu une alternative populaire aux technologies de communication traditionnelles dans les situations où les câbles à fibre optique et les liaisons radio sans fil sont limités. Il est utilisé dans des applications telles que la connectivité haut débit rurale, les liaisons de secours, les réseaux militaires, la connectivité entre bâtiments et la connectivité de liaison.

Aujourd'hui, FSO continue de croître avec l'émergence de nouvelles technologies telles que les communications optiques par satellite et les réseaux à haut débit pour la diffusion de contenu. Des recherches sont également menées pour augmenter la vitesse de transmission, étendre la portée des communications et améliorer la résistance aux turbulences atmosphériques.

En résumé, le FSO a parcouru un long chemin depuis sa création dans les années 1960, passant d'une technologie expérimentale à une solution commerciale pratique pour la transmission de données à grande vitesse et à courte portée à l'aide de faisceaux optiques.

Le multiplexage par répartition en **longueur d'onde (WDM)** est l'une des technologies

qui a permis la croissance rapide des communications optiques.

Le débit du multiplexage temporel (**TDM**) par canal est passé de 2,5 Gbit/s à 10 Gbit/s, tandis que le débit du multiplexage temporel (**TDM**) par canal est passé de 2,5 Gbit/s à 10 Gbit/s et bientôt à 40 Gbit/s. **WDM** et ses produits dérivés continuent de faire progresser la combinaison de la capacité de transmission et de la fibre optique.

Le **WDM** (Wavelength Division Multiplexing) est une méthode utilisée dans les télécommunications pour améliorer les performances des réseaux à fibre optique.

Cela permet à plusieurs signaux avec différentes longueurs d'onde optiques d'être transmis sur une seule fibre optique.

**CWDM** (Coarse Wavelength Division Multiplexing) est une méthode utilisée dans les télécommunications qui multiplexe plusieurs signaux optiques sur une seule fibre optique en utilisant des longueurs d'onde relativement séparées dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés à la conception et l'analyse d'une **liaison optique FSO** en utilisant **les techniques WDM et CWDM**. Notre objectif consiste à analyser et comparer les performances des systèmes (**WDM/FSO et CWDM/FSO**) par la détermination du facteur de qualité (Q) et du taux d'erreur binaire (**BER**). La conception des systèmes **FSO** proposés a été simulée sous le logiciel OptiSystem

Le manuscrit est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons les différents composants optoélectroniques constituant une liaison optique atmosphérique FSO.

Le second chapitre présente l'ensemble des techniques de multiplexage dans les systèmes de transmissions optiques particulièrement le multiplexage WDM et le multiplexage CWDM, ainsi que les différentes solutions pour augmenter la capacité totale d'un système WDM.

Le troisième chapitre sera consacré la technologie d'une liaison optique sans-fil en espace libre.

Le quatrième chapitre est consacré aux résultats et discussion. Enfin, nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale et les perspectives offertes par ce travail.

# Chapitre I : Composants Optoélectroniques pour un Système FSO

## I.1 Introduction

L'optoélectronique est une discipline émergente qui utilise conjointement l'électronique et l'optique. Elle a des portées importantes dans divers domaines, en particulier en informatique, en électronique médicale et en télécommunication.

L'objectif de ce chapitre est de comprendre le principe de fonctionnement et les propriétés des différents éléments d'une chaîne de transmission en espace libre (FSO) en étudiant les composants capables d'émettre, de transmettre et de recevoir des signaux optiques.

### I.2 L'émetteur FSO

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 I-1 présente un schéma d'un module émetteur de transmission optique en espace libre [1].

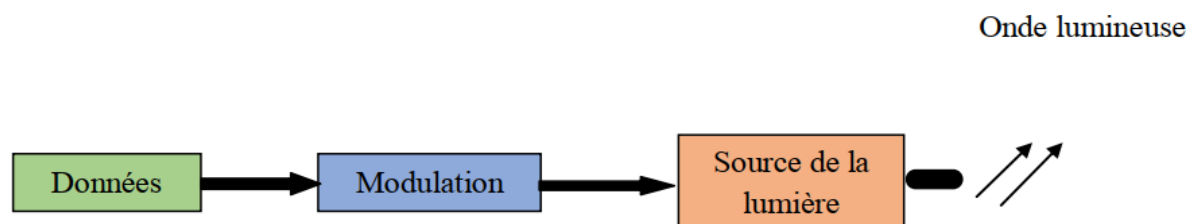


Figure I-1 : Schéma synoptique du bloc émetteur FSO.

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 radians et quelques microradians [1].

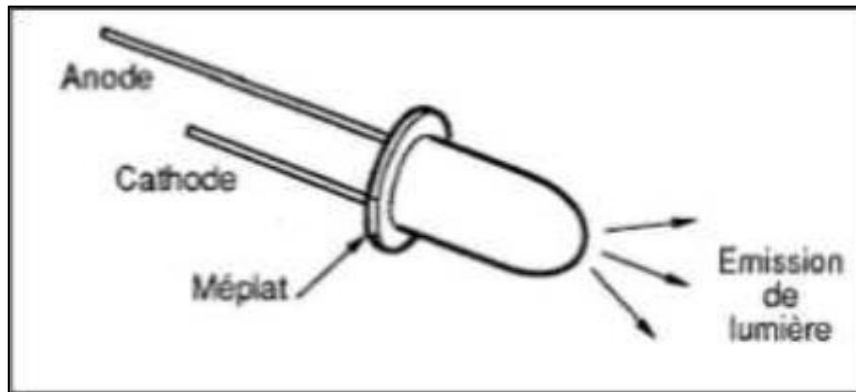
#### I.2.1 Sources optiques

Les sources optiques sont des composants actifs qui transforment les impulsions électriques en impulsions lumineuses avec un intense rayonnement, consommation de faible puissance, temps de réponse rapide, modulable facilement, fiable et économique. En télécommunication optique, il existe deux catégories de sources optiques, à savoir : les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL). Elles sont réalisées à partir de jonctions PN polarisées en direct et fondées sur la recombinaison des paires électron-trou.

##### I.2.1.1 Les diodes électroluminescentes (LED : Light-Emitting Diode)

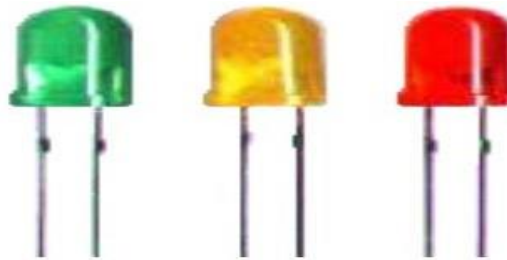
Les diodes électroluminescentes [5] sont des composants optoélectroniques et des structures semi-conductrices émettant de la lumière. Due à leur puissance d'émission relativement faible, elles sont généralement utilisées dans des applications sur des courtes

distances (bas débits) avec des besoins spectraux modérés, jusqu'à 155 Mbps [3], telle que : les liaisons optiques sans fil à l'intérieurs des bâtiments (Indoor Wireless Opticalcommunications « IWOC ») [2]. Elles ne sont pas constituées de silicium, mais d'autres matériaux semi-conducteurs comme l'arséniure de gallium ; de ce fait la tension présente à leurs bornes lorsqu'elles sont conductrices n'est pas 0.6 V, mais elle vaut de 1.6 V à 2.5 V suivant la couleur de la lumière émise. La diode est représentée par la figure I-2 suivante :



**Figure I-2 :** Diode électroluminescente (DEL).

Les diodes électroluminescentes (Figure I-3) sont fabriquées en rouge, jaune, et verte. Ces couleurs ne préviennent pas du boîtier, mais du matériau semi-conducteur utilisé. Celui-ci détermine aussi la différence de potentiel entre anode et cathode, plus élevée que pour les diodes au silicium : environ 1.5V pour le rouge, 2.5 V pour le jaune, et près de 3 V pour le vert. Pour que celle-ci soit lumineuse, il faut y faire circuler un courant d'intensité généralement voisine de 10 mA [4].



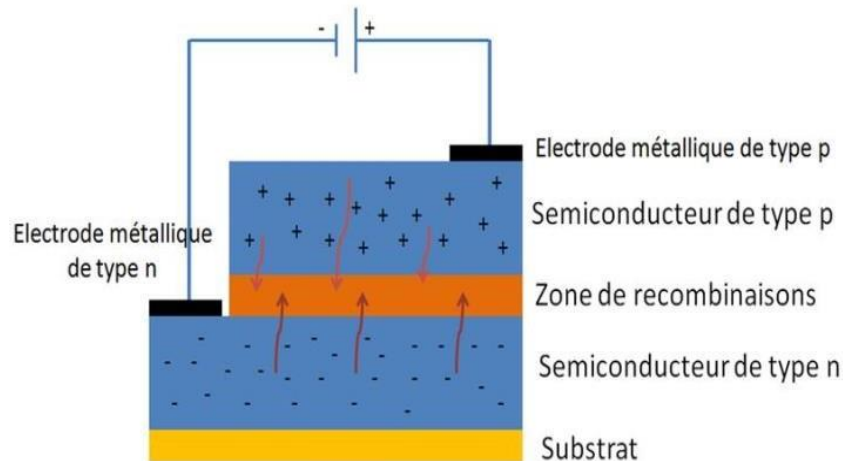
**Figure I-3 :** Les couleurs de diodes (DEL).

- **Mécanisme d'émission**

La recombinaison d'un électron et d'un trou d'électron dans un semi-conducteur conduit à l'émission d'un photon. En effet, la transition d'un électron entre la bande de conduction et la bande de valence peut se faire avec la conservation du vecteur d'onde (Figure I-4). Elle est alors radiative (émissive) c'est-à-dire accompagnée de l'émission d'un photon. Dans une transition émissive, l'énergie du photon créé est donnée par la différence des niveaux d'énergie avant ( $E_i$ ) et après ( $E_f$ ) la transition :

$$h\nu = E_i - E_f(\text{eV}) \quad (\text{I-1})$$

Une diode électroluminescente est une jonction P-N qui doit être polarisée en sens direct. Lorsqu'on veut émettre de la lumière. Le potentiel imposé aux bornes doit être supérieur à celui imposé par la jonction P-N. La plupart des recombinaisons sont radiatives. La face émettrice de la LED est la zone P car c'est la plus radiative [6].



**Figure I-4** : Fonctionnement d'une LED.

#### I.2.1.2 Les diodes laser

Le LASER est un acronyme pour "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (amplification de la lumière par l'émission stimulée de rayonnement). La diode laser présente 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. Ce composant produit une puissance optique beaucoup plus importante que les LEDs avec un spectre plus fin, et peuvent donc coupler plus de puissance avec la fibre. La différence avec les LEDs et que les lasers disposent sur les deux côtés de deux miroirs pour obtenir plusieurs allers retours dans le milieu en constituant ainsi une cavité optique. Pour les télécommunications on choisit une composition GaInAsP qui émette à 1.3  $\mu\text{m}$  ou 1.55  $\mu\text{m}$  [7,12]. 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.

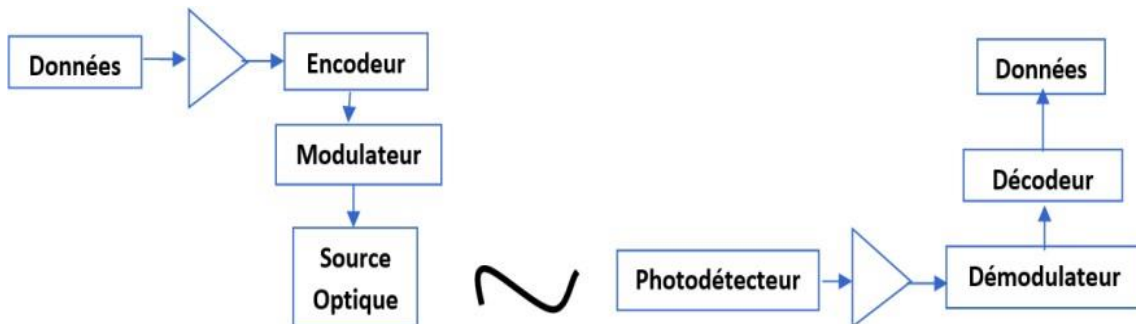
Dans la plupart des cas, les lasers à semi-conducteurs sont le choix préféré pour les entreprises qui ont besoin d'une source de lumière de puissance élevée et cohérente dans leur conception du système. Les lasers à semi-conducteur sont constitués [8].

- D'un milieu amplificateur qui utilise la propriété d'émission stimulée de photons dans une jonction PN où l'inversion de population entre les bandes de valence et de conduction est assurée par une injection de charges électriques.
- D'une cavité résonnante permettant de sélectionner les modes d'oscillation.

### I.2.2 Modulateurs optiques

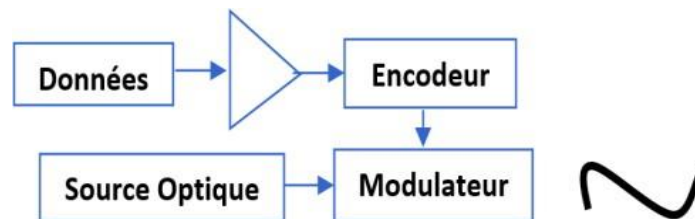
Un modulateur est un dispositif capable de modifier les paramètres d'onde optique. Deux méthodes sont utilisées pour moduler les ondes optiques ; la modulation directe et la modulation externe.

I-5 présente une chaîne de transmission optique utilisant une modulation directe.



**Figure I-5** : Principe de base d'une chaîne de transmission optique avec une modulation directe.

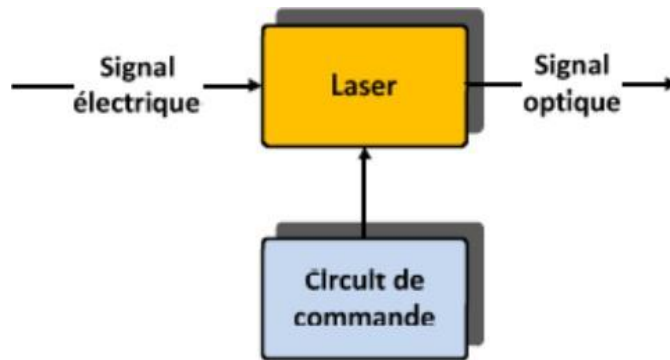
La figure I-6 présente le principe de base d'une émission à modulation externe



**Figure I-6** : Principe de base d'une émission à modulation externe [17].

#### A- Modulation directe

La modulation directe a pour but de moduler le courant d'alimentation de la diode laser, ce qui entraîne une modulation de la puissance optique délivrée (Figure I-7) Cependant, le niveau de puissance délivrée est souvent très faible (la tension appliquée n'est que de 2 à 3 Volts), et l'utilisation d'amplificateurs optiques s'impose dans le cas des transmissions sur des longues distances[16].



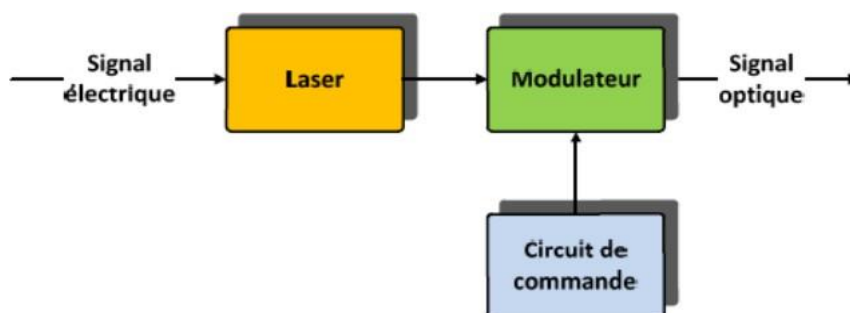
**Figure I-7 :** Synoptique de la modulation directe.

La modulation directe du courant d'injection de la diode laser est une modulation d'intensité optique ou de puissance optique, mais ce n'est pas la modulation de l'intensité du courant. Cette modulation, s'accompagne d'une modulation parasite appelée chirp. C'est un phénomène de conversion puissance - fréquence [9].

Le chirp est responsable de l'élargissement de la largeur de la raie d'une impulsion optique émise par le laser, de l'apparition de raies latérales dans le spectre de modulation, et l'association de la modulation intensité-fréquence engendre une dissymétrie des raies latérales du spectre optique par rapport à la raie centrale qui correspond à la porteuse optique [10].

### **B- La modulation externe**

Dans ce type de modulation (voir figure I-8), Le champ émis par la source optique n'est pas modulé et passe par un circuit optique spécial ou l'on provoque une modulation de phase ou d'amplitude. Ces modulateurs soumettent plusieurs moins 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.



**Figure I-8 :** Synoptique de la modulation externe.

Il existe deux types de modulateurs externes : les modulateurs de type Mach-Zehnder (IMZ) et les modulateurs électro-absorbant (MEA).

### \*- Les modulateurs à électro-absorption (MEA)

Le principe de fonctionnement des modulateurs à électro-absorption repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur soumis à un champ électrique. Leur particularité intéressante est qu'ils peuvent être facilement intégrés avec les diodes lasers pour créer des sources optiques compactes et à très large bande de modulation [14].

### \*- Le modulateur d'intensité de Mach-Zehnder (IMZ)

Les modulateurs de Mach-Zehnder sont des modulateurs électro-optiques que l'on place directement en sortie du laser. Ils sont fréquemment utilisés pour les applications de télécommunication large bande.

Le principe de fonctionnement, consiste à effectuer une modulation de l'intensité lumineuse en faisant varier la phase dans un interféromètre.

## C- Techniques de modulation optique

Il existe quatre (4) techniques de modulation optique :

### C-1 Modulation de phase ou PSK (Phase Shift Keying)

La modulation de phase (Figure I-9) associe à un code binaire une valeur de la phase de la porteuse. La vitesse peut être facilement augmentée en utilisant un code binaire sur 2, 3 bits ou plus sans augmentation de la fréquence de la porteuse.

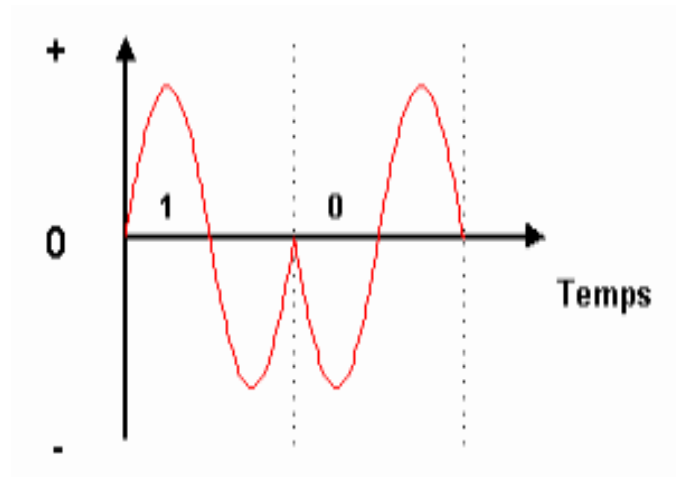
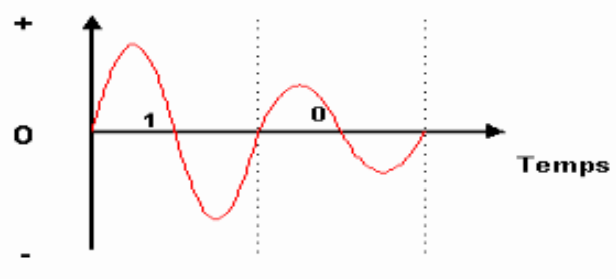


Figure I-9 : La modulation PSK.

### C-2 Modulation d'amplitude ou ASK (Amplitude Shift Keying)

La modulation d'amplitude (Figure I-10) s'applique en faisant varier l'amplitude du signal en fonction des bits à coder. Par exemple :



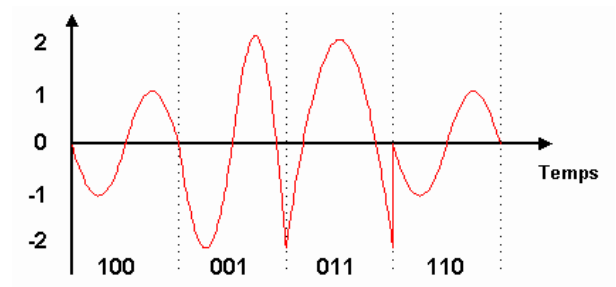
**Figure I-10 :** La modulation ASK.

A noter que la modulation d'amplitude est la seule utilisable sur fibre optique, car les équipements utilisés actuellement ne sont pas en mesure d'appliquer une autre modulation sur les ondes lumineuses. Dans ce cas, la modulation s'effectue par tout ou rien.

Par contre, elle est peu employée sur d'autres supports, car elle provoque une détérioration du rapport signal sur bruit.

### C-3 Modulation QAM

La modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) ou modulation d'amplitude en quadrature de phase (Figure I-11) est une technique qui emploie une combinaison de modulation de phase et d'amplitude. Elle est largement employée par les modems pour leur permettre d'offrir des débits binaires élevés.

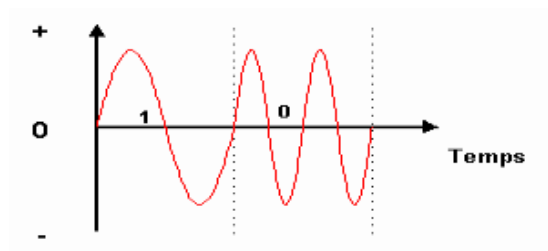


**Figure I-11 :** La modulation QAM.

### C-4 Modulation de fréquence ou FSK (Frequency Shift Keying)

En modulation de fréquence, les niveaux logiques sont représentés par la variation de la fréquence de la porteuse. Par exemple :

La modulation FSK (Figure I-12) est utilisée pour des transmissions à faible débit sur le réseau téléphonique commuté [24].

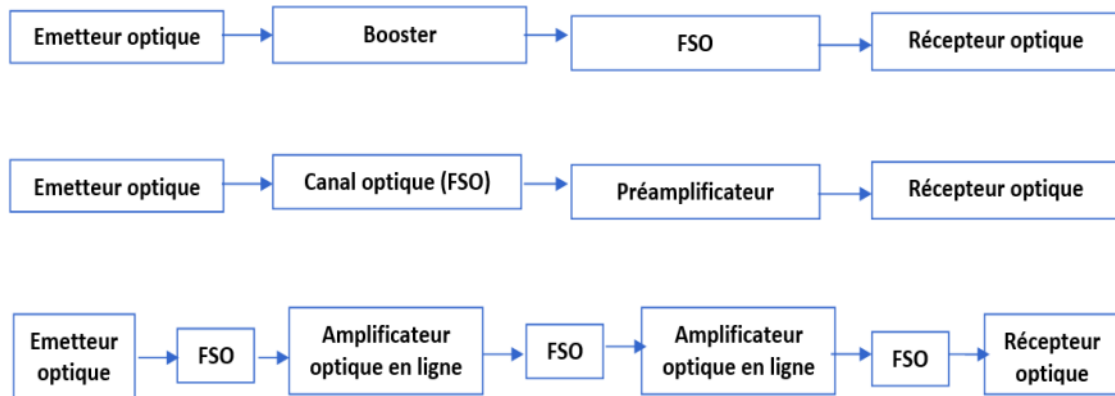


**Figure I-12 :** La modulation FSK.

### I.2.3 Les amplificateurs optiques

La fonction d'un amplificateur optique est de générer du gain directement en optique, c'est-à-dire sans conversion du signal optique en signal électrique puis conversion du signal électrique amplifié en signal optique. Ce type d'amplificateur est généralement indépendant du signal électrique (analogique, numérique, fréquence, débit...) qui module la porteuse optique, il amplifie le signal au même titre que son bruit associé.

L'amplification optique peut avoir lieu en trois points d'une liaison qui correspondent aux trois amplifications principales d'un amplificateur optique (voir la figure I-13).



**Figure I-13** : Les différentes utilisations des amplificateurs optiques.

C'est en fonction de son rôle que le choix d'un amplificateur optique doit se faire. Il peut servir d'amplificateur de puissance en émission (booster), de préamplificateur en réception ou d'amplificateur en ligne. Selon l'utilisation qui en est faite, les paramètres diffèrent. On exigera par exemple à un amplificateur de puissance d'être capable de délivrer une puissance de sortie élevée et de caractéristiques de bruit assez peu critiques, tandis qu'un préamplificateur doit être le moins bruyant possible. L'amplificateur en ligne sera un compromis pour ne pas dégrader la qualité du signal transmis et d'allonger la distance de transmission.

Nous trouvons trois types d'amplificateurs optiques utilisés dans les systèmes de transmission optique, à savoir :

#### A)- Amplificateur optique à semi-conducteurs (SOA)

Développé dans les années 1980, l'amplificateur optique à semi-conducteur (Semi Conductor Optical Amplifier) utilise le même principe de fonctionnement qu'un laser, avec un pompage électrique par injection de courant. Le SOA présente l'avantage d'intégration monolithique avec d'autres composants, il présente cependant des non-linéarités surtout à saturation de gain.

#### B)- Amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium

L'amplificateur à fibre optique dopé à l'erbium est une technologie clef sur laquelle reposent les stations intermédiaires dans un système de transport longue distance. Les EDFA

permettent d'amplifier simultanément toutes les longueurs d'ondes, sans conversion des signaux optiques en signaux électriques.

Les éléments de base d'un amplificateur optique dopé à l'erbium sont : la fibre monomode dont le cœur contient des ions de terre rare (l'erbium pour l'amplification autour de 1,55 $\mu$ m), et laser de pompage de forte puissance, et un multiplexeur pour coupler la pompe (laser) et le signal à l'intérieur de la fibre, et l'isolateur optique (des filtres) peuvent également être utilisés pour égaliser le gain dans la plage d'amplification. Lorsqu'un signal lumineux passe à travers le 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.

### C)- Amplificateur à effet Raman

L'amplificateur Raman utilise l'effet non-linéaire de la diffusion Raman dans la fibre optique. Son gain atteint quelques dizaines de décibels, mais l'importante dégradation du rapport signal à bruit en fort gain, limite l'utilisation de cet amplificateur à de faibles gains.

#### I.2.4 Paramètres d'un émetteur optique

Les paramètres qui caractérisent un émetteur optique, sont les suivants :

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

### I.3 Canal optique atmosphérique (FSO)

Le canal de propagation constitue le milieu atmosphérique. C'est un milieu très complexe et dynamique pouvant affecter les caractéristiques du faisceau laser émis. En plus, les systèmes FSOs sont soumis à un certain nombre de défis liés pour la plupart aux facteurs environnementaux et plus particulièrement aux effets de l'atmosphère sur la propagation du faisceau émis. La propagation d'une onde lumineuse dans l'atmosphère est affectée principalement par la diffusion et l'absorption du rayonnement des particules et les molécules composant le milieu. Les liaisons FSOs sont ainsi soumises à des contraintes pénalisantes imposées par le milieu de propagation atmosphérique qui ne constitue pas un milieu idéal de propagation en raison de la variation spatiotemporelle de ses caractéristiques physiques et de la diversité de ses constituants. Ces contraintes entraînent une extinction du signal optique au cours de sa propagation et donc une limitation de la portée. L'extinction atmosphérique est causée par un certain nombre de phénomènes sélectifs en longueurs d'onde : l'absorption moléculaire caractérisée par une forte dépendance spectrale, la diffusion moléculaire

(diffusion Rayleigh), l'extinction (absorption et diffusion) par les particules en suspension (aérosols), en précipitation (pluie, neige, etc.), et la turbulence atmosphérique due aux variations spatio-temporelles de l'indice de l'air (scintillations, fluctuation spatiale du faisceau...) [18].

## I.4 Le récepteur FSO

De même que pour les modules d'émission, l'interface d'un module de réception est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation possible.

Ce rôle est tenu par la photo détectrice qui se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. La première propriété requise pour un photo-détecteur est la sensibilité à la longueur d'onde utilisée, la deuxième, la rapidité et la troisième, l'apport minimum de bruit. Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photo-détecteurs à semi-conducteurs, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser. La figure I-14 illustre le schéma du bloc de récepteur optique.

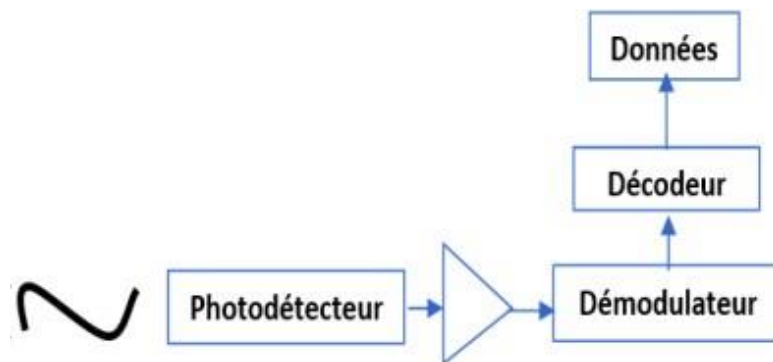


Figure I-14 : Récepteur optique.

Le photo-détecteur est un semi-conducteur de jonction PN polarisée en inverse permet la conversion du signal optique reçu (les photons) en signal électrique par l'effet photoélectrique. Les photodiodes peuvent être classées en deux catégories : celles qui n'ont aucun gain interne PN et PIN, et celles qui ont un gain interne Avalanche (APD) [19].

### I.4.1 Photodiode PIN

Les photodiodes PIN (Positive Intrinsic Negative). Ce sont également des composants à semi-conducteurs qui possèdent une région intrinsèque (faiblement dopée) prise en sandwich entre une région de type P et une région de type N. Lorsqu'il est polarisé en inverse, ce composant émet un courant proportionnel à la puissance optique incidente. Les photodiodes PIN sont les plus utilisés, car elles sont peu coûteuses et simples à utiliser avec une performance satisfaisante.

### I.4.2 Les photodiodes à avalanche PDA

La photodiode à avalanche a une fonction similaire à la jonction PN et à la photodiode PIN, la seule différence c'est que la tension de polarisation inverse élevée est appliquée dans le cas de photodiode à avalanche afin d'obtenir une multiplication par avalanche.

L'augmentation de génération de porteurs de charge par l'application d'une tension de polarisation inverse élevée à la photodiode d'avalanche ne se fait pas d'une façon directe. Cependant, il fournit de l'énergie aux paires électron-trou générées par la lumière incidente. Lorsque l'énergie lumineuse est appliquée à la photodiode d'avalanche, des paires électrons trou sont générées dans l'épuisement. Les paires électron-trou générées éprouvent une force due au champ électrique de région d'épuisement et au champ électrique externe. Dans une photodiode à avalanche, une tension de polarisation inverse très élevée fournit une grande quantité d'énergie aux porteurs minoritaires (paires électron-trou). Les transporteurs minoritaires qui gagnent une grande quantité d'énergie sont accélérés à des vitesses plus élevées [20].

Lorsque les électrons libres se déplaçant à grande vitesse entrent en collision avec l'atome, ils frappent plus d'électrons libres. Les électrons libres nouvellement générés sont de nouveau accélérés et entrent en collision avec d'autres atomes. En raison de cette collision continue avec les atomes, un grand nombre de porteurs minoritaires sont générés. Ainsi, les photodiodes d'avalanche génèrent plus de porteurs de charges que les photodiodes PN et PIN. Les photodiodes d'avalanche sont utilisées dans les applications où un gain élevé est un facteur important [20].

### **I.4.3 Paramètres de récepteur optique**

Les paramètres qui caractérisent un récepteur optique, sont les suivants :

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

## **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous décrivons en termes généraux les différents composants optoélectroniques qui peuvent être conçus pour les systèmes FSO, à savoir : les émetteurs optiques, les canaux optiques atmosphériques et les récepteurs optiques. Dans le chapitre suivant, nous discuterons le multiplexage par division de longueur d'onde de recherche sur la technologie de multiplexage WDM, les composants pour le multiplexage des signaux optiques, ainsi que la conception et l'évaluation des systèmes FSO pour les communications optiques.

# Chapitre II : Les différentes techniques de multiplexage optique dans les télécommunications

## II.1 Introduction

La bande passante d'une fibre optique, définie comme la fenêtre sur laquelle l'atténuation reste suffisamment faible pour permettre la transmission, est très importante.

Elle est de 15 THz autour de chaque fenêtre 1.55  $\mu\text{m}$  et 1.3  $\mu\text{m}$  théoriquement, on peut atteindre de débits extrêmement élevés. Cependant, l'utilisation de cette capacité rencontre de nombreux problèmes, ne serait-ce que la dégradation due à l'interférence entre symboles provoquée par la dispersion de la fibre, qui devient de plus en plus importante lorsque le débit augmente, et le traitement électronique des signaux avant la modulation et après la détection.

C'est pourquoi diverses solutions ont été imaginées pour profiter des capacités de la fibre optique et donc augmenter le transfert d'informations sur un même support.

Dans la plupart des cas, le principe reste identique : utiliser  $N$  signaux au débit nominal  $D$  équivalent en termes de capacité à un signal au débit  $N \cdot D$  : c'est ce qu'on appelle le multiplexage. Les débits transportés sont désormais plus importants. Le signal concentré des flux d'origines diverses est appelé signal multiplex.

Pour préserver l'intégrité de chaque signal sur le canal, le multiplexage introduit, entre les signaux, une séparation temporelle, spatiale ou fréquentielle.

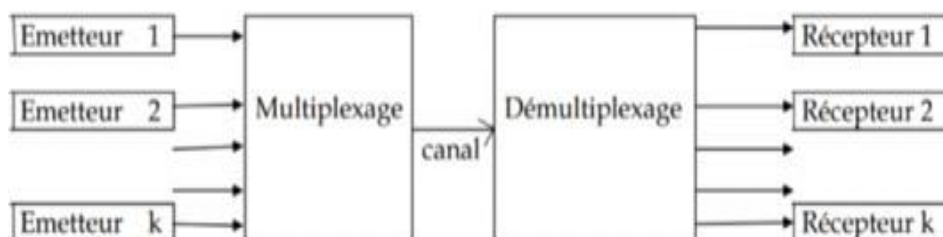
## II.2 Définition de multiplexage

Le terme « multiplexage » regroupe l'ensemble des techniques qui permettent de transmettre simultanément plusieurs signaux indépendants à travers un seul support de transmission.

De nombreuses techniques de multiplexage, développées à l'origine pour des communications RF ou filaires, ont été adaptées aux transmissions optiques afin de profiter de la large bande passante des fibres optiques. L'objectif est de transférer un maximum de signaux sur un seul médium de communication (sur fibre ou en espace libre). La difficulté étant bien entendu de pouvoir reconstituer correctement chaque signal en réception.

A partir de  $N$  signaux à haut débit  $D$ , le multiplexage permet d'atteindre ainsi une transmission de très haut débit  $N \cdot D$  sur fibre optique qui serait complexe à réaliser directement en raison des limitations fréquentielle des composants optoélectroniques de pilotage.

Un système de multiplexage (Figure II-1) est toujours associé en sortie à un démultiplexeur. A l'émission, on multiplexe  $n$  canaux au débit nominal  $D$ , à la réception, on dé-multiplexe le signal global  $n \cdot D$  en  $n$  canaux nominaux [14].



**Figure II-1** : Schéma de principe d'un système de multiplexage.

### **II.3 Fonctionnement de système de multiplexage en optique**

La technique du multiplexage est représenté par deux terminaux et un lien optique les reliant, le premier est un multiplexeur, et le second un démultiplexeur. Le multiplexeur a pour rôle de changer les longueurs d'ondes des signaux entrant et de les multiplexer sur un seul canal. Pour changer les longueurs d'ondes entrantes, il est nécessaire d'utiliser un transpondeur. Lorsque des signaux arrivent au niveau du multiplexeur, il est possible qu'ils ont la même longueur d'onde, même si l'émetteur est différent. Etant donné qu'il n'est pas possible d'envoyer deux fois la même longueur d'onde sur un même lien au risque d'erronée l'information des deux signaux, c'est le transpondeur qui va se charger de changer la longueur d'onde d'un de des deux signaux.

Ainsi, chaque flux entrant va être codé sur une porteuse par modulation d'amplitude ou de phase. Ce qui permet donc de diffuser des signaux de sources différentes qui auront des longueurs d'ondes identiques sur un même canal. L'intérêt de la fibre optique est que ces signaux ne peuvent se confondre, à la réception, ils seront parfaitement distingués [31].

### **II.4 Les techniques de multiplexage**

La technique la plus efficace pour gérer cette opération est le multiplexage car il intervient dès qu'on souhaite transmettre plusieurs flux d'information indépendants (canaux) en utilisant le même support (une fibre).

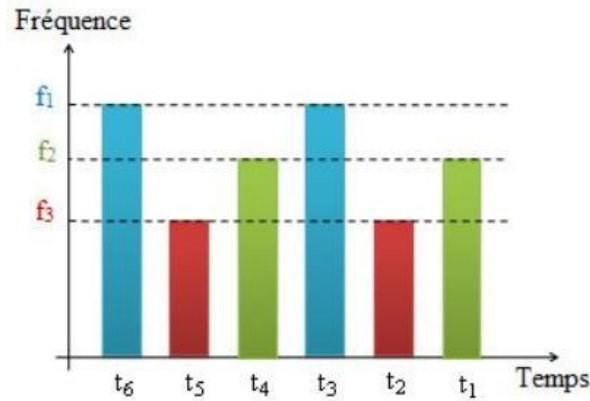
Il existe quatre (4) techniques de multiplexage :

- \*- Le multiplexage temporel (TDM pour Time Division Multiplexing).
- \*- Le multiplexage par répartition de code (Code Division Multiplexing CDM).
- \*- Le multiplexage fréquentiel (Frequency Division Multiplexing FDM).
- \*- Le multiplexage en longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexing) [5].

#### **II.4.1 Multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing)**

Le multiplexage temporel TDM (Figure II-2) consiste à offrir à un utilisateur la totalité de la bande passante pendant un court instant. L'allocation de la bande passante se fait en divisant l'axe du temps en intervalles de temps, et chaque utilisateur ne pourra transmettre que pendant son intervalle. Ainsi, le multiplexage temporel permet de regrouper plusieurs signaux à faible débit en un seul signal à haut débit.

A la réception, chaque canal temporel est démultiplexé puis acheminé vers sa destination. On peut réaliser électroniquement les fonctions de multiplexage/démultiplexage temporels avec des circuits intégrés ultra-rapides (40 Gbits/s en laboratoire). Toutefois, le coût extrême de ces circuits pour les très hauts débits suggère d'effectuer le multiplexage temporel par des moyens purement optiques [28].



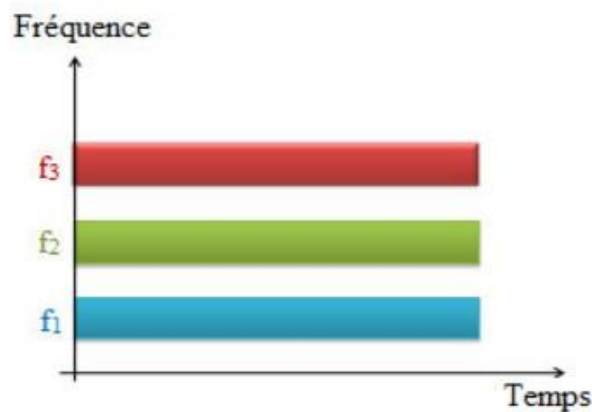
**Figure II-2** : Schéma de principe de Multiplexage temporel.

À la base, la technique de multiplexage temporel a été utilisée pour les systèmes électriques. Mais le domaine électrique atteignait rapidement ses limites dès que l'on s'approchait de débits de l'ordre de 10 Gb/s à cause des composants électroniques. L'OTDM, développée principalement au début des années 1990, a permis de dépasser cette limitation et d'atteindre des débits avoisinant le Tb/s [17].

#### II.4.2 Multiplexage fréquentiel FDM (Frequency Division Multiplexing)

C'est une technique de Multiplexage par répartition de fréquence (MRF). Elle est utilisée pour accroître les débits sur paires torsadées et plus particulièrement des lignes libres (propagation dans le vide ou l'air).

Le multiplexage fréquentiel (Figure II-3) consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux ou sous-bandes plus étroites et à affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur [25].



**Figure II-3** : Schéma de principe de Multiplexage fréquentiel.

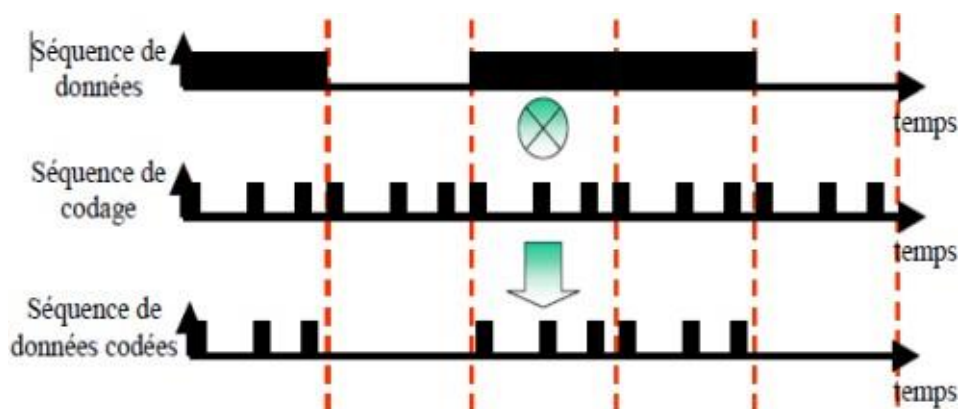
#### II.4.3 Multiplexage à répartition par code CDM (Code Division Multiplexing)

Cette technique permet la transmission des données des utilisateurs sur la même bande de fréquence et en même temps. Le principe consiste à attribuer à chaque utilisateur un code,

appelé également « signature », constitué d'une suite de bits rapides (appelés « chips » pour les distinguer des bits de données de l'utilisateur). Le débit après codage est celui des données utilisateur multiplié par la longueur de la séquence de codes.

Le multiplexage par répartition de code CDM 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 [10]. La technique OCDMA (Figure II-4) est basée sur les mêmes concepts de base que le CDMA.

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.) [27].



**Figure II-4 :** Système utilisant la technique du CDMA.

### II.4.4 Multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Le multiplexage de fréquences (Wavelength Division Multiplexing, WDM) est la technologie (Figure II-5) la plus utilisée dans les réseaux optiques actuels. L'efficacité de cette technologie fait le succès des réseaux optiques dans les réseaux de télécommunications [11], cette technique a pris une importance considérable pour augmenter la capacité et la souplesse des réseaux. Il utilise des multiplexeurs en longueur d'onde composants sélectifs et réciproques (ils servent aussi bien de multiplexeurs que de démultiplexeurs). Au contraire des coupleurs, vu plus haut, où le même signal est réparti entre les différentes sorties, les multiplexeurs possèdent un accès commun et  $n$  accès sélectifs. Des signaux portés par des

longueurs d'onde différentes arrivant par l'accès commun sont aiguillées vers des sorties différentes. En sens inverse, des signaux de longueurs d'onde différentes arrivant par leur accès propre sont multiplexés, en théorie sans pertes, sur la sortie commune. Il est également possible que certaines longueurs d'onde se propagent dans un sens et dans l'autre sens [32].

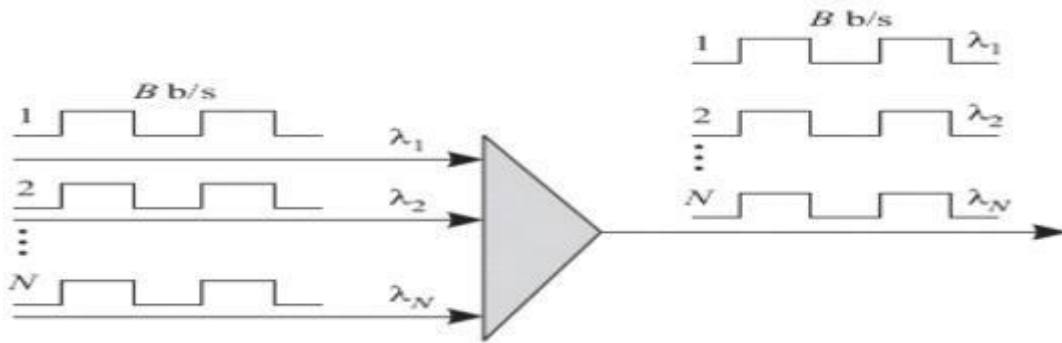


Figure II-5 : La technique de multiplexage WDM.

## II.5 Principe du multiplexage en longueur d'onde

Le multiplexage en longueur d'onde consiste à envoyer dans une seule fibre N porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit  $D_b$ . La bande passante est découpée en plusieurs sous-bandes dont chacune est affectée à une voie. L'utilisation du multiplexage WDM nécessite un ensemble de diodes laser émettant à des longueurs d'ondes différentes mais assez proches, sans qu'il y ait de mélange entre eux au cours de la propagation. Ainsi un multiplexeur/démultiplexeur optiques pour combiner/séparer l'ensemble des signaux optiques dans/de la fibre. La Figure II-6 représente un exemple d'une liaison utilisant le multiplexage WDM. La fibre optique transporte alors un débit numérique égal à  $N * D_b$ . Cette dernière est souvent définie comme la capacité du système [26].

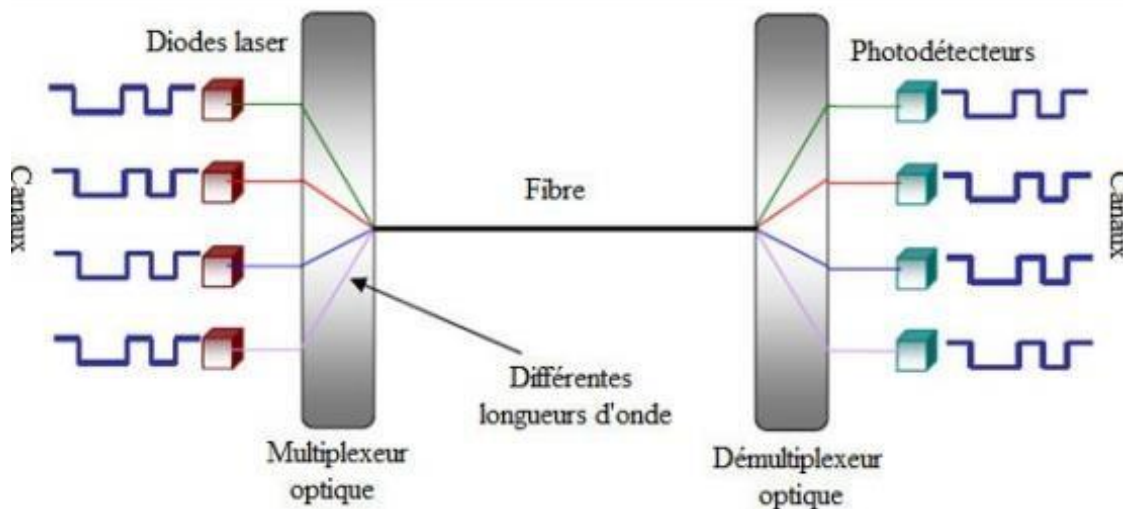


Figure II-6 : Schéma de principe du multiplexage en longueur d'onde.

## **II.6 Les types de multiplexage WDM**

Il existe Différents types de WDM existent : Coarse-WDM, Dense-WDM, Ultra Dense WDM.

### **II.6.1 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)**

Le multiplexage DWDM correspond à l'évolution du WDM. Il augmente la densité des signaux optiques transmis en associant jusqu'à 160 longueurs d'onde dans la même fibre. On atteint ainsi des débits de 300 à 400 Gbps. Des systèmes utilisant des pas de 50 GHz (0.4 nm) et de 25 GHz (0.2 nm) permettent d'obtenir respectivement 80 et 160 canaux optiques. La technologie DWDM présente cependant des coûts assez élevés, On l'emploi désormais pour les transmissions longues distance [29].

### **II.6.2 U-DWDM (Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing)**

Pour des intervalles encore plus petits, on parlera d'U-DWDM. Ainsi, des systèmes à 10 GHz (0.08 nm) permettent d'obtenir 400 canaux optiques. On peut actuellement avec 160 longueurs d'onde différentes atteindre des débits de 1.6 Tbps.

### **II.6.3 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)**

Utilise des longueurs d'onde comprises entre 1270 et 1610 nm, respectivement espacées de 20 nm, 18 canaux au maximum sont utilisables. Mais une technologie moins coûteuse utilisable notamment pour les boucles locales (MAN).

### **II.6.4 WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing)**

Le multiplexage WWDM est un autre dérivé du WDM. Il est encore plus restrictif que le CWDM puisqu'il n'autorise l'utilisation que de quatre canaux au maximum. Les canaux ont une longueur d'onde comprise entre 1275.7 nm et 1349.2 nm. Les canaux sont espacés de 24.5 nm entre eux et travaillent sur une longueur d'onde de 1310 nm. Ce multiplexage peu être utilisé sur des fibres multi mode et monomode.

## **II.7 Différents composants d'un système WDM**

### **II.7.1 Modulateurs (modulators)**

Servent à convertir les données numériques en ondes, soit par modulation d'intensité, soit par modulation d'amplitude, tandis que les démodulateurs ont la charge de reconvertir les signaux optiques en données numériques. Le moyen le plus efficace démoduler et démoduler le signal consiste à utiliser des diodes laser (Modulation interne).

### **II.7.2 Multiplexeurs / démultiplexeurs**

Utiliser pour grouper ou séparer les voies de longueurs d'onde différentes, les multiplexeurs/démultiplexeur jouent un rôle primordial dans WDM.

#### **II.7.2.1 Multiplexage à Filtre Optique**

Les filtres permettent la séparation spectrale en réfléchissant certain gamme de longueur d'onde et en transmettant les autres. En effet Le filtrage a pour but de limiter l'occupation spectrale d'un signal.

D'autre part Le multiplexage optique regroupe les signaux occupant des gammes de longueurs d'onde différentes tandis que la fonction réciproque le démultiplexage, permet de séparer des signaux occupant des bandes de longueurs d'onde différentes. On caractérisera le filtre par sa bande passante, le domaine de longueur d'onde dans lesquelles il laisse passer la lumière, et sa bande atténuée, le domaine de longueur d'onde dans lesquelles il réfléchit la lumière incidente [33].

### **II.7.2.2 Multiplexage à Coupleurs Sélectif**

Le principe de ces composants est l'interaction cohérente entre deux guides optiques, ils sont appelés les coupleurs de puissance, qui sont utilisés pour additionner ou diviser les signaux. Ils sont plus utilisés dans les systèmes multiplexés [33].

### **II.7.2.3 Multiplexage à Réseau de Diffraction**

Le réseau à l'avantage de traiter simultanément un grand nombre de voies à l'intérieur de la même fenêtre. Il se compose d'une surface optique qui transmet ou réfléchit la lumière et sur laquelle un grand nombre de traits sont gravés au diamant. Le réseau a la propriété de renvoyer, séparer angulairement, les différentes longueurs d'ondes contenues dans un même faisceau incident. En vertu du principe de retour inverse de la lumière, le réseau peut combiner dans une même direction des faisceaux incidents séparés angulairement et des longueurs d'onde adéquates. L'angle de diffraction est fonction de l'espacement des traits et de l'angle d'incidence [33].

### **II.7.3 Les amplificateurs optiques (EDFA)**

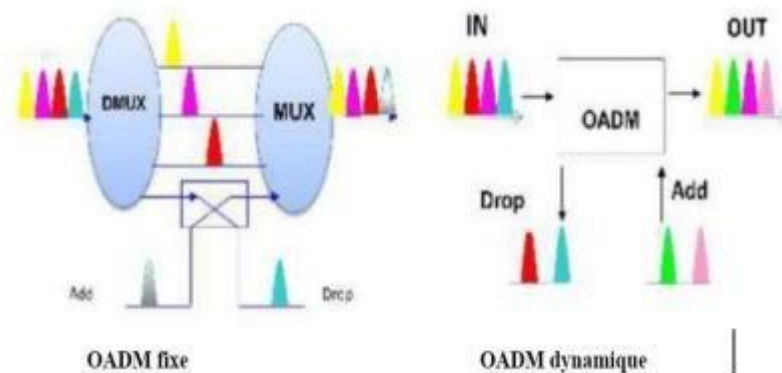
L'amplificateur à fibre optique dopé à l'erbium est une technologie sur laquelle repose les stations intermédiaires dans les systèmes de transport longue distance. Les EDFA permettent d'amplifier simultanément toutes les longueurs d'ondes, sans conversion des signaux électriques. Les éléments de base d'un amplificateur optique dopé à l'erbium sont :

La fibre monomode dont le cœur contient des ions de terre rare (l'erbium pour l'amplification autour de 1.55  $\mu\text{m}$ ), le laser de pompage de forte puissance, un multiplexeur pour coupler la pompe, et l'isolateur optique (des filtres) peuvent également être utilisés pour égaliser le gain dans la plage d'amplification.

### **II.7.4 Multiplexeur optique à insertion et extraction (Optical Add /Drop MuX)**

Un OADM 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 (Figure II-7) couplés avec la technique de multiplexage en longueur d'onde WDM offrent l'avantage de rapidité et d'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 [32].



**Figure II-7 :** Multiplexeur à insertion/ extraction (Add/Drop).

### II.7.5 Convertisseurs optiques [33]

Un convertisseur optique permet de modifier la longueur d'onde d'un signal optique. Ce composant est donc très utile pour les réseaux utilisant de nombreuses longueurs d'ondes. Deux grands types de technologies se distinguent :

#### II.7.5.1 Conversion optoélectronique

Consiste à traduire le signal optique en signal électrique, puis émettre un nouveau signal optique avec une longueur d'onde différente. Cette technique est équivalente à la régénération du signal, c'est pourquoi on pourra profiter de la régénération du signal pour modifier la longueur d'onde d'un signal optique. Des expérimentations pour des débits de 10Gbps ont été réalisées.

#### II.7.5.2 Conversion tout-optique

Cette technique de conversion en longueur d'onde, permet d'atteindre de plus haut débits. L'expérimental a démontré la faisabilité de convertisseurs tout-optique opérant à 40Gbps.

### II.7.6 Isolateurs

En optique comme en électricité, un isolateur est un dispositif passif non réciproque qui a une faible atténuation dans un sens et une forte atténuation dans l'autre sens. Il a donc une entrée et une sortie.

Dans les systèmes de télécommunications par fibre optique, les isolateurs sont le plus souvent employés pour atténuer la lumière issue des réflexions parasites, qui, par exemple en revenant dans le laser, vient troubler son fonctionnement. Les occasions d'avoir des réflexions tout au long de la ligne sont fréquentes (un connecteur optiquement mal adapté, une extrémité de fibre mal coupée, .....). Ces réflexions intempestives augmentent le bruit **RIN** (**R**elative **I**ntensity **N**oise) de ces lasers.

Les isolateurs sont également utiliser dans les amplificateurs optiques à fibre dopée afin de les empêcher de résonner et de se transformer en lasers s'il y a réflexion. Les pertes d'insertion sont liées à l'absorption dans les différents éléments. Elles ne dépassent pas 2.5 dB est tout à fait possible [30].

## II.8 Les paramètres importants d'un système WDM [34]

Un système WDM est caractérisé par trois paramètres importants : le premier est sa portée optique, le second est l'espacement entre amplificateurs et le dernier est sa capacité.

### II.8.1 La portée optique

La portée optique est la distance maximale qui peut être couverte sans régénération optoélectronique du signal.

Cette portée est principalement limitée par le niveau de bruit en réception et donc par le rapport signal à bruit admissible en fin de transmission ainsi que par l'accumulation des défauts de propagation.

Si les amplificateurs sont capables de composer les pertes apportées par fibre, l'amplification s'accompagne de bruit d'émission spontanée amplifiée qui vient s'ajouter aux autres contributions de bruit. Mais l'usage des codes correcteurs d'erreurs combinés avec les progrès réalisés dans l'optimisation des conditions de propagation de propagation peuvent être mis à profit pour accroître la portée optique des systèmes à base de 2.5 et 10 Gbit/s. Ainsi, l'offre s'est récemment diversifiée avec l'introduction des systèmes terrestres très longue distance " (VLH Very Long Haul), " ultra longue distance " (ULH Ultra Long Haul) et extrêmement longue distance (ELH Extremely Long Haul) aux côtés des systèmes "longue distance " (LH Long Haul) déjà existants.

### II.8.2 Espacement entre amplificateurs

Le choix de l'espacement entre amplificateurs influence fortement les limites de la portée. Pour une distance donnée, la puissance de bruit augmente de manière quasi exponentielle avec l'espacement entre amplificateurs. Par exemple, considérant une portée de 1000 Km, avec une fibre de 0.25 dB /Km, porter l'espacement entre amplificateurs de 50 à 100 Km augmente le gain des Amplificateurs (et donc la puissance de bruit de chacun d'eux) de 50 fois  $0.25 \times 50 = 12.5$  dB, tandis que leur nombre est divisé par deux d'où une amélioration de 3 dB). La puissance totale de bruit sera donc augmentée de 9.5 dB, et la puissance de sortie des amplificateurs devra être augmentée d'autant pour conserver le même rapport signal à bruit. Réduire donc cet espacement conduit, toutes choses égales par ailleurs, à accroître le rapport signal à bruit optique en réception. Ce gain peut être mis à profit pour augmenter la portée du système. En revanche, un espacement réduit induit un coût supplémentaire pour l'opérateur, en termes non seulement d'investissements mais aussi de coûts opérationnels, par l'accroissement du nombre de sites à superviser.

### II.8.3 La capacité

La capacité d'un système relève du choix de deux paramètres : le nombre de longueurs d'onde et le débit unitaire transporté par chacune. Le choix pour obtenir une capacité donnée dépend de considérations à la fois technique et économiques et des caractéristiques des équipements en interface.

Efforts actuels de recherche et développement : augmentation de la capacité totale des systèmes WDM, en augmentant soit

- Le nombre de CAN.
- Le débit de chaque canal [16].

## II.9 Avantages et inconvénients du multiplexage en longueur d'onde

### II.9.1 Les Avantages

- \*- La meilleure technologie pour le transport de grandes quantités de données entre data centres.
- \*- La possibilité d'envoyer différents types de données sur des réseaux de fibres optiques sous forme de lumière. Ainsi, différents canaux de lumière, chacun avec longueur d'onde spécifique sont envoyés simultanément sur fibre optique unique. Au lieu d'utiliser plusieurs fibres pour chaque service, une seule fibre peut être partagée pour plusieurs services.
- \*- Optimise l'utilisation des fibres optiques et rentabilise les investissements réseaux
- \*- Cette technologie augmente la bande passante en autorisant des flux de données différents transmis simultanément sur un réseau de fibre optique.
- \*- WDM maximise l'utilité des fibres optiques et contribue à optimiser les investissements réseau.

### II.9.2 Les inconvénients

- \*- Le spectre optique des fibres est découpé en un ensemble de canaux selon la longueur d'onde.
- \*- Chaque intervalle (fréquence) supporte un canal.
- \*- L'accès au canal est assuré toujours par un émetteur laser.
- \*- Le multiplexage se fait à l'aide d'un élément optique passif.
- \*- Il est trop coûteux et trop complexes pour les réseaux privés.

## II.10 L'avenir WDM

La capacité des systèmes de transmission à la multiplexage en longueur d'onde (WDM) a récemment augmenté d'une manière spéculaire, en raison notamment de la multiplication du nombre de canaux, toutefois pour atteindre des capacités encore plus grandes, il faudra augmenter le débit binaire par canal (10Gbits/s vers 40Gbits/s), rapprocher les canaux et élargir la bande passante optique exploitée. Aujourd'hui, la technologie DWDM n'a pas encore atteint ses limites.

De plus, de nouvelles techniques en cours de développement vont permettre à priori de multiplier encore plus les capacités des systèmes optiques. On peut citer :

- Des amplificateurs optiques à faible bruit, de grande puissance, à large bande.
- Une fibre optique optimisée et des techniques de gestion de la dispersion.
- La transmission permettant le transport d'impulsions très étroites sur des milliers de kilomètres sans déformation, tout en conservant une bande passante très large.
- Des composants électroniques et optoélectroniques rapides pour les équipements émetteurs et récepteurs.
- La réduction de la dispersion en polarisation.
- Des modules de compensations de dispersion compatibles avec de larges bandes passantes optiques.

- Une technologie de traitement optique rapide pour la régénération 2R, 3R autorisant une régénération efficace mais peu coûteuse par comparaison avec les équipements d'émission réception.
- Des équipements à très haut débit binaire mettant en oeuvre le multiplexage temporel électronique (ETDM) conjointement avec le multiplexage temporel optique (OTDM).
- Une nouvelle génération de technique de correction d'erreurs directe pour faciliter la transmission en présence de bruit.
- Des filtres optiques à forme d'amplitude et de phase bien définies pour un filtrage très étroit (plus étroit que la bande passante de canal WDM) [35].

## II.11 Le multiplexage en longueur d'onde CWDM

### II.11.1 Principe

Le multiplexage par répartition en longueur d'onde grossière (Coarse Wavelength Division Multiplexing : CWDM) est un schéma de multiplexage dont les longueurs d'onde sont combinées en un seul câble à fibre optique sans interférence (voir la figure II-8). C'est une bonne solution pour ajouter plus de services sur une seule sortie sans interrompre d'autres services aux clients. Le CWDM fonctionne à une largeur de bande plus élevée que le WDM, où la longueur d'onde de fonctionnement s'étend de 1270 nm à 1610 nm (bandes O, E, S, C, L) et couvre 18 canaux CWDM avec un espacement entre les canaux de 20 nm. Ce système est utilisé dans les réseaux locaux (LAN) et métropolitains (MAN) [36].

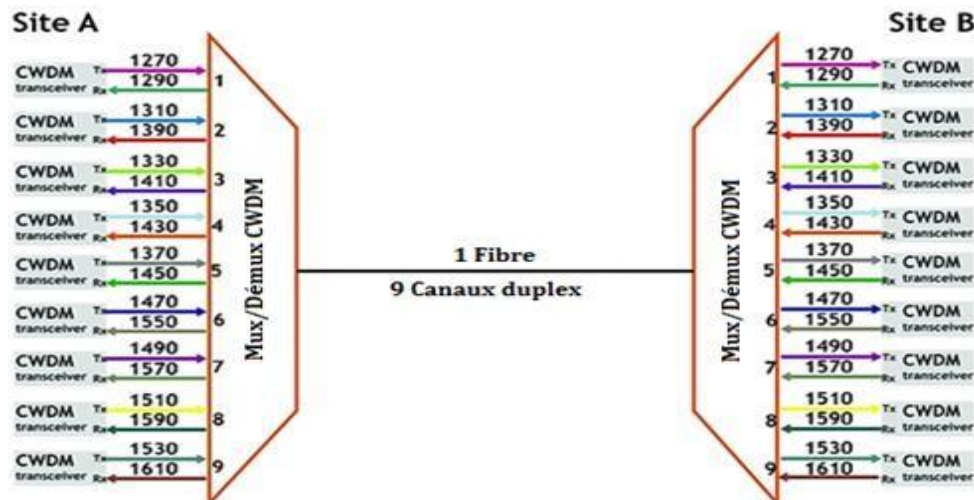


Figure II-8 : Principe du Multiplexage CWDM.

L'idée de base du CWDM est l'utilisation des composants optiques à faible coût pour une transmission sans amplificateur.

### II.11.2 Caractéristiques du multiplexage CWDM

- Multiplexage analogique.
- Fournit des hauts débits : 2,5 Gbps – 5 Gbps.
- Fonctionne à une largeur de bande plus élevée que le WDM, DWDM et U-DWDM

- Utilise les bandes O, E, S, C, L : 1270 nm -1610 nm
- Couvre 18 canaux optiques (en pratique 8canaux).
- Espacement entre les canaux : 20 nm.
- Utilisé dans les réseaux locaux (LAN), les réseaux d'entreprise et métropolitains (MAN).
- Utilise des composants optiques à faible coût pour une transmission sans amplification.
- Offre un grand avantage lors de la mise en œuvre dans le réseau d'accès optique.
- Moins coûteux et consomme moins d'énergie qu'un système DWDM.
- Utilise des lasers non refroidis à faible coût.
- Longueurs d'onde utilisées ne sont pas affectées par le pic d'eau (Water peak).
- Le nombre des canaux est limité par rapport aux DWDM et U-DWDM.
- Utilisé pour les courtes distances.
- Utilisé dans les réseaux FTTx, PON, la radiodiffusion et la télévision (CATV).

### II.11.3 Avantages et inconvénients de multiplexage CWDM

Comparé au DWDM, le CWDM offre moins de canaux que les systèmes DWDM ce qui permet d'économiser et de réduire le coût des composants notamment les amplificateurs, les lasers, ...etc. Ce système offre un grand avantage lors de la mise en œuvre dans le réseau d'accès optique.

Il est moins coûteux et consomme moins d'énergie qu'un système DWDM parce qu'il utilise des lasers non refroidis à faible coût c.à.d. les émissions laser se produisent sur huit canaux à huit longueurs d'onde définies (*en pratique, on utilise seulement 8 longueurs d'ondes*). La tolérance (*l'imprécision ou la variabilité de la longueur d'onde*) dans un laser CWDM va jusqu'à  $\pm 3$  nm, tandis que dans un laser DWDM, la tolérance est beaucoup plus serrée [37].

Dans le système CWDM, l'amplification n'est pas indispensable car les longueurs d'onde utilisées dans ce système ne sont pas affectées par le pic d'eau (*Water peak*) qui provoque une forte atténuation des longueurs d'onde proche de 1383 nm (*selon la recommandation de l'IUT Février 2006*) [37].

En termes de performances, il est à noter que le CWDM n'est pas à comparer avec la technologie DWDM basée sur la fibre optique de longue distance, mais plutôt avec certaines applications spécifiques (*capacité, flexibilité et faible coût*).

Ce système présente aussi plusieurs inconvénients, et parmi eux, on trouve :

- Le nombre de canaux limité.
- L'utilisation pour les courtes distances.
- Le domaine d'application de ce système n'est pas aussi vaste.

Il est largement utilisé dans les télécommunications (*réseaux FTTx, PON, EPON, GPON*), la radiodiffusion et la télévision (*Cable Television : CATV*), les réseaux d'entreprise, les réseaux de campus et d'autres domaines.

## II.12 Une généralité sur les autres techniques

Le DWDM est une technique WDM qui utilise des longueurs d'onde de lumière très rapprochées pour transporter un grand nombre de signaux optiques simultanément sur une seule fibre optique, souvent plus de 80 canaux sur une seule fibre. Cette technique est largement utilisée dans les réseaux de télécommunications pour transmettre de grandes quantités de données à haut débit sur de longues distances.

Le WWDM est une technique WDM qui utilise des longueurs d'onde de lumière plus espacées que celles utilisées dans le DWDM, généralement dans la plage de 1310 nm à 1610 nm pour transporter plusieurs signaux optiques simultanément sur une seule fibre optique. Cette technique est principalement utilisée dans les réseaux locaux (LAN) et les réseaux métropolitains (MAN) pour transmettre des données sur des distances plus courtes que celles couvertes par le DWDM.

L'U-WDM est une technique WDM qui utilise des longueurs d'onde de lumière encore plus espacées que celle utilisées dans le DWDM et le WWDM, souvent dans la plage de 1000nm à 4000nm, pour transporter plusieurs signaux optiques simultanément sur une seule fibre optique. Cette technique est principalement utilisée dans les réseaux de surveillance et les réseaux de capteurs, où elle permet de transporter plusieurs types de signaux différents sur une seule fibre optique, tels que des signaux de température, de pression, de déformation, etc.

## II.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de multiplexage et expliquer leur fonctionnement. On peut dire que la technologie de multiplexage du réseau d'accès optique basé sur la longueur d'onde a de meilleures performances que les autres technologies de multiplexage.

Par conséquent, l'augmentation de la capacité des réseaux d'accès optiques basés sur Technologie de multiplexage par répartition en longueur d'onde. Le chapitre suivant sera consacré aux techniques dont nous parlerons FSO, présentant ses principes, ses avantages et ses limites.

# Chapitre III : Liaison Optique FSO (Free Space Optic)

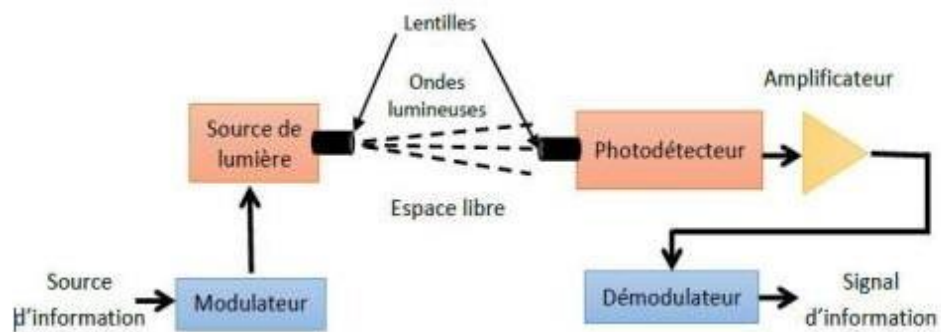
### III.1 Introduction

Les liaisons optiques atmosphériques FSO, appelées aussi WOC (Wireless Optical Communications). C'est une technologie alternative aux faisceaux hertziens et aux câbles optiques afin de faire face aux besoins croissants en matière de télécommunication à débits élevés. 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 importants par rapport aux technologies sans fil, ainsi que la mobilité de certaines applications.

Dans ce chapitre, nous expliquons le principe du système FSO, son architecture, condition de fonctionnement, topologie et composant. Nous présentons le modèle du canal de ce système ainsi que ses propriétés comme l'atténuation, les pertes, la divergence des faisceaux.

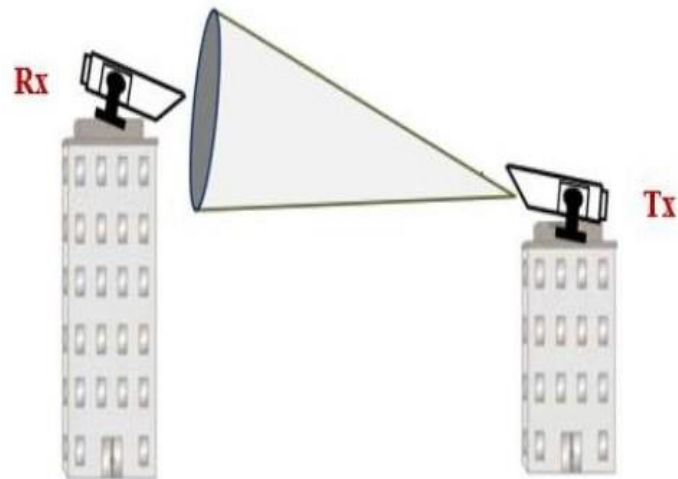
### III.2 Principe de fonctionnement de FSO

Le principe de base de la technologie FSO (Figure III-1) consiste en une transmission laser en espace libre dans une partie du spectre lumineux visible ou infrarouge. Les systèmes FSOs sont conçus pour effectuer une connexion entre deux zones ou différentes zones, en visibilité directe LOS (Line-Of-Sight) à un débit très élevé. La FSO permet la transmission de tout type de données avec un débit égal à celui de la fibre optique tout en ayant la fiabilité et la robustesse.



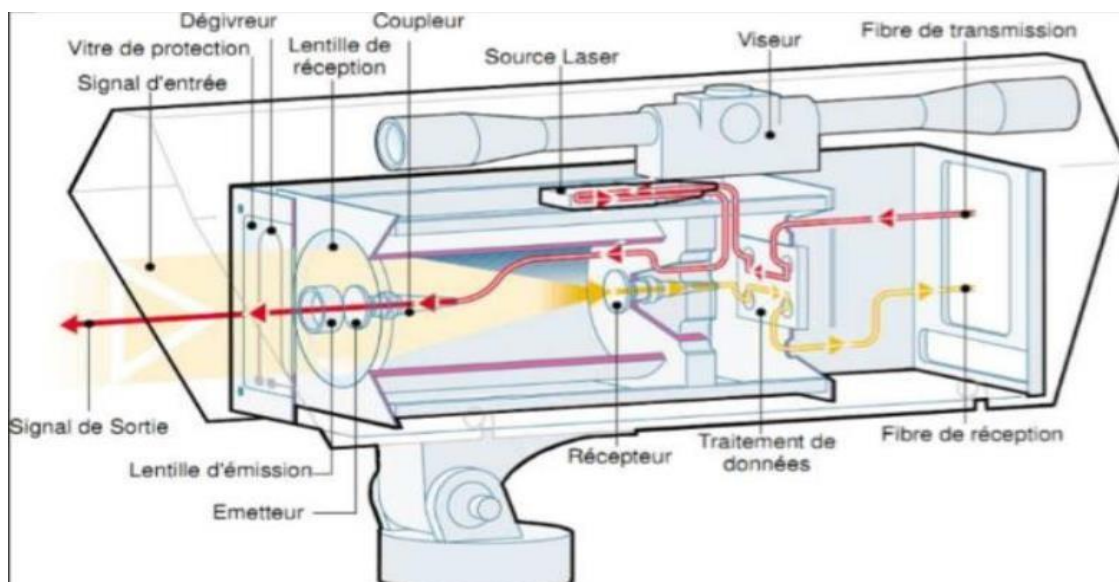
**Figure III-1** : Système de communication FSO en visibilité directe [11].

En outre, une liaison FSO nécessite un émetteur (Tx), un canal de propagation et un récepteur (Rx), comme il est décrit sur la figure III-2.



**Figure III-2** : Schéma d'une liaison optique sans fil terrestre.

La plupart des équipements sont bidirectionnels (Full duplex) et associent dans le même coffret un émetteur à un récepteur. Certains systèmes gèrent plusieurs canaux de communication en multiplex. Les transmetteurs (Tx-Rx) peuvent être situés sur un toit, sur un coin d'un bâtiment ou à l'intérieur derrière une fenêtre. La figure III-3 présente un exemple typique d'une unité FSO de la société Light Pointe permettant à la fois la transmission et la réception de données [15].



**Figure III-3** : Transmetteurs (Tx-Rx) d'une unité FSO.

Chaque élément est constitué d'un émetteur et d'un récepteur qui communiquent généralement en « *Full-Duplex* », la communication est bidirectionnelle et simultanée (voir la figure III-4).

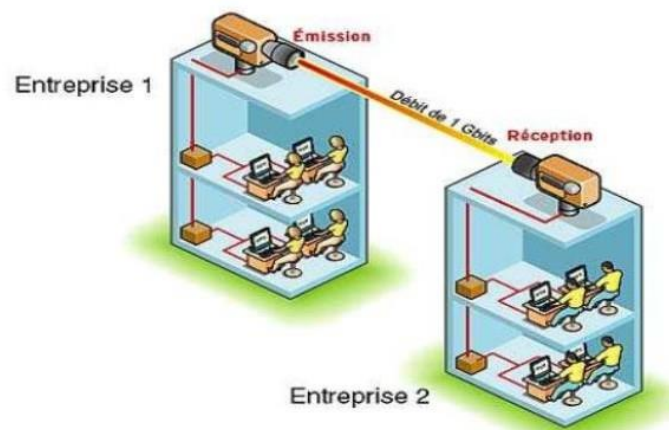


Figure III-4 : Communication FSO [11].

- **Éléments d'émission**

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

- **Éléments de réception**

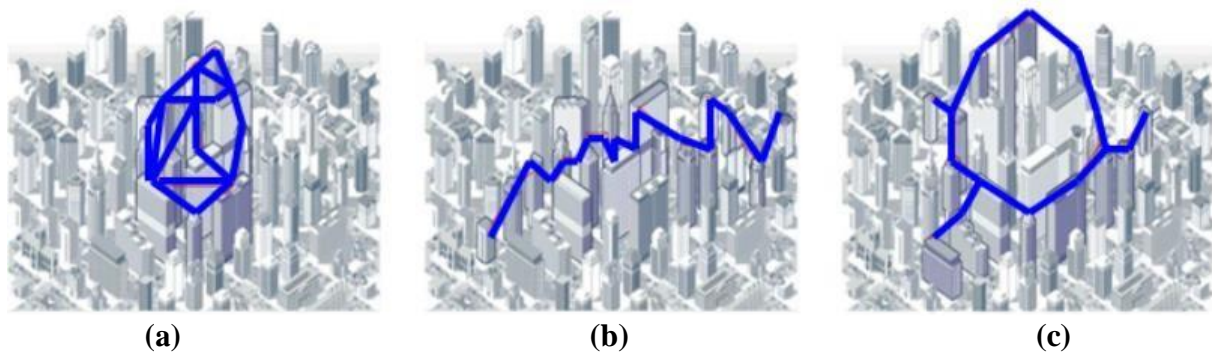
- \*- Le module de réception optique contenant une photodiode.
- \*- Le filtrage et l'amplification du signal numérique électrique.
- \*- Le module de conversion électrique/optique (E/O), en cas d'interface optique.
- \*- L'interface d'affluent: électrique ou optique pour transmettre les données numériques [11].

### III.3 Architecture de base de la technologie FSO

La technologie FSO fournit une solution réseau plus flexible pour atteindre haut capacité de transmission. Elle fournit aussi des bonnes qualités de transmission des données par rapport à la fibre optique (plus facile à mettre en œuvre et plus rapide de déploiement). Il y a trois principes d'architecture FSO :

- Point à point : Cette architecture est une connexion dédiée offrant une meilleure bande passante, mais moins évolutive.
- Maille : Cette architecture offre une redondance et une fiabilité accrue avec des ajouts de nœuds, mais limite les distances plus que d'autres options.
- Point à multipoint : Offre des connexions moins chères et facilite l'ajout de nœuds, mais au détriment d'une bande passante inférieure à celle de l'option point à point.

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



**Figure III-5** : Topologies de réseaux optiques en espace libre [17].

- (a) point-multipoints et maillage ;
- (b) point-à-point ;
- (c) anneau et point-à-point.

### III.4 Caractéristiques d'une liaison FSO

Les principaux intérêts des systèmes FSOs sont : le faible coût, la flexibilité, la rapidité d'installation et de déploiement et de redéploiement par rapport à la fibre optique pour assurer un débit comparable tout ayant la souplesse du sans-fil. Actuellement, plusieurs liaisons sont assurées à l'aide des systèmes FSOs sur des distances qui varient entre quelques centaines de mètres à quelques kilomètres à des débits de transmission standards : 155Mbits/s, 622Mbits/s, voir à plusieurs Gbits/s.

Les principales caractéristiques de la technologie FSO sont les suivantes :

– **Énorme bande passante de modulation** : dans tout système de communication, la quantité de données transportées est directement liée à la bande passante de la porteuse modulée. Les systèmes FSO garantissent donc une grande capacité d'information par rapport à des systèmes basés sur les communications radio fréquence. À titre d'exemple, le tableau III-1 récapitule l'évolution de débit au fil des années pour un des leaders constructeurs des équipements FSO MRV [21].

Années	Débit
1995	10 Mbps
2000	100 Mbps
2005	1 Gbps
2008	10 Gbps

**Tableau III-1** : Évolution de débit chez « MRV », l'un des leaders dans l'industrie FSO.

\*- **Faisceau de taille étroite:** le rayonnement optique est connu par son faisceau très étroit, cela implique que la puissance émise est concentrée seulement dans une zone très étroite, ce qui fournit un lien FSO avec isolement spatial adéquat de ses brouilleurs potentiels. Le confinement spatial des rayons optiques rend l'interception des données transmis à travers ces rayons vraiment difficiles par d'autres utilisateurs.

\*- **Performance liée aux conditions climatologiques:** la performance de FSO terrestre est liée aux conditions atmosphériques. La propriété "non-stable" du canal, sans aucun doute est le plus grand défi. Toutefois, ce n'est pas propre aux liaisons FSO, les liaisons RF et les liens de communication par satellite sont également exposés aux pannes lors de fortes pluies et en cas de tempête.

\*- **Un spectre ne nécessitant pas de licence:** en raison de la congestion du spectre des radiofréquences, les autorités réglementaires, telles que l'Autorité de Régulation de Poste et de Télécommunications (ARPT) [22] en Algérie mis en place une réglementation très stricte pour se voir attribuer une tranche du spectre radio.

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.

### III.5 Paramètres d'une liaison FSO

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

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

À l'instar des équipements pour une liaison FSO, il est primordial de savoir le bilan de liaison et la marge brute de la liaison donnée. La connaissance de ces paramètres permet de connaître la capacité du lien laser à transmettre des données numériques malgré les variations des conditions climatiques. Les principaux paramètres à prendre en considération pour la définition des liaisons optiques atmosphériques sont les suivants : la puissance émise, la sensibilité du récepteur, la surface de détection optique du récepteur et la divergence du faisceau émis. À partir de ces données techniques, on pourra connaître la valeur de l'affaiblissement géométrique de la liaison et sa marge brute [23].

### III.5.1 Intensité rayonnante

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

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

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

L'intensité rayonnée pour une puissance totale émise s'écrit alors :

$$I = P_T * R_0(\varnothing) \quad (\text{III-2})$$

### III.5.2 Puissance optique reçue

Elle se calcule comme pour les faisceaux hertziens terrestres, mais avec des ordres de grandeur très différents. La puissance optique reçue est donnée par la relation suivante [23] :

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

Où :

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

La puissance optique reçue peut être exprimée en fonction de la longueur d'onde et le diamètre d'une antenne réceptrice comme suit :

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

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

### III.5.3 La densité de puissance optique

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

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

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

$$A_e = \frac{G_T \lambda^2}{4\pi} \quad (\text{III-6})$$

Avec  $G_{\text{rest}}$  le gain de l'antenne

Alors l'équation (III-5) devient écrite comme suit :

$$P_D = \frac{P_T \theta}{(4\pi L)^2} A_e \quad (\text{III-7})$$

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

#### III.5.4 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] :

$$PEL = 32.455 + 20 \times \log(L) + 20 \times \log(f) \quad (\text{III-8})$$

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 :

$$R_{R(L)} = p_T \times G_T \times G_L \times G_R = \frac{p_T \times G_T \times G_R \times \lambda^2}{(4\pi L)^2} \quad (\text{III-9})$$

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

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

#### III.5.5 Marge d'une liaison optique atmosphérique

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

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  $P_T$ , si elles sont mentionnées, permettent de déduire la marge brute par la formule suivante :

$$M_{liaison}(\text{dB}) = p_T + |S_r| - \text{Aff}_{\text{atm}}(\text{dB}) - P_{\text{tot}}(\text{dB}) \quad (\text{III-11})$$

Où :

- $P_T$ : Puissance émise par l'émetteur.

- **Sr**: sensibilité du récepteur.

- **Aff<sub>atm</sub>** : Atténuation moléculaire correspondant à la longueur d'onde utilisée dans la liaison.
- **P<sub>tot</sub>** : Ensemble de toutes les autres pertes relatives au système.

### III.5.6 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 :

$$\frac{E_b}{N} = \left( \frac{E_b}{N} \right)_{\text{requis}} + \text{marge} \quad \text{dB} \quad \text{(III-12)}$$

Finalement, le débit de transmission est donné par la formule

$$\text{Débit} = 10^{\left( \frac{P_R}{N} - \frac{E_b}{N} \right)} \quad \text{(III-13)}$$

### 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 :

$$C(t) = \beta \log_2(1 + \text{SNR}(t)) \quad \text{(III-14)}$$

Avec :

- $\beta$ : la bande passante en Hertz
- **SNR** : le rapport signal-à-bruit

Dans le cas des systèmes FSO,  $\beta$  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.

## III.6 Avantages et inconvénients de FSO

### III.6.1 Les avantages de FSO

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

- \*- Large bande ou débit de données élevé.
- \*- Equipements petits et simples.
- \*- Fonctionnement sans licence.
- \*- Coût avantageux.

- \*- Facilité et rapidité de déploiement.

- \*- Rapidité de déplacement et de réutilisation des liaisons.
- \*- Protocole de communication transparent.
- \*- La sécurité intrinsèque des dispositifs FSO, plus élevée que celle des liaisons radioélectriques.

### III.6.2 Les inconvénients de FSO

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

- \*- Disponibilité par rapport à la distance.
- \*- Condition de visibilité directe.

En outre, pour la transmission des ondes optiques en espace libre, il faut surmonter certains problèmes liés à la propagation, comme l'atténuation du signal à la réception, conduisant ainsi à une augmentation du taux d'erreurs car l'atténuation d'un signal optique transmis dans l'espace libre n'est pas prévisible (les conditions climatologiques changent dans le temps et dans l'espace), en raison de cette imprévisibilité, il est plus difficile de contrôler la transmission des rayons optiques en espace libre.

Cette imprévisibilité affecte la disponibilité du système et les capacités de conception. FSO est également une technologie de ligne de visibilité directe, ce qui signifie que les points de communications qui se relient doivent être en mesure de voir les uns les autres sans rien entre les deux.

## III.7 Applications de FSO

- Soutien pour les liaisons à fibre optique.
- Liens temporaires.
- Terrains Difficiles.
- La télévision à haute définition.
- Les communications militaires.
- Les liaisons de raccordement "Backhaul" de la téléphonie mobile.

## III.8 Atténuation

La disponibilité et la fiabilité d'une liaison optique sans fil dépendent 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.

### III.8.1 Atténuation de la pluie

L'affaiblissement de pluie est causé par la diffusion géométrique due aux gouttes. Cette diffusion géométrique cause des effets qui ne peuvent pas être ignorés. Les gouttelettes de pluie provoquent une réflexion et une réfraction de faisceau lumineux.

On exprime l'atténuation de pluie en (dB/km) par l'équation suivant [39]:

$$\alpha_{pluie} \left( \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) = 1.0765 \cdot R^{0.67} \quad (\text{III-15})$$

- 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 III-2** : Valeurs de niveau d'atténuation en fonction de précipitations de pluie.

### III.9 Sécurité

La sécurité est un élément important de la transmission de données quelle que soit la topologie du réseau.

La perception commune du sans-fil est qu'il offre moins de sécurité que les connexions filaires. En fait, l'optique en espace libre (FSO) est beaucoup plus sécurisée que la RF ou d'autres technologies de transmission sans fil [40] pour plusieurs raisons :

- \*- Les faisceaux laser FSO ne peuvent pas être détectés avec des analyseurs de spectre ou des compteurs RF.
- \*- Les transmissions laser en espace libre ont des transmissions optiques qui se déplacent dans une ligne de visée impossible à intercepter facilement. Il faut qu'un émetteur- récepteur FSO soit soigneusement aligné pour compléter la transmission.
- \*- L'interception est très difficile et extrêmement improbable.
- \*- Les faisceaux laser générés par les systèmes FSOs sont étroits et invisibles, ce qui les rend plus difficiles à localiser et encore plus difficiles à intercepter et à capturer.
- \*- Les données peuvent être transmises via une connexion cryptée, ce qui renforce le degré de sécurité disponible dans les transmissions FSOs sur le réseau.

### III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté que la liaison FSO utilise l'espace libre en tant que support de transmission. Cette technologie fait face à des paramètres interne et externe. Nous avons décrit le principe de fonctionnement de FSO, les différentes caractéristiques qui font de la technologie FSO appropriée pour une utilisation dans les réseaux d'accès et les domaines d'utilisation des systèmes FSOs.

# Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter le logiciel de simulation Optisystem. Par la suite, nous allons présenter les résultats de la simulation pour deux systèmes **WDM/FSO** et **CWDM/FSO** avec 8 canaux. Une petite comparaison entre ces deux systèmes va être présentée. Et nous terminerons par une conclusion.

## IV.2 Présentation du logiciel OptiSystem

OptiSystem est un outil qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, concevoir, simuler et analyser, tout module de traitement du signal, allant du dispositif le plus élémentaire au système complet de communication. OptiSystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur conviviale [13].

Le logiciel OptiSystem a été développé par une société canadienne Optiwave. L'OptiSystem permet de tester et optimiser pratiquement n'importe quel type de liaison optique.

Il comporte plusieurs caractéristiques :

- \*- Les composants virtuels de la bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.

- \*- La bibliothèque de composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, ces composants s'intègrent aux équipements de test et de mesure des différents fournisseurs.

- \*- Les outils de visualisation avancée produisent le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation.

- \*- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des analyseurs sur le moniteur au même port.

L'Optisystem est appliqué dans plusieurs domaines comme :

- \*- La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.

- \*- Le calcul du taux d'erreur binaire (BER ou TEB) et le calcul du bilan de liaison.

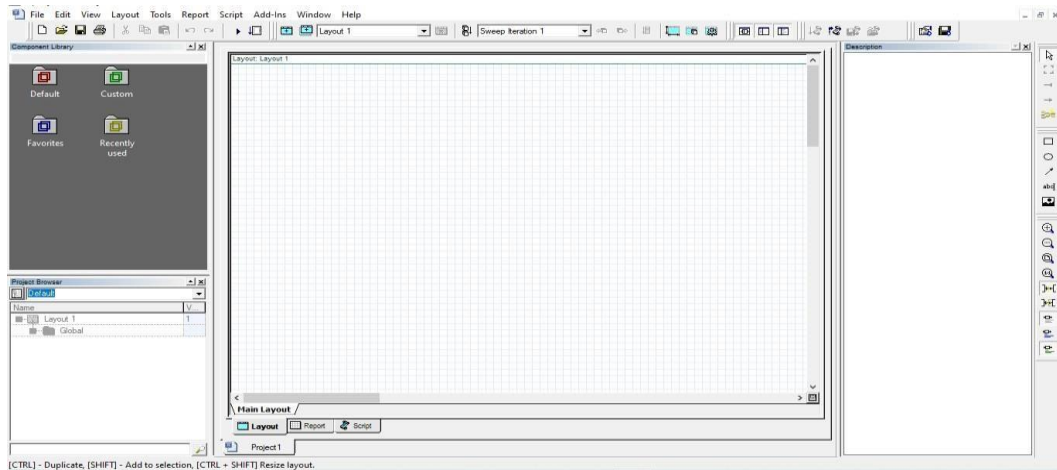
- \*- La conception des réseaux TDM/WDM et les réseaux optiques passifs (PON).

- \*- L'espace libre pour les systèmes optiques (OSA).

- \*- La conception d'émetteur, de canal et d'amplificateur.

### IV.2.1 Interface du logiciel Optisystem

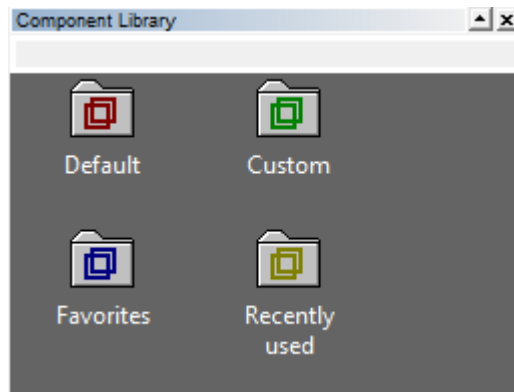
Quand le Optisystem est démarré une fenêtre principale apparaîtra (voir la figure IV.1



**Figure IV-1** : Fenêtre principale du logiciel Optisystem à fenêtre répartie en plusieurs parties.

**A) Bibliothèque des composants**

Cette fenêtre nous donne l'accès aux différents composants, afin de créer les systèmes désirés comme le montre la figure (IV-2).



**Figure IV-2** : Bibliothèque des composants.

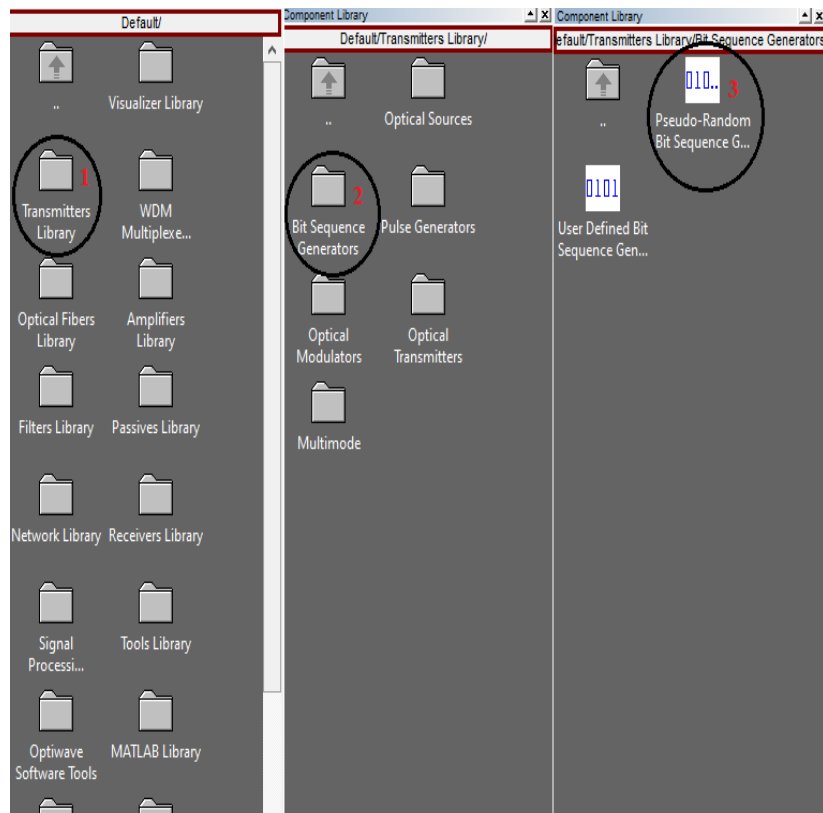
**B) Icône Default**

La bibliothèque Default, contient tous les composants, quand vous cliquez sur default elle apparaîtra une fenêtre qui est montré dans la figure IV-3.



**FigureIV-3** : Default.

Il suffit juste de sélectionner une catégorie du composant pour le trouver par exemple on cherche Générateur de bit aléatoire .La méthode est montrée dans la figure IV-4.



**Figure IV-4 :** Recherche d'un Générateur de bit aléatoire.

### **B.1) Icône Custom**

C'est les composants créés où modifiés par l'utilisateur.

### **B.2) Icône Favorites**

Contient les composants que l'utilisateur à définis comme favori.

### **B.3) Icône Recently-used**

Les composants récemment utilisés.

## **C) Éditeur du layout**

La fenêtre principale où l'utilisateur peut insérer les composants et créer des connexions entre les composants et la configuration de différents paramètres (le débit la longueur de séquence ...etc.), et permet aussi la modification des composants. Éditeur du layout est montré dans la figure (IV-5)

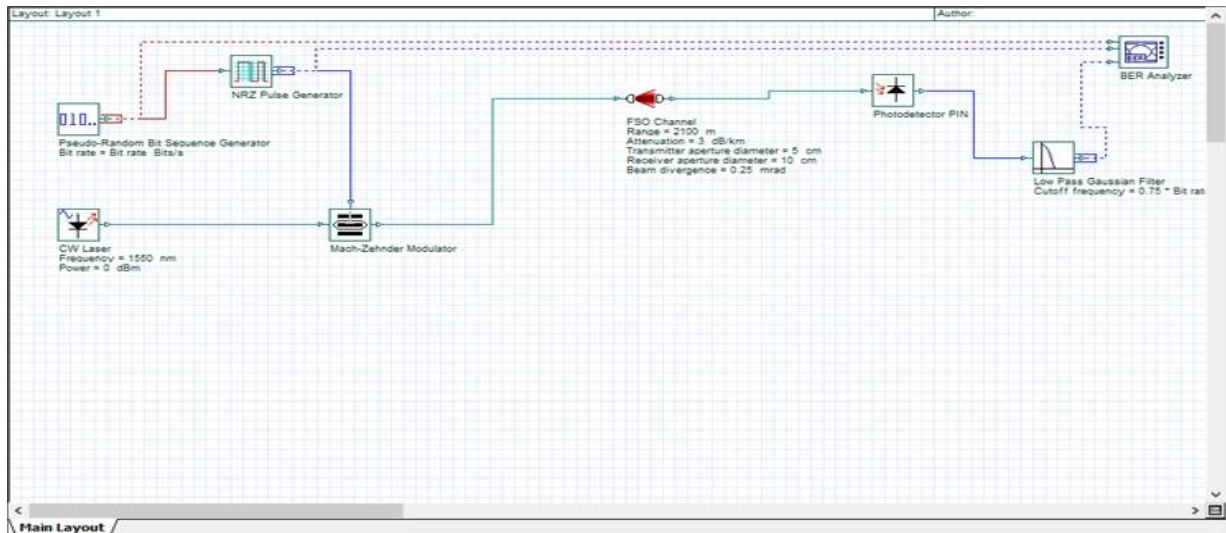


Figure IV-5 : Éditeur du layout.

### D) Navigateur de projet

Cette fenêtre contient tous les composants utilisés dans le projet. La figure IV-6 montre le navigateur de projet.

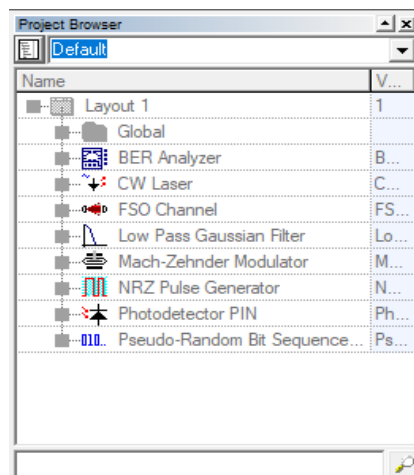


Figure IV-6 : Navigateur de projet.

## IV.3 Critères d'évaluation de la qualité d'une transmission

Pour évaluer la qualité du signal il existe plusieurs façons comme le diagramme d'œil, le taux d'erreur binaire (TEB) et le facteur de qualité  $Q$ .

### IV.3.1 Diagramme de l'œil

La façon la plus visuelle de juger la qualité d'un signal est d'observer le diagramme de l'œil. Ce type de diagramme est visualisé dans le domaine électrique après détection à l'aide d'une photodiode et d'un oscilloscope à échantillonnage [38,41].

Plus le signal optique détecté est de **mauvaise qualité**  $Q < 6$ , l'œil obtenu est plus

fermé. En revanche, plus la **qualité du signal optique** détecté est **fiable**, plus la détection du signal est sans erreur et par conséquent, **l'œil obtenu sera plus ouvert**. En conclusion, ce diagramme est un moyen visuel efficace jugeant la qualité du signal optique détecté par le récepteur optique. Les systèmes de transmissions optiques sont évalués par un analyseur de diagramme de l'œil [40].

### IV.3.2 Facteur de qualité Q

Utilisant un analyseur de diagramme de l'œil, le signal mesuré à l'entrée du canal contient une contribution due au signal utile ainsi qu'un apport en bruit dû à l'ensemble des éléments de la chaîne de transmission. Dans le diagramme de l'œil qui retrace le signal mesuré, le signal utile est représenté par les niveaux moyens  $I_1$  et  $I_2$ . Le 'bruit' représentant les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens, est quantifié en combinant les écarts-types  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ . Le facteur Q est défini donc à partir de relever du diagramme de l'œil (voir la figure IV-7) [40].

$$Q = \frac{I_1 - I_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (\text{IV-1})$$

Q est d'habitude exprimé en dB, en utilisant la formule suivante:

$$Q_{dB} = 20 \log(Q) \quad (\text{IV-2})$$

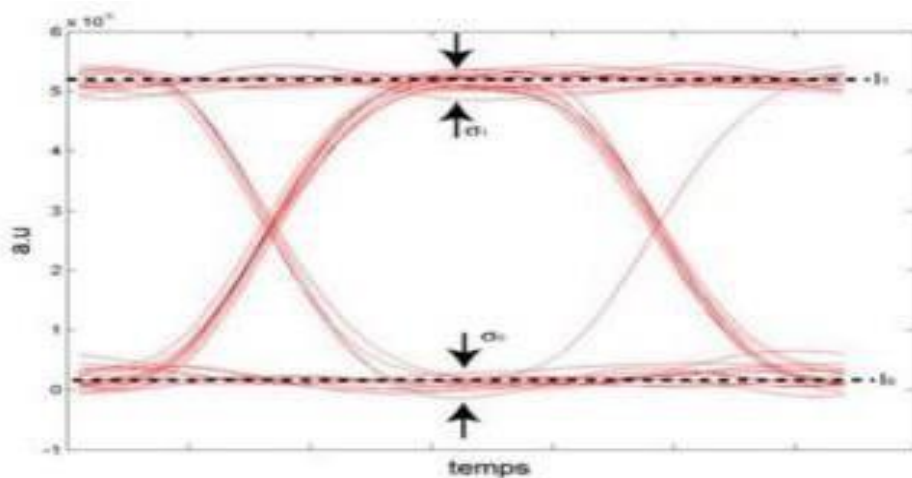


Figure IV-7 : diagramme de l'œil.

### IV.3.3 Taux d'erreur binaire (TEB)

Le signal transmis est un signal numérique binaire, c'est-à-dire une succession d'ondes « 0 » et de « 1 », le critère le plus intuitif quant à la caractérisation de la qualité du signal transmis est le taux d'erreurs binaire TEB, ou BER (Bit Error Ratio). Du fait du bruit et des effets de propagation, le signal se déforme et il peut arriver qu'un « 1 » soit détecté en lieu et place d'un « 0 » ou réciproquement. Si le signal à détecter passe de l'autre côté du seuil de décision. Le BER est le rapport du nombre d'erreurs de transmission, 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.

$$\text{BER} = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits transmis}}$$

nombre de  
bits transmis

(IV-3)

Un système de transmission optique est généralement considéré sans erreur, si ce **TEB** est **inférieur** à une valeur de  **$10^{-9}$ ,  $10^{-12}$  ou  $10^{-15}$**  suivant les systèmes présentés. Dans ce projet le TEB sélectionné est de  $10^{-9}$ . [40] Un signal de qualité idéale aura un BER nul.

#### IV.3.4 Relation entre TEB et le facteur de qualité Q

Si les « 1 » et les « 0 » du signal sont équiprobables, nous pouvons montrer que le facteur de qualité Q est relié au BER par la relation

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q} \quad (\text{IV.4})$$

Avec *erfc*, la fonction d'erreur complémentaire:

$$\operatorname{erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_X^{+\infty} e^{-y^2} \cdot dy \quad (\text{IV-5})$$

Le facteur Q est directement calculé par l'oscilloscope d'acquisition, et il est usuel d'utiliser **la courbe de correspondance du facteur Q avec le BER** qui est illustré par la figure IV-8 [42].

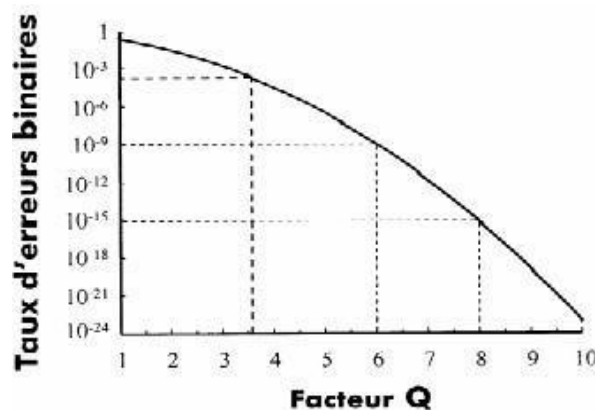


Figure IV-8 : Taux d'erreur binaire en fonction de facteur de qualité.

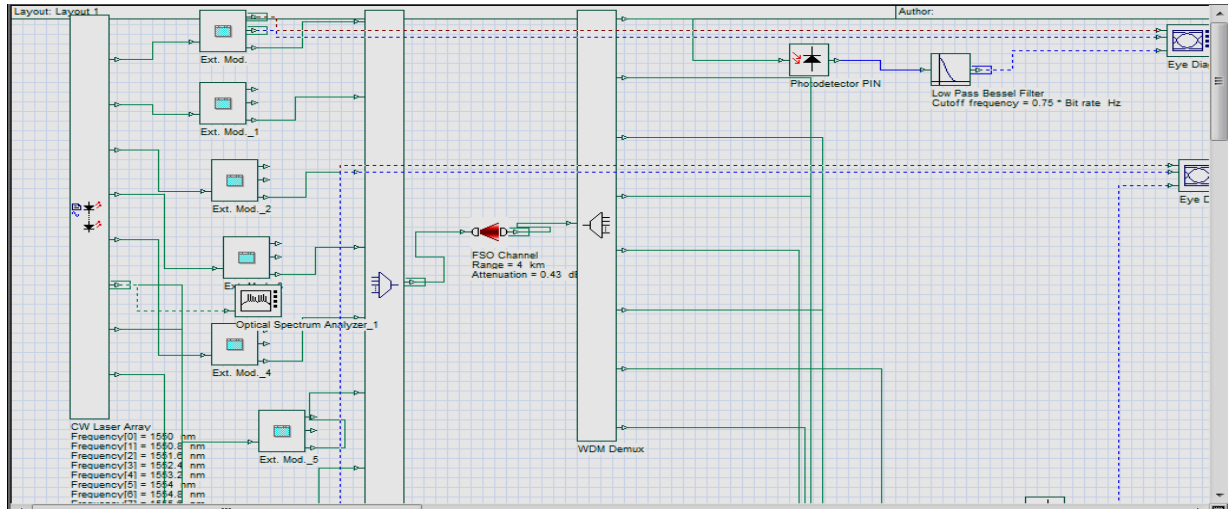
#### IV.4 Etude d'une liaison WDM/FSO

Dans cette partie, nous avons simulé une liaison WDM/FSO à 8 canaux (Voir Figure IV-9). La partie émission est composée d'un générateur de bits pseudo-aléatoire comme source d'informations pour chaque utilisateur suivi par un codeur de type RZ. Le débit élevé de cette liaison exige l'utilisation de la modulation externe (dans notre cas, nous avons utilisé le modulateur Mach Zehnder). Une Diode laser avec une puissance de 30 mW. L'espacement entre les canaux est de 0.8 nm, les fréquences utilisées sont comprises entre 1550 nm et 1555.6 nm. Dans la partie réception, un filtre optique de Bessel est utilisé suivi par une photodiode PIN pour convertir le signal optique reçu en un signal électrique. Un filtre passe bas de Bessel est utilisé dans le but d'éliminer le bruit.

Le tableau IV-1 suivant rassemble toutes les longueurs d'ondes associées à chaque utilisateur.

Utilisateur N°	1	2	3	4	5	6	7	8
Longueur d'onde (nm)	1550	1550.8	1551.6	1552.4	1553.2	1554	1554.8	1555.6

**Tableau IV-1 : Longueurs d'ondes utilisées pour le système WDM/FSO.**



**Figure IV-9 : Chaine de transmission WDM/FSO de 8 canaux.**

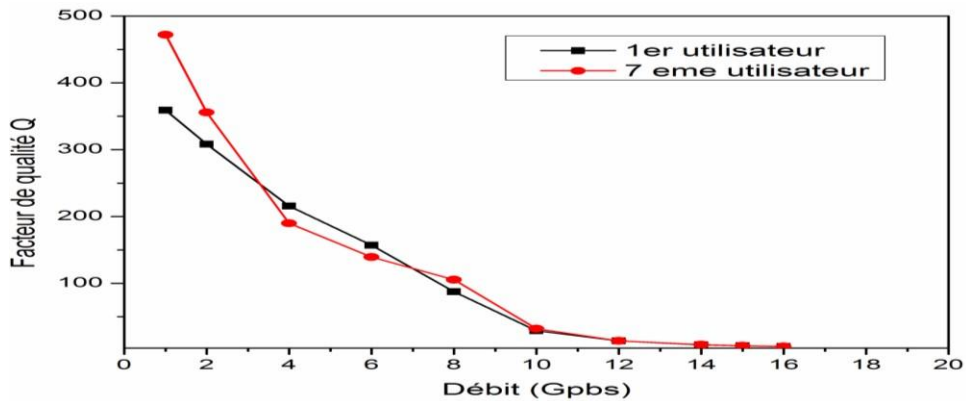
#### IV.4.1 Influence du débit sur la qualité de transmission

Dans cette partie, nous allons voir l'effet du changement du débit sur la qualité de transmission pour une liaison de **4 Km**. Le Tableau IV.2 montre nos résultats.

Débit (Gb/s)	1	2	4	6	8	10	12	14	15	16
Q – user 1	359.14	308.34	215.76	157.07	87.38	29.10	13.76	08.02	<b>6.58</b>	5.48
Q – user 7	471.99	355.92	189.84	139.31	105.30	32.02	13.78	8.19	<b>6.61</b>	5.52

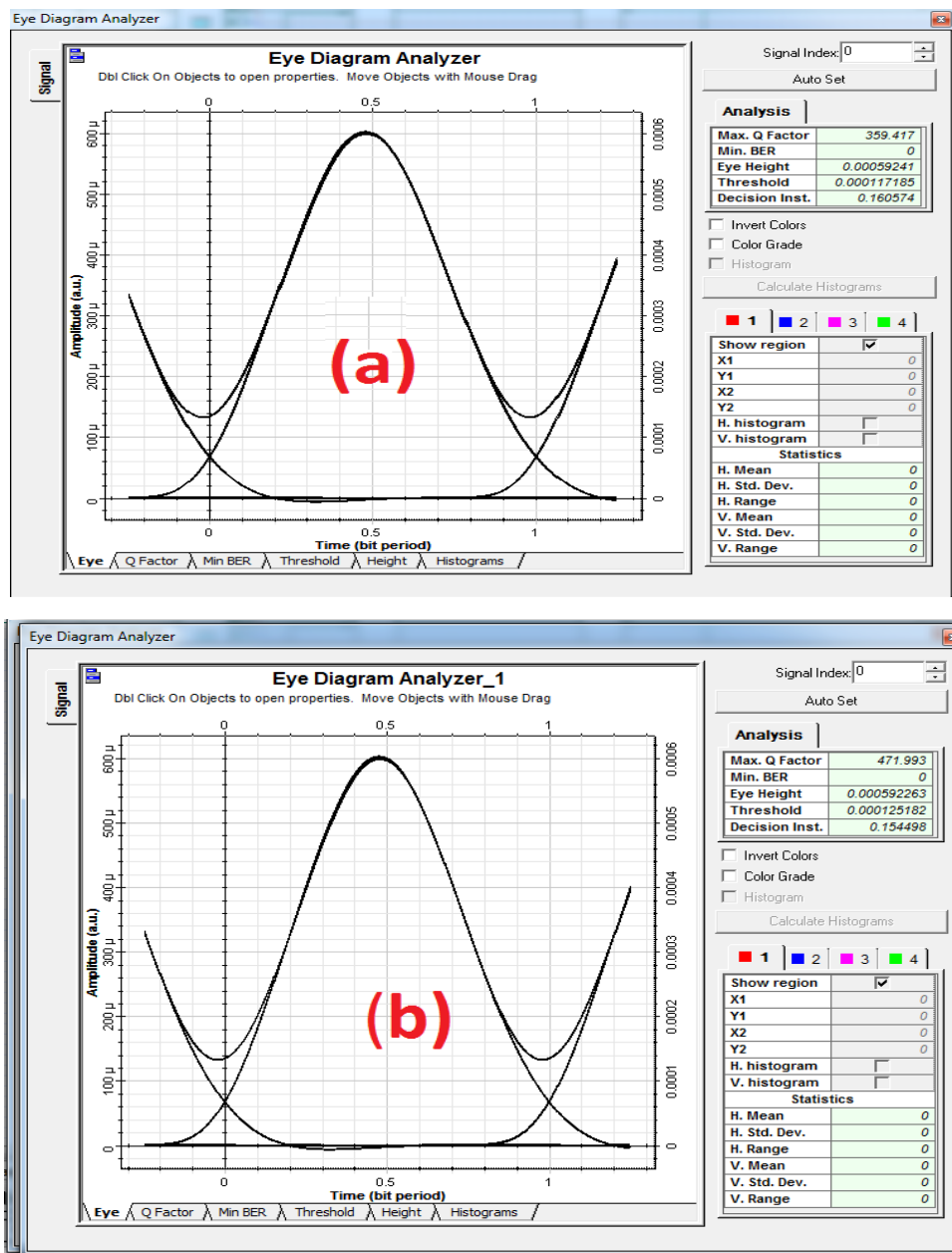
**Tableau IV-2 : Variation du facteur de qualité Q en fonction du débit.**

Les résultats obtenus dans le tableau IV-2 sont tracés dans la Figure IV.10



**Figure IV-10 : Variation du facteur de qualité Q en fonction du débit.**

Le tableau IV-2 et la figure IV-10 montrent que pour un débit de **1 Gbps** nous avons obtenu un facteur de qualité de **359.14** (pour l'utilisateur N°1) et **471.99** pour l'utilisateur N°7. On remarque que le facteur de qualité est **assez grand** montrant que **la transmission est excellente**. La figure IV-11 représente le diagramme de l'œil assez ouvert des deux canaux 1 et 7. On remarque aussi que l'augmentation du débit diminue le facteur de qualité, on peut déduire que le débit a une relation inversement proportionnelle avec le facteur de qualité. De plus, avec un débit de **15 Gbps par canal** (équivalent de  $15 \times 8 = 120$  Gbps), nous avons obtenu un facteur de qualité d'environ **6.58** (pour user N°1) et **6.61** pour (pour user N°7). Dans la suite, nous allons choisir un débit de **10 Gbps** pour chaque utilisateur.



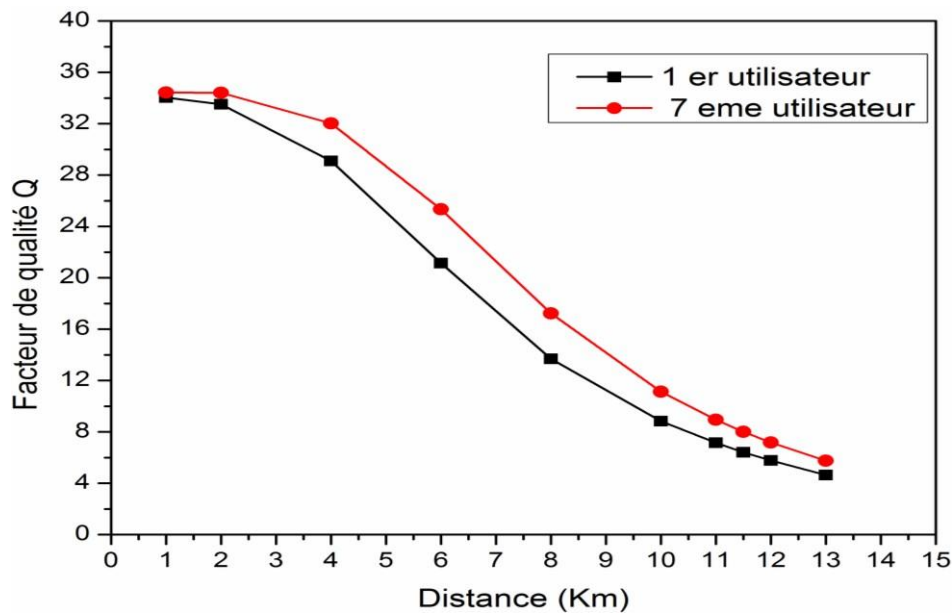
**Figure IV-11:** Diagramme de l'œil du canal 1 (a) et canal 7 (b) pour un débit de 1Gbps et 4km de distance dans un système WDM/FSO.

#### IV.4.2 Influence de la distance sur la qualité de transmission

Pour voir, l'effet de la distance sur la qualité de transmission de notre système WDM/FSO dans des conditions normales (Air pur : atténuation de 0.43 dB/Km), nous avons fixé le débit à **10 Gbps** pour chaque utilisateur. En faisant varier la distance de transmission, nous avons trouvé les résultats du tableau IV-3 qui est tracé sur la figure IV-12.

Distance (km)	1	2	4	6	8	10	11	11.5	12	13
Q – user 1	34.04	33.50	29.10	21.14	13.6	8.84	7.14	<b>6.41</b>	5.76	4.64
Q – user 7	34.43	34.40	32.02	25.34	17.2	11.1	8.94	8.00	<b>7.16</b>	5.75

**Tableau IV-3 :** Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance.



**Figure IV-12:** Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance.

On remarque que l'augmentation de la distance parcourue par le faisceau lumineux mène à la diminution du facteur de qualité Q. On peut dire que la distance est aussi inversement proportionnelle avec la qualité de transmission. D'après le tableau IV-3, on remarque que **notre système WDM/FSO conçu** pourra atteindre des distances assez longues (de l'ordre de **11.5 et 12 Km**).

### IV.4.3 Effets de l'atmosphère sur la qualité de transmission du système WDM/FSO

Les liaisons FSO sont exploitées en atmosphère ouverte, donc les conditions météorologiques locales et microphysique de l'atmosphère affectent fortement la propagation du signal lumineux. Certains paramètres peuvent dégrader la qualité du signal. La portée de la liaison FSO peut être déterminée par la visibilité du signal optique qui se propage dans l'espace libre. Plusieurs éléments peuvent limiter la visibilité et atténuent le signal à différentes intensités. La poussière, pluie, brume, neige...etc. Le tableau (IV-4) montre la condition climatique (différentes intensités de la pluie) et son atténuation [62].

Condition	Atténuation (dB/Km)
Air pur	0.43
Pluie faible (1mm/h)	1.076
Pluie modérée (3mm/h)	2.24
Pluie forte (9mm/h)	4.69

**Tableau IV-4** : Les conditions climatiques et leurs atténuations.

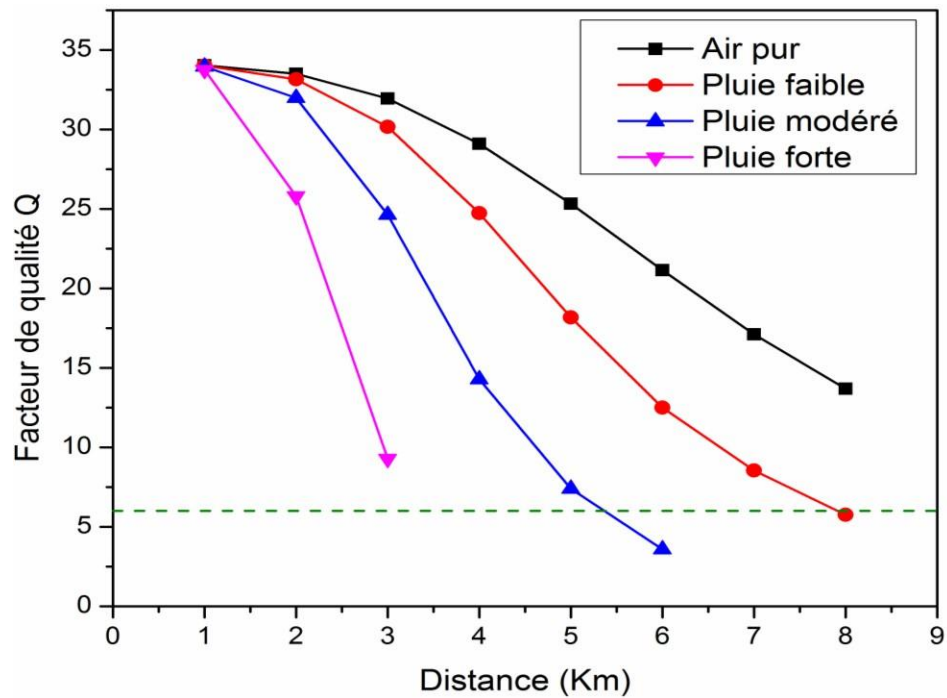
### IV.4.4 Distance maximale du système WDM/FSO dans différents cas climatiques

Dans cette section, nous allons voir l'effet des conditions climatique sur la qualité de transmission de notre système **WDM/FSO** conçu d'un côté et la distance maximale que peut atteindre ce système. Pour cela, nous avons choisi un débit de **10 Gbps** pour chaque utilisateur (ce qui donne un débit total de **80 Gbps** pour le système). Nos résultats obtenus pour différentes distances liées aux différentes conditions climatiques sont illustrées dans le tableau IV-5 suivant :

Distance (Km)	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Air pur</b>	34.04	33.50	31.94	29.10	25.33	21.14	17.12	13.68
<b>Pluie faible (1mm/h)</b>	34.01	33.15	30.17	24.74	18.18	12.51	<b>8.54</b>	5.76
<b>Pluie modérée (3mm/h)</b>	33.96	31.98	24.63	14.29	<b>7.39</b>	3.58	~0	~0
<b>Pluie forte (9mm/h)</b>	33.74	25.79	<b>9.29</b>	~0	~0	~0	~0	~0

**Tableau IV-5** : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance dans différents cas climatiques pour un system WDM/FSO.

Les résultats du tableau IV-5 sont tracés dans la figure IV-13 ci-dessous :



**Figure IV-13:** Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance dans différents cas climatiques.

On remarque que pour des conditions climatiques stables (le cas d'air pur), notre système peut atteindre des distances de **12 Km**. Tandis que les conditions climatiques qui conduisent à des atténuations élevées telle que : la pluie (dans notre cas) dégrade la qualité de la transmission. On remarque aussi que notre système **WDM/FSO** conçu peut se fonctionner pour une distance de plus de **7 Km** (cas d'une pluie faible), plus de **5 Km** (cas d'une pluie modéré) et plus de **3 Km** (cas d'une pluie forte). On constate même l'intensité de pluie peut considérablement détériorer les performances du système.

#### IV.4.5 Débit maximal du système WDM/FSO dans différents cas climatiques

Le même système a été utilisé pour voir quel est le débit Max, qu'on peut atteindre avec ce système WDM/FSO, dans une distance de **4 Km**. Le débit maximal que peut atteindre une liaison WDM/FSO est directement lié aux conditions climatologiques. En utilisant les valeurs d'atténuation des conditions climatologiques indiquées dans le Tableau IV-2. Les **Tableaux IV-6, IV-7 et IV-8** représentent la variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans trois cas climatiques (pluie faible, modérée et forte).

Débit par canal (Gbps)	1	2	4	6	8	10	12	14	14.5	15	16
Débit de la liaison (Gbps)	8	16	32	48	64	80	96	112	116	<b>120</b>	128
Facteur Q : Cas d'une Pluie faible (1mm/h)	283.8	223	149	108	59.	24.7	12.	7.69	6.95	<b>6.36</b>	5.33

**Tableau IV-6 :** Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie faible pour un système WDM/FSO.

Débit par canal (Gbps)	1	2	4	6	8	10	12	14	14.5	15	16
Débit de la liaison (Gbps)	8	16	32	48	64	80	96	<b>112</b>	116	120	128
Facteur Q : Cas d'une Pluie modéré (3mm/h)	132.0	94.	61.	43.	26.	14.2	9.2	<b>6.15</b>	5.64	5.23	4.50

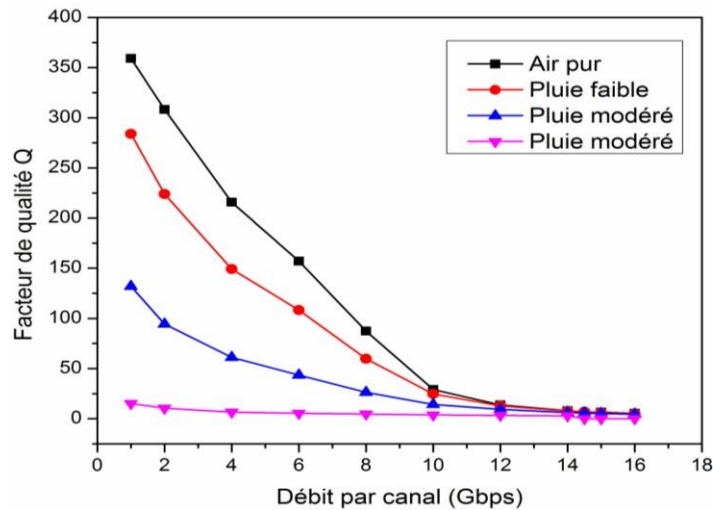
**Tableau IV-7 :** Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie modéré pour un système WDM/FSO.

Débit par canal (Gbps)	1	2	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16
Débit de la liaison (Gbps)	8	16	<b>32</b>	40	48	56	64	72	80	96	112	128
Facteur Q : Cas d'une Pluie forte (9mm/h)	15.2	10.	<b>6.6</b>	5.5	4.6	3.89	3.2	2.7	0	0	0	0

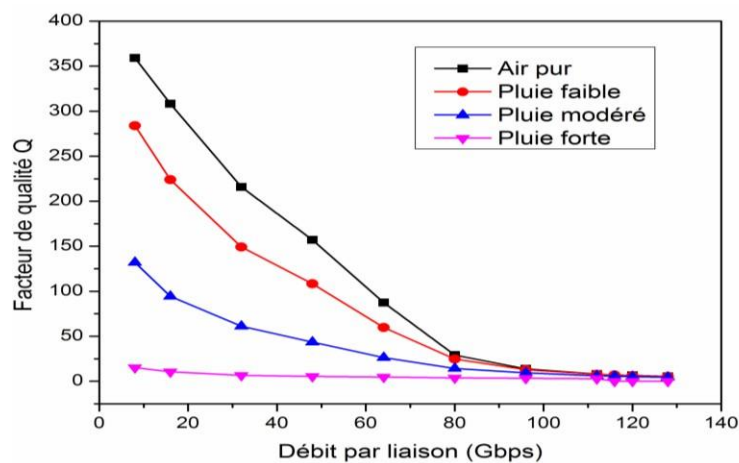
**Tableau IV-8 :** Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie forte pour un système WDM/FSO.

Les valeurs des Tableaux IV-6, IV-7 et IV-8 sont tracés dans les figures IV-14 et IV-15. Les résultats révèlent qu'avec cette liaison WDM/FSO conçu, nous pouvons maintenir un facteur de qualité d'environ 6 avec le **climat clair** à **15 Gbps** par utilisateur (**120 Gbps** par liaison) et sera dégradé en présence de la Pluie. Dans le cas d'une pluie faible, on observe que le débit maximal atteint est de **15 Gbps** par utilisateur (comme dans le cas d'un air pur), donc on peut dire que d'influence de la présence d'une pluie faible sur la qualité de transmission est

négligeable. Tandis que ce n'est pas les pour les deux cas restants (Pluie modéré et forte). Un débit max égal à **14 Gbps** par canal est obtenu dans le cas d'une pluie modéré. On remarque aussi que la pluie forte dégrade fortement la qualité de transmission. Un débit max par canal égal à **4 Gbps** est obtenu dans le cas d'une pluie forte. Donc, différentes intensités de la pluie mènent à des débits maximaux différents.



**Figure IV-14:** Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal dans trois intensités de pluie (faible, modéré et forte) pour une liaison WDM/FSO.



**Figure IV-15 :** Variation du facteur de qualité en fonction du débit par liaison dans trois intensités de pluie (faible, modéré et forte) pour une liaison WDM/FSO

## IV.5 Etude d'une liaison CWDM/FSO

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. Le système CWDM/FSO conçu pour 8 utilisateurs. Nous avons choisis un laser émettant des longueurs d'ondes avec un espacement de 20 nm dans la bande de 1270-1410 nm comme le montre le Tableau IV-9 et la figure IV-16 suivants :

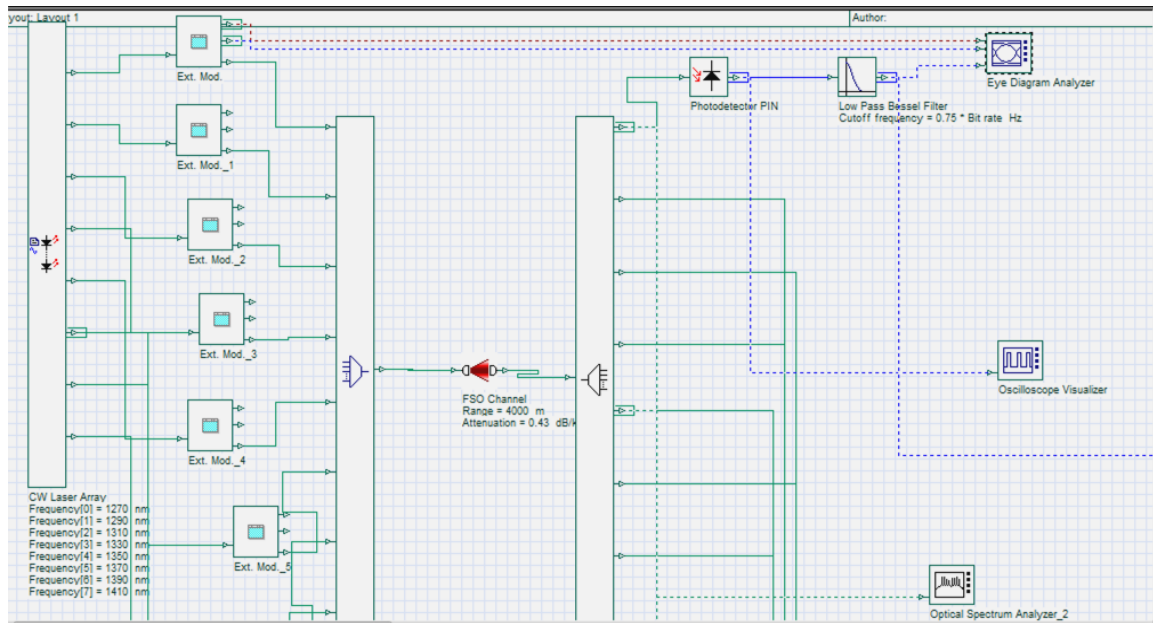


Figure IV-16 : Chaîne de transmission CWDM/FSO de 8 canaux.

Utilisateur N°	1	2	3	4	5	6	7	8
Longueur d'onde (nm)	1270	1290	1310	1330	1350	1370	1390	1410

Tableau IV-9 : Longueurs d'ondes utilisées pour le système CWDM/FSO.

#### IV.5.1 Etude du débit maximal de la liaison CWDM/FSO pour différents cas de Pluie

Dans cette partie, nous allons essayer de voir l'effet de l'intensité de la pluie sur la qualité de transmission ainsi que le débit max et la portée maximale que peut atteindre le système CWDM/FSO. Dans un premier temps nous avons fixé la distance à 4 Km. Les valeurs des tableaux IV-10, IV-11, IV-12 et IV-13 sont tracés dans la figure IV-17. Les résultats révèlent qu'avec cette liaison CWDM/FSO conçu nous pouvons maintenir un **facteur de qualité** d'environ **6** avec le **climat clair** à **15 Gbps** par utilisateur (**120 Gbps** par liaison) et sera dégradé en présence de la Pluie. Dans le cas d'une pluie faible, on observe que le débit maximal atteint est de **15 Gbps** par utilisateur (presque comme dans le cas d'un air pur), donc on peut dire que d'influence de la présence d'une pluie faible sur la qualité de transmission est négligeable. Tandis que, ce n'est pas les pour les deux cas restants (Pluie modéré et forte). Un débit max égal à **14.5 Gbps** par canal est obtenu dans le cas d'une pluie modéré. On remarque aussi que la pluie forte dégrade fortement la qualité de transmission. Un débit max par canal égal à **4 Gbps** est obtenu dans le cas d'une pluie forte. Donc, différentes intensités de la pluie mènent à des débits maximaux différents.

Débit par canal (Gbps)	1	2	4	6	8	10	12	14	14.5	15	16
Débit de la liaison (Gbps)	8	16	32	48	64	80	96	112	116	<b>120</b>	128
Facteur Q : Cas de l'air pur	192.6	180	138	142	78.	31.7	14.	8.19	7.34	<b>6.64</b>	5.45
	1	.18	.18	.68	81	2	11				

**Tableau IV-10 :** Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie faible pour un système CWDM/FSO.

Débit par canal (Gbps)	1	2	4	6	8	10	12	14	14.5	15	16
Débit de la liaison (Gbps)	8	16	32	48	64	80	96	112	116	<b>120</b>	128
Facteur Q : Cas d'une Pluie faible (1mm/h)	174.9	153	110	98.	59.	28.1	13.	7.96	7.16	<b>6.49</b>	5.44
	6	.85	.98	22	91	2	40				

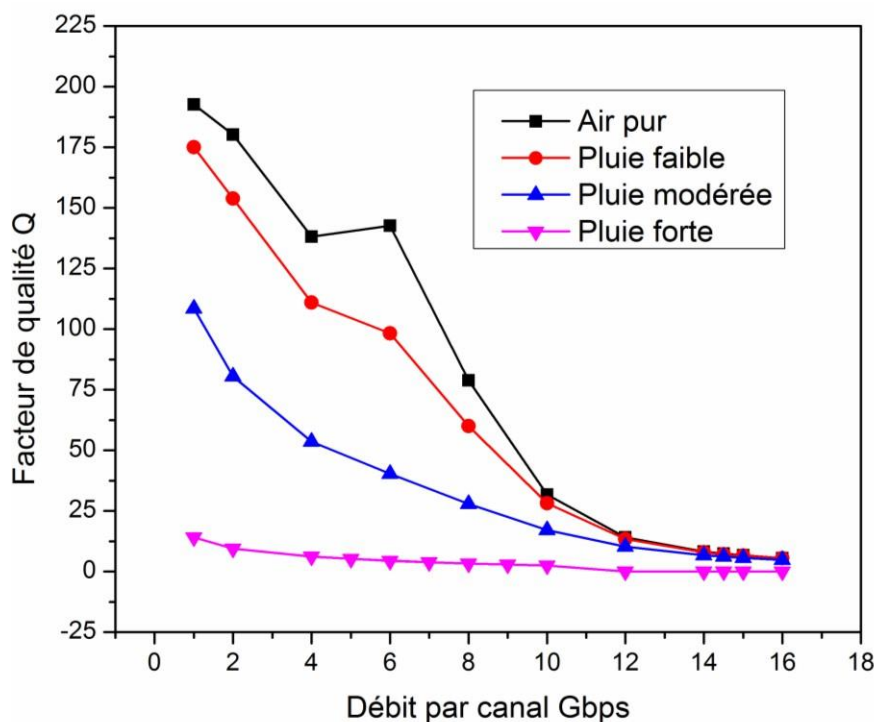
**Tableau IV-11 :** Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie faible pour un système CWDM/FSO.

Débit par canal (Gbps)	1	2	4	6	8	10	12	14	14.5	15	16
Débit de la liaison (Gbps)	8	16	32	48	64	80	96	112	<b>116</b>	120	128
Facteur Q : Cas d'une Pluie modéré (3mm/h)	108.4	80.	53.	40.	27.	17.0	10.	6.74	<b>6.15</b>	5.64	4.83
	1	53	62	30	82	7	29				

**Tableau IV-12 :** Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie modéré pour un système CWDM/FSO.

Débit par canal (Gbps)	1	2	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16
Débit de la liaison (Gbps)	8	16	<b>32</b>	40	48	56	64	72	80	96	112	128
Facteur Q : Cas d'une Pluie forte (9mm/h)	<b>14.0</b>	9.4	<b>6.1</b>	5.2	4.4	3.79	3.2	2.8	2.4	0	0	0
	1	7	<b>8</b>	1	2		7	5	9			

**Tableau IV-13 :** Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal et par liaison dans le cas d'une pluie forte pour un système CWDM/FSO.



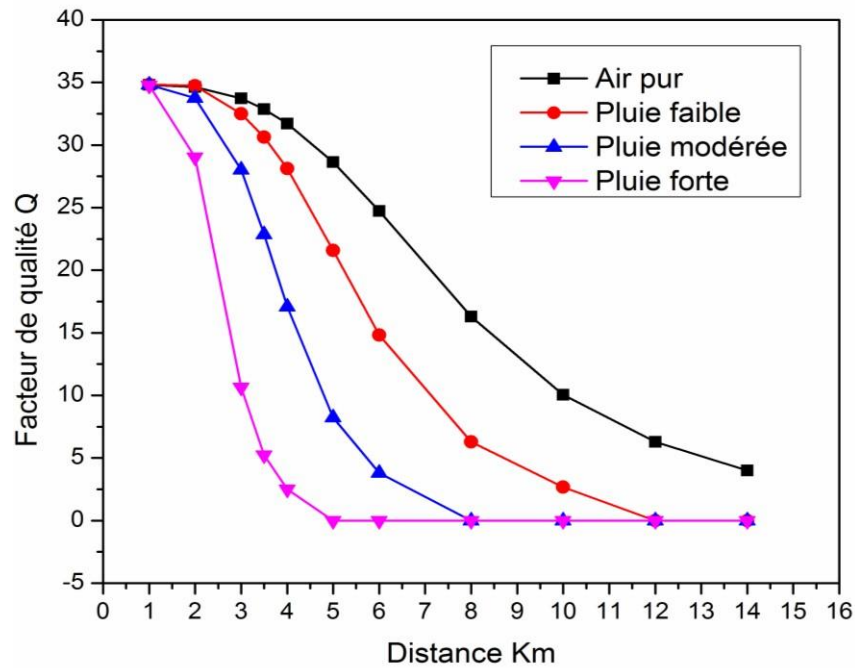
**Figure IV-17 :** Variation du facteur de qualité en fonction du débit par canal dans trois intensités de pluie (faible, modéré et forte) pour une liaison CWDM/FSO.

#### IV.5.2 Etude de la distance de la liaison CWDM/FSO pour différents cas Pluie

Dans cette partie, nous avons fixé le débit par utilisateur à 10 Gbps. Nos résultats sont illustrés dans la Figure IV-18 et Tableau IV-14.

Distance (Km)	1	2	3	3.5	5	6	8	10	12	14
<b>Air pur</b>	34.82	34.65	33.73	32.86	28.64	24.72	16.30	10.06	<b>6.29</b>	4.00
<b>Pluie faible</b>	34.83	34.74	32.51	30.63	21.58	14.82	<b>6.29</b>	2.66	0	0
<b>Pluie modérée</b>	34.82	33.76	28.02	22.85	<b>8.24</b>	3.81	0	0	0	0
<b>Pluie forte</b>	34.76	29.04	<b>10.63</b>	<b>5.24</b>	0	0	0	0	0	0

**Tableau IV-14 :** Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance dans différents cas climatiques pour un system CWDM/FSO.



**Figure IV-18** : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la distance dans différents cas climatiques pour un système CWDM/FSO.

D'après les résultats obtenus, nous constatant que la liaison CWDM/FSO conçu dans cette partie de travail peut atteindre des distances de **12 Km**. Tandis que les conditions climatiques qui conduisent à des atténuations élevées telle que la pluie (dans notre cas) dégrade la qualité de la transmission. On remarque aussi que notre système **CWDM/FSO** conçu peut se fonctionner pour une distance de plus de **8Km** (cas d'une pluie faible), un peu plus que **5Km** (cas d'une pluie modéré) et entre **3 et 3.5 Km** (cas d'une pluie forte). On constate même l'intensité de pluie peut considérablement détériorer les performances du système.

#### IV.6 Comparaison du System WDM/FSO et CWDM/FSO conçus

Dans le but de faire une comparaison et d'après les parties précédentes là ou l'on a étudié le système **WDM/FSO** d'une part et le système **CWDM/FSO** d'autre part, on peut dire les systèmes étudiées **WDM/FSO** et **CWDM/FSO** pour un débit de **10 Gbps** ont atteint une distance maximale **12Km** et pour une distance de **4 Km** ils ont atteint un débit maximal de **15 Gbps**. Ces valeurs optimales du système vont diminuer à cause du changement climatique (La pluie, dans notre cas). L'espacement de **0.8 nm** entre les canaux pour le système **WDM/FSO** permet de lui considérer comme solution pour le **haut débit**. L'inconvénient majeur du système **WDM/FSO** est le chevauchement rapide et l'interférence entre symbole causé par l'espacement entre les canaux. Tandis que, le large espacement de **20 nm** pour le système **CWDM/FSO** permet de lui considérer comme une solution pour les systèmes longues distance grâce à l'impossibilité de chevauchement entre les canaux. L'inconvénient majeur du système **CWDM/FSO** est l'occupation d'une grande bande passante contrairement à la **WDM/FSO**.

## IV.7 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** et **CWDM/FSO** de **8 canaux 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 de déterminer toute dégradation pouvant l'affecter. Les résultats obtenus montrent que les performances des systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux sont limités sous l'effet des conditions météorologiques (le cas de différentes intensités de pluie : faible, modéré et forte) et cela en termes de portée de la liaison FSO, le débit de transmission. A titre exemple, le système WDM/FSO avec un débit de 10 Gbps par canal (débit total de la liaison égal à 80 Gbps) atteint une portée maximale de 12 Km (air pur), 7 Km (pluie faible), 5 Km (pluie modéré) et 3Km (pluie forte). Tandis que le système CWDM/FSO atteint une portée maximale de 12 Km (air pur), 8 Km (pluie faible), 5 Km (pluie modéré) et 3-3.5Km (pluie forte). Ce qui nous permet de dire aussi que même l'intensité de pluie peut considérablement détériorer les performances du système.

Pour une distance de 4 Km, le système WDM/FSO atteint un débit max égal à 15 Gbps pour chaque utilisateur (dans le cas de l'air pur et pluie faible), 14 Gbps par canal (cas d'une pluie modéré) et 4 Gbps par canal (cas d'une pluie forte).

Une petite comparaison entre ces deux système **WDM/FSO** et **CWDM/FSO** nous a permis de dire :

- L'espacement de **0.8 nm** entre les canaux pour le système **WDM/FSO** permet de lui considérer comme solution pour le **haut débit**.
- L'inconvénient majeur du système **WDM/FSO** est le chevauchement rapide et l'interférence entre symbole causé par l'espacement entre les canaux.
- L'inconvénient majeur du système **CWDM/FSO** est l'occupation d'une grande bande passante contrairement à la **WDM/FSO**.

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

Ce mémoire nous a permis de modéliser des systèmes **WDM/FSO** et **CWDM/FSO**. Actuellement, une plus large adoption des liaisons optiques sans fil est nécessaire pour avoir une meilleure sécurisation des réseaux.

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 et CWDM/FSO.

**La communication optique en espace libre (FSO)** est une technologie de **communication optique** qui utilise la lumière se propageant dans l'espace libre pour transmettre **sans fil** des données, pour les **télécommunications** ou les **réseaux informatiques**.

Le haut débit, la grande distance de propagation et la bonne qualité de transmission combinés à un coût réduit sont des critères de plus en plus demandés.

Les résultats obtenus montrent que les performances des systèmes **WDM/FSO** et **CWDM/FSO multifaisceaux** sont limités sous l'effet des conditions météorologiques (le cas de différentes intensités de pluie : faible, modéré et forte), et cela en termes de portée de la liaison FSO, le débit de transmission. A titre exemple, le système WDM/FSO avec un débit de 10 Gbps par canal (débit total de la liaison égal à 80 Gbps) atteint une portée maximale de 12 Km (air pur), 7 Km (pluie faible), 5 Km (pluie modéré) et 3Km (pluie forte). Tandis que, le système **CWDM/FSO** atteint une portée maximale de 12 Km (air pur), 8 Km (pluie faible), 5 Km (pluie modéré) et 3-3.5Km (pluie forte). Ce qui nous permet de dire aussi que même l'intensité de pluie peut considérablement détériorer les performances du système.

Les résultats obtenus montrent que les performances des systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux sont limités 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 et le nombre de canaux FSO.

Les conditions météorologiques constituent un obstacle majeur dans les systèmes de télécommunication optique WDM/FSO et CWDM/FSO, car ils limitent la distance de transmission.

L'étude comparative entre les performances des deux systèmes WDM/FSO et CWDM/FSO multifaisceaux a révélé :

- \*- L'espacement de **0.8 nm** entre les canaux pour le système **WDM/FSO** permet de le considérer comme solution pour le **haut débit**.
- \*- L'inconvénient majeur du système WDM/FSO est le chevauchement rapide et l'interférence entre symbole causé par l'espacement entre les canaux.
- \*- L'inconvénient majeur du système **CWDM/FSO** est l'occupation d'une grande bande passante contrairement à la **WDM/FSO**.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dans, nous pouvons citer :

Comme perspectives :

- \*- Utilisation de nouveaux formats de modulation visant à améliorer la qualité du signal transmis comme les modulations codées (*Turbocodes*).
- \*- L'étude des liaisons de communication avec lumière visible (*VLC Visible light communication*) qui est un domaine de recherche en pleine expansion.
- \*- Extension de l'étude à d'autres types de codes et autres techniques de détection.
- \*- Utilisation de la technologie FSO dans le système SAC-OCDMA.

# Bibliographie

## Bibliographie

- [1] NOUN Amina, ATAMENIA Fairouz, «Etude et analyse des performances du système WDM/FSO multifaisceaux sous l'effet de conditions météorologiques», Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Licence Académique, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2021.
- [2] BERRA Salah, BENAMARA Soufiene, «Evaluation Des Performances D'un Système de Télécommunication Hybride SAC-OCDMA/FSO», Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme de Master Académique, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2019.
- [3] ROUISSAT Mehdi, « Etude et Modélisation d'une Liaison Optique Sans Fil», Thèse Pour obtenir le grade de docteur en télécommunication, Université Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2013.
- [4] H. Brahimi, « Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence », Thèse de l'université Paul Sabatier-Toulouse III, France, 2010.
- [5] HADJERES Ismail, Noura Imad, «Etude et simulation de la technique CDMA appliqué aux transmissions optiques utilisant les réseaux de Bragg», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2016.
- [6] Site web : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre\\_optique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique).
- [7] FARHAOUI Fatima Zohra, ZAIDI Fatima Zohra, «Etude et Simulation d'une Chaîne de Transmission Numérique sur Fibre Optique Haut Débit », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Dr. Tahar Moulay- SAIDA, 2017.
- [8] Sarah Benameur, «La mise en œuvre, dans une chaîne de transmission optique, à haut débit, de filtres optiques à longueur d'onde centrale réglable», », thèse de doctorat en électronique Optique / photonique. Université de Limoges, 2015..
- [9] Pierre Lecoy « Télécoms sur fibres optiques », Hermès – Lavoisier, Novembre 2007.
- [10] Y. Sumaetu, K.IGA, « Transmissions sur fibres optiques “, Edition Masson, 1984.
- [11] MELLOUK Abdellatif, ZIANI Oualid Farid, «Analyse des performances d'un système de communication optique en utilisant différents canaux : FSO, OWC et SMF», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2017.
- [12] HADJERES Ismail, Noura Imad, «Etude et simulation de la technique CDMA appliqué aux transmissions optiques utilisant les réseaux de Bragg», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2016.
- [13] S. BEDDIAF et S. YAHIA, Technologie Radio sur Fibre pour les applications sans fil (5G), Guelma: Université 8 Mai 1945.
- [14] Benzerdjeb Choukri, Selka soufyane, « Encodage de l'amplitude spectrale pour OCDMA », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2013.

## Bibliographie

- [15] Sabi S. et Vijayakumar N, « Simulation of a Modem using Digital Pulse Interval Modulation for Wireless Optical Links», 10th National Conference on Technological Trends (NCTT09)67 Nov 2009.
- [16] LITIM Salsabil, BELAID Chourouk, «Simulation d'une chaîne optique multiplexée», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Badji Mokhtar Annaba, 2020.
- [17] HARICHANE Yassine, BENKRAOUDA Ilyas, «Étude et évaluation des performances d'un système de communication sans fil optique en espace libre (FSO) », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Hassiba Benbouali Chlef, 2019.
- [18] Y. Cojan et J. C. Fontanella, « Propagation du rayonnement dans l'atmosphère », Techniques de l'ingénieur, Traité Electronique, Paris, Dec., 1995.
- [19] X. Zhu et J. Kahn, « Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels», IEEE Trans. on Communications, no. 2, pp. 1293–1300, 2003.
- [20] Site web: <https://www.electronics-notes.com/>
- [21] Site officiel du constructeur MRV ([www.mrv.com](http://www.mrv.com))
- [22] Site officiel de l'autorité de régulation de la poste et des télécommunications ([www.arpt.dz](http://www.arpt.dz))
- [23] O. RINGAR, « Utilisation des techniques avancées d'Emission/Réception multi- antennes pour une transmission optique large bande », Thèse de l'université de LIMOGES, France, 2015.
- [24] site web : <http://deptinfo.cnam.fr/>
- [25]site web : <http://docplayer.fr>
- [26] Djellouli Mohamed, Hamouda Abdelmadjid, « L'amplification optique et son intérêt majeur dans les réseaux des télécommunications», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, 2016, Université Dr. Tahar Moulay- SAIDA, 2016.
- [27] S. CORDETTE, « Continuum de fréquences optiques pour application OCDMA » Electronique et Communications. Thèse de doctorat. Ecole Doctorale d'Informatique, Télécommunications et Electronique de paris, 2010.
- [28] REGIS. A ; VENOT.R « Les techniques de transmission optiques ».
- [29]SEGURA. D ; LABAUD. A ; 2007 - « Réseaux optiques et routage optique ».
- [30] BELHADJ Hiba Nour El Imene, AMMOUR Zohra,« Etude et Simulation d'une liaison optique avec la technique WDM », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Dr. Tahar Moulay, SAIDA, 2019.
- [31] site web: <http://www.igm.univmlv.fr/>
- [32] Lakhdar Fatima Zahra, Chibani Sara, «Etude et simulation d'une source optique débitant des impulsions à ultra-haut débits», Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Dr. Tahar Moulay- SAIDA, 2020.

## Bibliographie

- [33] P.Lecoy, Télécoms sur fibres optiques 2me ed. Hermes, réseaux et télécommunication, 1997.
- [34] Z. HACHEMI ,« Etude et simulation d'une chaine de transmission pour un débit de 40G.bit/s» ,Mémoire de Master en Génie Electrique , Université Dr Moulay Tahar de Saïda.
- [35] R. BOULILA , S.HAOUCHE , «Etude des différents multiplexages dans les liaisons par fibre optique», Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme de master en Electronique option Réseaux &Télécoms, Université Saad Dahlab de Blida, Année2011/2012.
- [36] Gorshe DS, Raghavan A, Starr T, Galli S. « Broadband access: Wire line and Wireless-alternatives for internet services»,1st ed. United Kingdom: John Wiley& Sons, Ltd, 2014.
- [37] M. Nazir, F. Arshad, R. Asif, « Design and evaluation of power budget for a bidirectional CWDM-Passive Optical Network», In: International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE), Islamabad, Pakistan, 04 May 2017.
- [38] H. Takara, S. Kawanishi et M. Saruwatari, «Optical signal eye diagram measurement with subpicosecond resolution using optical sampling,» chez Electronics Letters, 1996, pp. p 1399 -1400
- [39] UIT-R F.2106, « Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre », Rapport, 2007.
- [40] 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.
- [41] H. Ohta, N. Banjo, N. Yamada, S. Nogiwa et Y. Yanagi, «Measuring eye diagram of 320 Gbit/s optical signal by optical sampling using passively modelocked fibre laser,» 2001, pp. 1541-1542.
- [42] L. GRAINI, Applications des similaritons dans les systèmes de télécommunications par fibre optique à très haut débit, ANNABA: UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, 2017.