

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



**Mémoire de fin d'étude**  
**Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**  
Filière : **Télécommunications**  
Spécialité : **Systemes de Télécommunications**

---

**Evaluation Des Performances D'un Système de  
Télécommunication Hybride SAC-OCDMA/FSO**

---

Présenté par :

-----  
**BERRA Salah**  
**BENAMARA Soufiene**  
-----

Sous la direction de :

**Dr. KASSA BAGHDOUCHE Lazhar**

Juillet 2019

# Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous adressons nos remerciements :

Tous d'abord à nos chers parents, merci d'avoir été là toutes ces années de nous avoir aidés à faire ce très long parcours, merci aussi de nous avoir guidé vers le chemin droit, merci infiniment pour l'encouragement et l'aide pour arriver à ce stade de notre formation. En second lieu, à notre encadreur Dr. KASSA BAGHDOUCHE Lazhar, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos plus grands remerciements vont à nos profs qui tout au long de notre cursus nous ont appris que le goût de la constance dans le travail scientifique est la clef de tout succès. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Dédicace

Au nom de DIEU, le clément, le tout Puissant, le très miséricordieux

Nous dédions ce travail à :

Nos chers parents qui n'ont jamais cessé de nous donner l'amour nécessaire  
pour être-ce-que nous sommes aujourd'hui

Nos chers grands parents

À toute la famille

À tous nos amis

À toute personne qu'on aime et qui nous aime

À tous ceux qui ont partagé notre joie et peines

À toute la promotion 2019

Et tous ceux qui nous estiment

## Résumé

Ces dernières décennies, la technique d'accès multiple par répartition optique de code (OCDMA) est plus utilisée dans le monde de réseau de télécommunications grâce à sa capacité d'accès asynchrone, sa rapidité, son efficacité, sa sécurité et sa bande passante illimitée. En particulier, la technique SAC-OCDMA permet à plusieurs utilisateurs de transmettre simultanément des informations sur le même canal ce qui offre une meilleure solution pour réduire l'effet des interférences entre symboles. Cela est rendu possible grâce à l'utilisation de différentes méthodes de détection. Également, les communications optiques dans l'espace libre (FSO) sont préférées aux communications radio fréquences car ils présentent une transmission longue portée avec une bande passante élevée. Le canal FSO a été un sujet d'étude important dans le domaine des télécommunications en raison des avantages qu'il présente, notamment son modèle plus réaliste. Cependant, ce canal présente une limitation due à l'atténuation liée aux différentes conditions météorologiques. Notre étude porte sur l'impact de distance de l'espace libre sur les performances d'un système de télécommunication hybride SAC-OCDMA/FSO dans différentes conditions météorologiques. Dans ce cadre, le taux d'erreur binaire (TEB) et le diagramme d'œil sont employés pour mesurer les performances de système. Ces performances sont évaluées pour un système hybride utilisant deux codes (MD et EDW). Les résultats obtenus montrent que le code EDW donne de meilleures performances.

**Mots clés :** CDMA optique, encodage de l'amplitude spectrale SAC-OCDMA, FSO, EDW, MD, TEB, diagramme de l'œil.

## Abstract

In recent decades, Optical Code Division Multiple Access (OCDMA) technology has been used more extensively in the telecommunications network due to its asynchronous access capability, speed, efficiency, security and unlimited bandwidth. In particular, SAC-OCDMA technique allows several users to simultaneously transmit information on the same channel which offers a better solution for reducing the impact of inter symbol interference (ISI). This is possible through the use of different detection methods. Also, free-space optical communications (FSO) technology is preferred over radio frequency communications because it has long-range transmission with high bandwidth. The FSO channel has been an important subject of study in the telecommunications field because of its advantages, including its more realistic model. However, this channel has a limitation due to the attenuation related to different weather conditions. In this context, our study investigates the distance impact of free space on the performances of a hybrid SAC-OCDMA/FSO telecommunication system under different weather conditions. In this framework, bit error rate (BER), Q factor and eye diagram are used to measure system performances. These performances are evaluated for a hybrid system using two codes (MD and EDW). The results obtained show that the EDW code gives better performance.

**Key words:** optical CDMA, spectral amplitude encoding SAC-OCDMA, FSO, EDW, MD, BER, Q factor and eye diagram.

# Table des Matières

<b>Remerciement</b>	
<b>Dédicace</b>	
<b>Résumé</b>	
<b>Table des Matières</b> .....	<b>i</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>iv</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>vii</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>viii</b>
<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapiter1: La technologie FSO : Principe et architectures</b>	
1.1 Introduction .....	3
1.2 Historique sur la technologie FSO.....	3
1.3 Principe de fonctionnement de la Technologie FSO .....	5
1.4Architectures de base de la technologie FSO.....	7
1.5 Structure d'un système de communication optique FSO .....	8
1.5.1. L'émetteur FSO.....	8
1.5.2 Modèles du canal FSO.....	11
1.5.2.1 Pertes atmosphériques:.....	12
1.5.2.2 Pertes dues à l'absorption et à la diffusion .....	12
1.5.2.3Perte de parcours dans un système de communication FSO.....	15
1.5.2.4 Perte de divergence de faisceau.....	15
1.5.2.5 Perte due aux conditions météorologiques:.....	17
1.5.3 Le récepteur FSO.....	21

1.5.3.1 Les photo détecteur .....	22
1.5.3.2 photo doide PIN.....	22
1.5.3.3 photo doide ADP.....	23
1.6 Technologie FSO Vs Fibre optique .....	24
1.7 Conclusion :.....	27
<b>Chapiter2:OCDMA par encodage spectral d'amplitude : principe et architecture</b>	
2.1 Introduction.....	28
2.2 Généralisés sur les techniques d'accès multiples en communications optiques .....	28
2.2.1 Accès multiple par répartition de temps en optique .....	28
2.2.1.1 La technique OTDM.....	28
2.2.1.2 La Technique ETDM .....	31
2.2.2 Accès multiple par répartition de longueurs d'onde .....	32
2.2.3 Accès multiple par répartition de codes optiques OCDMA.....	34
2.3 Principe de la technique OCDMA.....	34
2.4 Différents architectures du système OCDMA .....	36
2.4.1 OCDMA temporel.....	37
2.4.2 OCDMA Spectral.....	39
2.4.3 OCDMA Hybride.....	42
2.4.3.1 W-T /OCDMA .....	42
2.4.3.2 T-S/OCDMA.....	43
2.4.3.3 WDM /OCDMA.....	43
2.5 Techniques de détection en SAC-OCDMA .....	44
2.5.1 Détection balancée .....	44
2.5.2 Détection directe .....	46

2.6 Les propriétés des codes utilisés en SAC-OCDMA.....	49
2.6.1 Construction de codes.....	49
2.6.1.1 Construction de code multi diagonale MD .....	49
2.6.1.2 Conception du code MD .....	49
2.6.2 Structure de code EDW .....	52
2.6.2.1 Algorithme de génération de code EDW.....	53
2.6.3 System SAC-OCDMA avec Les codecs .....	55
2.7 Conclusion.....	56
<b>Chapiter3:Résultats et Interprétations</b>	
3.1 Introduction.....	58
3.2 Citer de Critère de qualité .....	58
3.2.1 Taux d'erreurs binaires.....	59
3.2.2 Facteur de qualité.....	59
3.2.3 Diagramme de l'œil.....	60
3.3 Principe de fonctionnement du système hybride SAC-OCDMA/FSO .....	60
3.4 Modèle du système SAC-OCDMA/FSO sous Opti-System .....	61
3.4.1 Partie d'émission .....	63
3.4.2 Partie de réception.....	67
3.4.3 Paramètres de la simulation.....	69
3.5 Génération des codes sous Opti-System.....	70
3.6 Etude des performances du système SAC-OCDMA/FSO .....	72
3.6.1 L'influence de variation du diamètre de l'émetteur FSO .....	72
3.6.2 L'influence de variation du diamètre de l'ouverture d'un récepteur FSO .....	73
3.6.3 L'influence de variation de la divergence d'un faisceau optique .....	73
3.6.4 L'influence de variation de nombre des utilisateurs dans la system FSO.....	74



3.7 Performances du système SAC-OCDMA/FSO sous conditions météorologiques .....	75
3.7.1 météorologiques claire .....	76
3.7.2 Pluie légère et légère brume .....	77
3.7.3 fort brouillard et fortes pluie .....	79
3.8 Compression entre les codes MD et EDW : .....	80
3.9 Conclusion.....	81
Conclusion Générale.....	83
Références bibliographiques.....	85

# Liste des figures

## Chapiter1: La technologie FSO : Principe et architectures

Figure 1.1:Le principe de fonctionnement du photophone proposé par Graham Bell .....	4
Figure 1. 2: Modulateurs optiques. (a) Modulateur interne. b) Modulateur externe .....	5
Figure 1.3:les type des donnees que utilise dans le système FSO.....	6
Figure1. 4:Configuration de base d'une liaison optique en espace libre .....	6
Figure1. 5: <b>Les</b> différentes zones du spectre lumineux.....	7
Figure 1.6: Topologies de réseaux optiques en espace libre :(a) point-multipoints et maillage. (b) point-à-point et (c) anneau et point-à-point.....	8
Figure1. 7: Architecture une DEL et Structure d'une diode laser.....	9
Figure 1.8: Démonstration de l'émission optique de la source lumineuse. (a) Emission lumineuse de Lambertien source. b) Émission de lumière utilisant une optique formant un faisceau .....	10
Figure1. 9: Transmittance atmosphérique (atténuation) vs. Longueur d'onde .....	12
Figure 1.10: Taille moyenne des particules et densité correspondante dans l'atmosphère .....	12
Figure1.11 : le mécanisme de diffusion du modèle en couches de l'atmosphère .....	15
Figure1.12 : Perte due à la divergence du faisceau.....	16
Figure1.13 : Expandeur de faisceau pour augmenter l'ouverture de diffraction .....	18
Figure1.14 : Atténuation vs visibilité. (a) Pour le brouillard épais et les nuages. (b) Pour un léger brouillard et de la brume .....	20
Figure1.15 : Courbe de l'atténuation pour le brouillard, la neige et la pluie .....	22
Figure1.16 : Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (Light point) et celui du service assuré par des fibres optiques dans une région urbaine.....	26
Figure1.17 : Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (Light point) et celui du service assuré par des fibres optiques sur un campus.....	27

## Chapiter2:OCDMA par encodage spectral d'amplitude : principe et architecture

Figure2.1- Emetteur OTDM à N utilisateurs .....	29
Figure2. 2- Exemple d'un multiplexage OTDM à (04) utilisateurs .....	30
Figure2. 3- Récepteur OTDM à N utilisateurs .....	31
Figure2. 4 - Emetteur ETDM à N utilisateurs .....	31

Figure2. 5- Système WDMA à N utilisateurs .....	32
Figure2. 6 – SpectreWDM avec $\Delta\lambda$ l'espacement entre les canaux .....	33
Figure2. 7 - Fenêtres de transmission à faibles pertes .....	33
Figure2. 8 - Codage de données en OCDMA .....	35
Figure2. 9 - Architecture d'un émetteur-récepteur OCDMA .....	36
Figure2. 10- Classification des techniques OCDMA incohérentes .....	36
Figure2. 11 - Types d'OCDMA temporel : a) DS-OCDMA , b) TPE-OCDMA .....	37
Figure2. 12 - Structure d'un système DS-OCDMA .....	37
Figure2. 13 - Technique du codage temporel .....	38
Figure2. 14 - Types d'OCDMA spectral : a) SAC-OCDMA, b) SPE-OCDMA .....	39
Figure2. 15 - Principe de l'encodage spectral SAC-OCDMA : a) pour usager désiré avec le code # i , b) pour un interférent avec le code # j .....	40
Figure2. 16 - Technologie d'encodage OCDMA spectral : a) Masque d'amplitude , b) AWG , c) Réseaux de Bragg , d) Démultiplexeurs et multiplexeurs optiques .....	41
Figure2. 17 - Architecture d'un réseau W-T / OCDMA .....	42
Figure2. 18- Architecture d'un réseau T-S / OCDMA .....	43
Figure2. 19- Architecture d'un système WDM / OCDMA PON .....	44
Figure2. 20 - Architecture d'un système SAC-OCDMA à détection équilibrée.....	45
Figure2. 21 - Exemple de fonctionnement de la détection équilibrée.....	46
Figure2. 22: Configuration du système SAC – OCDMA pour $W = 2$ en utilisant la détection direct pour le code généralisé.....	47
Figure2. 23 : L'organigramme de l'algorithme EDW.....	54
Figure2. 24: block Diagram SAC-OCDMA.....	56

### Chapiter3:Résultats et Interprétations

Figure 3.1 : Daigramme de l'ioel d'un signal au format NRZ.....	60
Figure 3 2: Bloc daigramme de simulation SAC-OCDMA/FSO .....	61
Figure 3 3: Modèle du système SAC-OCDMA/FSO utilisant le code MD sous Optisystem .....	62
Figure 3 4:Modèle du système SAC-OCDMA/FSO utilisant le code EDW sous Optisystem . .....	62
Figure 3 5:Bloc d'émission pour chaque utilisateur d'un système SAC-OCDMA/FSO. ....	63
Figure 3 6: modèle de la source de lumière large bande. ....	63
Figure 3 7: modèle de simulation de générateurd'impulsion.....	64
Figure 3.8: Paramètres du générateur pour chaque utilisateur. ....	64
Figure 3 9: modèle de simulation de Mach-Zehnder .....	65
Figure 3 10: Paramètres de Modulateur de Mach-Zehnder pour chaque utilisateur .....	65
Figure 3 11: Modèle de simulation de multiplexeur WDM .....	65
Figure 3 12: Paramètres de multiplexeur de WDM .....	66
Figure 3 13: Modèle de simulation de coupleur.....	66

Figure 3 14: Modèle de simulation du canal FSO.....	67
Figure 3 15: Modèle de simulation de la partie de réception. ....	67
Figure 3 16 : Modèle de simulation de Splitter. ....	68
Figure 3 17: Modèle de simulation de photodétecteur. ....	68
Figure 3 18: Modèle de simulation de filtre .....	69
Figure 3 19: Caractéristiques de filtre passe bas pour chaque utilisateur.....	69
Figure 3.20: Q vs diamètre d'un émetteur FSO avec un format de code EDW et MD.....	72
Figure 3.21:Q vs diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO avec un Codes EDW et MD .....	73
Figure 3.22:variation de divergence de faisceaux avec la distance de liaison FSO. ....	74
Figure 3.23: l'effet de nombre des utilisateurs sur les performances du système SAC-OCDMA/FSO (EDW).....	74
Figure 3.24 : l'effet de nombre des utilisateurs sur les performances du système SACOCDMA/FSO (MD).....	75
Figure 3.25: Evolution du facteur de qualité en fonction de la distance de liaison FSO . ....	76
Figure 3 26: Evolution du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la distance de liaison FSO	76
Figure 3.27: Diagramme de l'œil du système SAC-OCDMA/FSO utilisant le code (a) EDW (b) MD. La distance de liaison FSO est 7Km.....	77
Figure 3.28: Evolution du facteur de qualité en fonction de la distance de système SAC-OCDMA FSO.....	77
Figure 3 29: Evolution du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la distance de liaison FSO..	78
Figure 3 30: Diagramme de l'œil du système SAC-OCDMA/FSO utilisant le code (a) EDW (b) MD. La distance de liaison FSO est 2.5 Km. ....	78
Figure 3 31: Evolution du facteur de qualité en fonction de la distance de liaison FSO .....	79
Figure 3 32: Evolution du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la distance de liaison FSO	79
Figure 3 33: Diagramme de l'œil du système SAC-OCDMA/FSO utilisant le code (a) EDW (b) MD. La distance de liaison FSO est 800 m. ....	80

# Liste des tableaux

<b>Chapiter1: La technologie FSO : Principe et architectures</b>	
Tableau 1.1:Absorption moléculaire à des longueurs d'onde typiques. ....	14
Tableau 1.2:Valeurs de la plage de visibilité correspondant aux conditions météorologiques .....	20
Tableau 1.3:Les taux de précipitations et leurs plages de visibilité .....	22
<b>Chapiter2:OCDMA par encodage spectral d'amplitude : principe et architecture</b>	
Tableau 2.1:Paramètres de l'exemple étudié .....	45
<b>Chapiter3:Résultats et Interprétations</b>	
Tableau 3.1:Paramètres du canal FSO.....	67
Tableau 3.2:Paramétré de photo diode .....	68
Tableau 3.3:Paramètres des composants utilisés dans la simulation.....	70
Tableau 3.4:Le code MD correspond à chaque utilisateur.. .....	71
Tableau 3.5:Le code EDW correspond à chaque utilisateur.....	71
Tableau 3.6:Paramètres d'atténuation .....	72
Tableau 3.7:les résultats de cas météo pour le code EDW .....	81
Tableau 3.8:les résultats de cas météo pour le code MD .....	81

# Liste des abréviations

<b>AMRC</b>	Accès Multiple par Répartition de Codes
<b>AMRL</b>	Accès Multiple par Répartition en Longueur d'ondes
<b>AMRT</b>	Accès multiple par répartition dans le temps
<b>APD</b>	Avalanche Photo-Diode
<b>AWG</b>	Arrayed Waveguide Grating
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BPF</b>	Band Pass Filter
<b>CDMA</b>	Code Division Multiplexing Access
<b>DS</b>	Direct Séquence
<b>DSP</b>	Densité Spectrale de Puissance
<b>DL</b>	Diode Laser
<b>DWDM</b>	Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>EA</b>	Electrical Amplifier
<b>EDW</b>	Enhanced double weight
<b>EO</b>	Electric optics
<b>EOM</b>	Electro-Optic Modulator
<b>ETDM</b>	Electrical Time Division Multiplexing
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiplexing Access
<b>FSO</b>	Free Space Optics
<b>LD</b>	Laser Diode
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>LPF</b>	Low Pass Filter
<b>MAI</b>	Multiple Access Interference
<b>MD</b>	Multi-Diagonal
<b>MUX</b>	Multiplexer
<b>MMF</b>	Multi Mode Fiber
<b>MZ</b>	Mach-Zehnder
<b>MZM</b>	Mach-Zehnder Modulator
<b>NRZ</b>	Non Return to Zero
<b>OC</b>	Optical Code
<b>PD</b>	Photo-Detector
<b>PIIN</b>	Phase Induced Intensity Noise
<b>PIN</b>	Positive Intrinsic Negative
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RoF</b>	Radio over Fiber
<b>RZ</b>	Return to Zero
<b>SAC</b>	Spectral Amplitude Coding
<b>SCM</b>	Sub-Carrier Multiplexing
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>SPE</b>	Spectral Phase Encoding
<b>TDMA</b>	Time Division Multiplexing Access
<b>TEB</b>	Taux d'Erreur Binaire

<b>TPE</b>	Temporel Phase Encoding
<b>T-S</b>	Temporal - Spatial
<b>WDMA</b>	Wavelength Division Multiplexing Access
<b>W-T</b>	Wavelength - Time
<b>ZCC</b>	Zero Cross-Correlation

# Introduction Générale

Ces dernières décennies, la grande quantité d'informations véhiculées à travers le monde a donné naissance, à un besoin croissant en débit de transmission dans les systèmes de télécommunications. De nombreux services et applications multimédias se sont développés, et nécessitent aujourd'hui d'importantes capacités de transmission. Un besoin d'autant plus important que les informations échangées grâce à ces applications (données, voix IP, vidéo, ...) ont souvent besoin d'être transmises simultanément via une technique de multiplexage. De même, les avantages de la fibre optique en tant que support de transmission (grande bande passante, faibles pertes de propagation, immunité aux ondes électromagnétiques) justifient l'important développement des systèmes de transmission optiques. Ces systèmes ont permis d'accroître les débits de transmission grâce à des techniques de multiplexage temporel (TDM), en code (CDM), ou encore en longueur d'onde (WDM).

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

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

Ces facteurs constituent le point de départ de ce travail de mémoire, dont l'objectif est de



réaliser une liaison optique FSO en utilisant la technique SAC-OCDMA. Donc, en exploitant un nouveau code optique conceptuel, les performances des systèmes hybrides SAC-OCDMA/FSO seront optimisées en termes de taux d'erreur binaire (TEB) et facteur de qualité. Notre étude est consacrée à évaluer les performances d'un système de communication hybride SAC-OCDMA/FSO utilisant deux codes et sous les différentes conditions atmosphériques. Le système conçu permet la transmission des données de 7 utilisateurs à un débit de 10 Gbps.

Ce mémoire est organisé dans un document comportant trois chapitres :

Dans le *premier chapitre*, nous présentons une description générale de la transmission optique en espace libre (FSO). Dans un premier temps, nous décrivons brièvement le concept de la technologie FSO, ainsi que le modèle du canal FSO, ensuite nous présentons les différents composants optoélectroniques constituant une liaison optique atmosphérique FSO.

Ensuite la technique OCDMA est présentée dans le *deuxième chapitre*, ainsi que l'utilité de son utilisation et leurs différents types de codage/décodage seront décrits. Le système SAC-OCDMA souffre de différents bruits tels que le bruit thermique. Le codage spectral d'amplitude est une technique plus efficace pour réduire l'effet d'interférences d'accès multiples. Dans la littérature plusieurs codes ont été proposés pour cette technique. Pour cela, dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons les différents codes utilisés dans notre mémoire. A savoir, le code double poids (EDW), le code multi-diagonaux (MD) améliorés et les codes double poids en diagonale (DDW).

Les résultats et les interprétations font l'objet du *troisième chapitre*. Dans ce cadre, ce chapitre décrit les résultats de la simulation et la conception d'un système hybride SAC-OCDMA/FSO avec débit 10 Gbit/s par chaque utilisateur. Dans ce chapitre, le logiciel Optisystem est employé pour la conception du système et l'évaluation de ses performances. Nous discutons l'évaluation des performances du système SAC-OCDMA/FSO en utilisant les critères suivants : le taux d'erreur binaire (TEB), le facteur de qualité (facteur-Q) et le diagramme de l'œil.

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

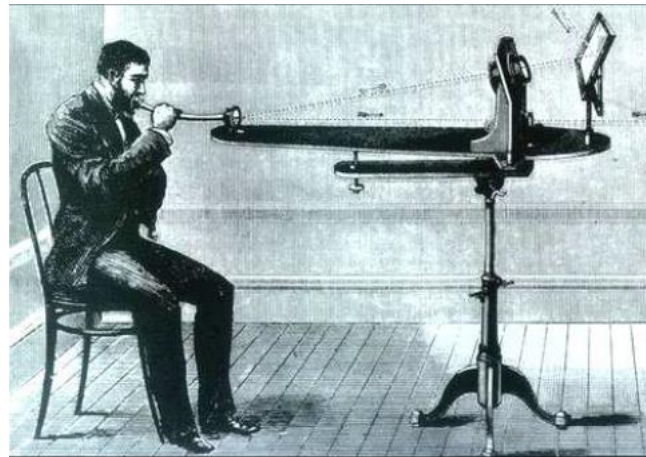
# Chapitre 1 : La technologie FSO : Principe et architectures

## 1.1 Introduction

La technologie FSO est une technologie de communication optique dans laquelle les données sont transmises par propagation de la lumière dans un espace libre permettant une connectivité optique. Le fonctionnement de cette technologie FSO est similaire à celui des réseaux OFC (câble à fibre optique). La seule différence entre les deux est que les faisceaux optiques sont envoyés à travers l'air libre au lieu des noyaux OFC constitués de fibre de verre. Le système FSO consiste d'un émetteur-récepteur optique aux deux extrémités pour fournir une capacité en duplex intégral (bidirectionnel). Cette technologie existe depuis le 8ème siècle mais est maintenant plus évolué. Elle est une technologie LOS (ligne de mire), dans laquelle la communication de données, vocale et vidéo est réalisée avec un débit binaire maximal de 10 Gbit / s grâce à une connectivité en duplex intégral (bidirectionnel) [1] Dans ce chapitre, nous expliquons les principes de système FSO. Son architecture, condition de fonctionnement, topologique et composant. Nous présentons le model du canal de ce système ainsi que ses propriétés comme l'atténuation, les pertes, la divergence des faisceaux.

## 1.2 Historique sur la technologie FSO

Le concept des liaisons optiques atmosphériques (FSO) à savoir l'utilisation de la lumière en espace libre dans les télécommunications, n'est pas récent la première communication optique à travers l'espace libre été l'expérience de **Photophone** (figure 1.1) [2] par *Alexander Graham Bell* en 1880 [3], brevet déposé le 3 juin 1880. Dans son expérience, Bell a modulé le rayonnement solaire avec un signal vocal et l'a transmis sur une distance d'environ 200 mètres, le récepteur est constitué d'un miroir parabolique avec une cellule de sélénium à son point focal, *Bell* a toujours considéré le photophone comme sa plus grande invention : "*The greatest invention I have ever made ; greater than the telephone*" [4].



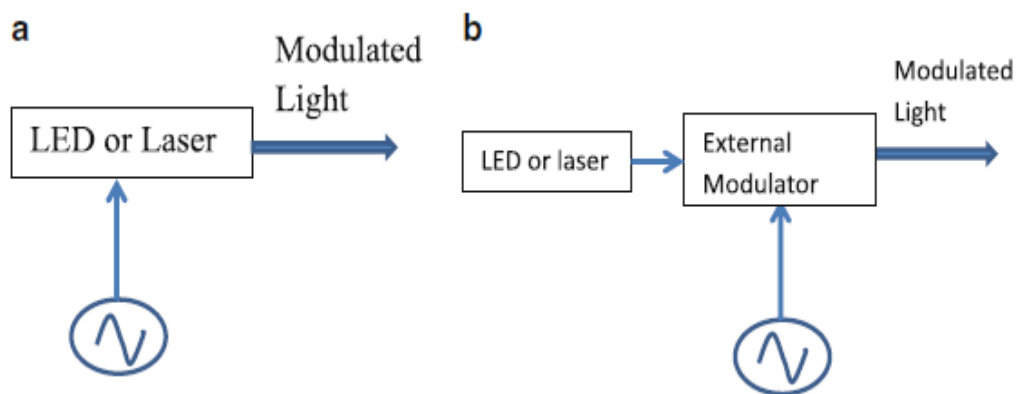
**Figure 1.1:**Le principe de fonctionnement du photophone proposé par Graham Bell

L'expérience de Photophone n'a pas fonctionné très bien à cause de la crudité des appareils utilisés et de la nature intermittente des radiations solaires. Cependant, le concept est tout simplement resté une curiosité intéressante jusqu'à l'invention du laser en 1960, qui a annoncé la véritable naissance de la technologie des systèmes de Télécommunications basés sur les liaisons optiques sans fil. Cette technologie a été dans un premier temps développée essentiellement pour des applications dans le domaine de la défense et de l'ingénierie aérospatiale. A la fin des années 80s, les liaisons optiques sans fil sont apparues comme une option commerciale qui s'est heurtée à plusieurs restrictions technologiques ; faible débit, courte distance de transmission, problèmes d'alignement ainsi que leur vulnérabilité aux événements climatiques et aux conditions météorologiques. Une grande partie de ces problèmes fut surmontée, et le développement de cette technologie s'est poursuivi. C'est à la fin des années 90s, avec l'apparition de l'internet et le grand besoin en matière de débit dans le secteur des télécommunications, la demande de disposer des réseaux d'accès locaux sans fil, des réseaux multimédias et des transmissions vidéo à des débits élevés, que plusieurs compagnies de télécommunications ont développés une "Nouvelle Génération" de systèmes de communication laser sans fil pour l'usage commercial et l'ont introduit dans le secteur privé. En 2008, la première liaison FSO avec 10Gbps de débit a été introduite sur le marché, faisant d'elle la technologie sans fil la plus rapide disponible commercialement [5].

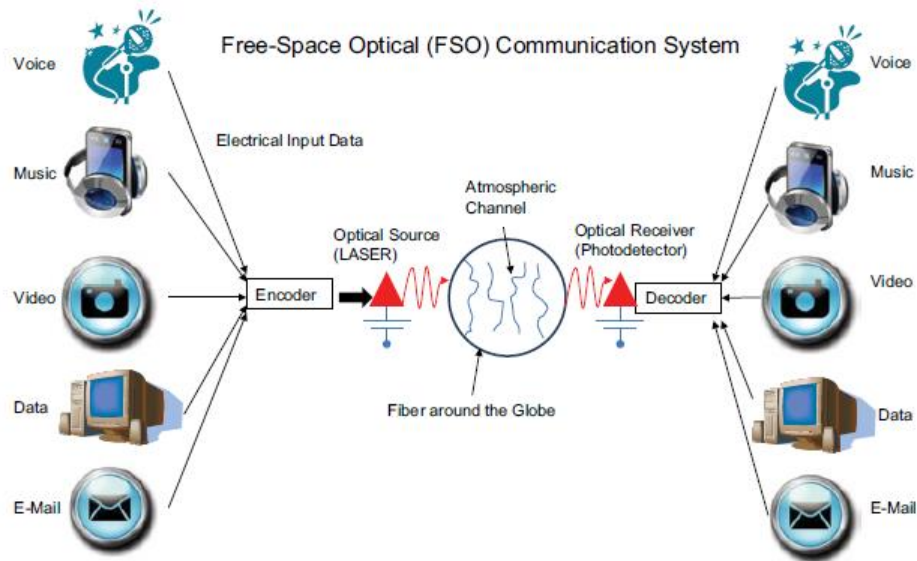
### 1.3 Principe de fonctionnement de la Technologie FSO

Les technologies utilisées dans les systèmes FSO sont presque similaires aux systèmes RF classiques. La plupart des techniques sont adaptées directement à partir de systèmes RF. La modulation de la porteuse optique diffère de la modulation de la porteuse RF en raison des caractéristiques. La modulation optique peut être réalisée de deux manières : interne ou externe comme le montre la Figure. 1.2. Un modulateur interne est celui où les caractéristiques des sources sont directement modifiées en fonction du signal d'information pour produire le signal optique modulé.

La modulation d'intensité peut être réalisée en faisant varier le courant de polarisation. La modulation de fréquence ou de phase peut être obtenue en changeant la longueur de la cavité laser. Cependant, les modulateurs externes limitent la plage de modulation et nécessitent des temps de réponse relativement élevés. Aux fréquences optiques, ces modulateurs fonctionnent directement sur l'intensité de la porteuse (carré d'amplitude du champ électrique) plutôt que l'amplitude de la porteuse [6].

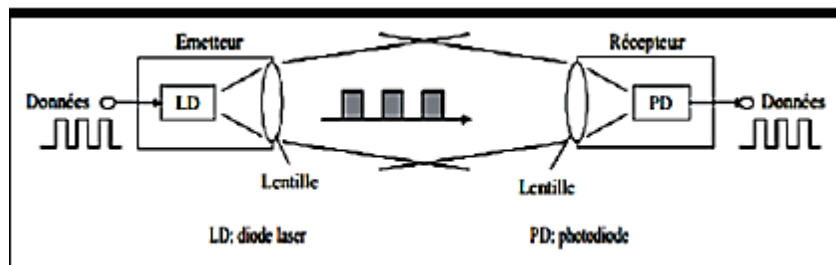


**Figure 1. 2:** Modulateurs optiques. (a) Modulateur interne. b) Modulateur externe[6]



**Figure 1.3 :** Les type des données utilisés dans le système FSO [6]

Le principe de base de la technologie FSO consiste en une transmission laser en espace libre dans une partie du spectre lumineux visible ou infrarouge. Les systèmes FSO sont conçus pour effectuer une connexion entre deux zones ou différentes zones, en visibilité directe LOS (*Line-Of-Sight*) à un débit très élevé. La FSO permet la transmission de tout type de données avec un débit égal à celui de la fibre optique tout en ayant la souplesse et les avantages d'un réseau radio sans fil. Comme illustré sur la figure 1.4, une liaison FSO nécessite un émetteur, un canal de propagation et un récepteur [7-8].



**Figure1. 4:** Configuration de base d'une liaison optique en espace libre [8].

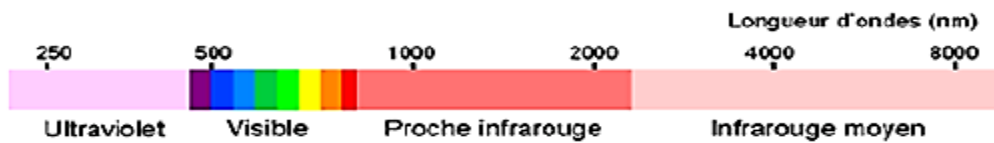
► On définit plusieurs bandes :

Le choix de la longueur d'onde dépend fortement des effets atmosphériques, atténuation et bruit de fond. En outre, la disponibilité des émetteurs et des composants du récepteur, la réglementation sur la sécurité des yeux et les coûts ont un impact important sur la sélection longueur d'onde dans le processus de conception FSO.[9]

- Proche infrarouge (NIR) allant de 750 à 1450 nm, ce qui correspond à une fenêtre d'atténuation faible et principalement utilisé pour la fibre optique,
- Infrarouge court (SIR) allant de 1400 à 3000 nm dont 1530–1560 nm est une plage spectrale dominante pour les communications longue distance,
- Infrarouge moyen (MIR) allant de 3000 à 8000 nm qui est utilisé dans l'application armée pour guidage de missiles. Infrarouge long (LIR) allant de 8000 nm à 15 m qui est utilisé en imagerie thermique.
- Infrarouge lointain (FIR)

Presque tous les systèmes FSO disponibles dans le commerce utilisent les longueurs d'onde NIR et SIR. Étant donné que ces longueurs d'onde sont également utilisées dans la communication par fibre optique [10], et leur les composants sont facilement disponibles sur le marché. La sélection de la longueur d'onde pour la communication FSO doit être sûre pour les yeux et la peau certaines longueurs d'onde comprises entre 400 et 1500 nm peuvent causer des risques pour les yeux ou des dommages à la rétine [11].

La figure 1.5, représente la gamme des différentes zones du spectre lumineux :



**Figure 1. 5 : Les différentes zones du spectre lumineux**

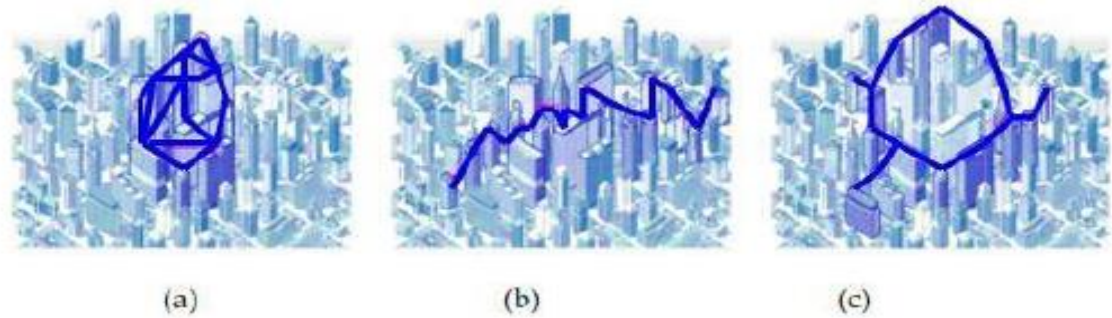
#### 1.4 Architectures de base de la technologie FSO

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.



**Figure 1. 6** : Topologies de réseaux optiques en espace libre:(a) point-multipoints et maillage. (b) point-à-point et (c) anneau et point-à-point. [11]

## 1.5. Structure d'un système de communication optique FSO

### 1.5.1. L'émetteur FSO

Une des principales clés dans tout système de communication optique est la source optique qui peut être facilement modulée, et à des débits très élevés. Dans les systèmes de communication optique sans fil moderne, une variété de source optique est utilisée pour transmettre les données optiques. Les principales différences entre ces sources sont la longueur d'onde, la puissance et la rapidité de modulation.

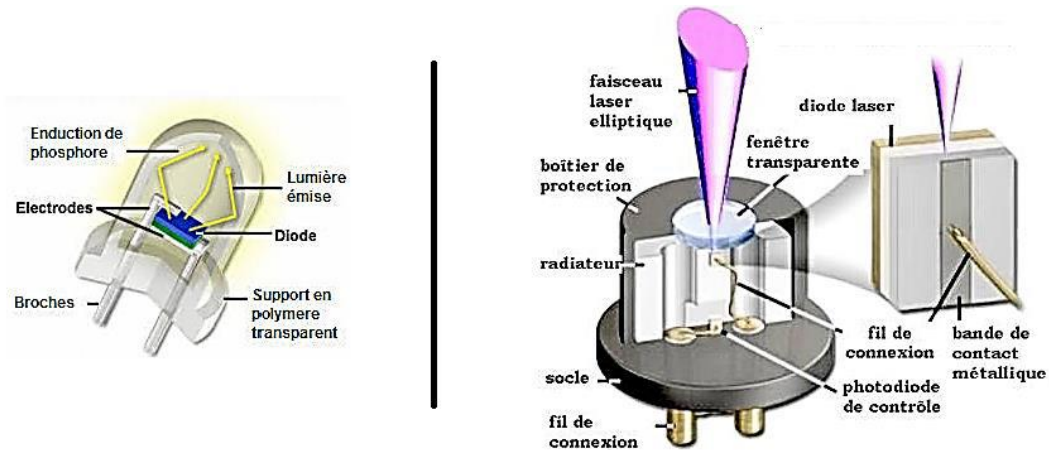
#### -Les diodes électroluminescentes (DEL)

Les diodes électroluminescentes (DEL) sont 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 avec des besoins spectrales modérées, jusqu'à 155 Mbps [18], telle que les liaisons optiques sans fil à l'intérieur des bâtiments (Indoor Wireless Optical communications « IWOC »). L'avantage majeur des sources DEL est leurs vies extrêmement longues et le faible coût [14].

#### -Les diodes Laser (DL)

La diode laser présente des avantages significatifs pour les applications longue distance comparée à la diode DEL. L'industrie des systèmes optiques sans fil commercial est centrée sur l'utilisation de semi-conducteurs lasers, en raison de leur taille relativement petite, haute puissance, et de la rentabilité. La plupart de ces lasers sont également utilisés dans la fibre

optique, par conséquent, la disponibilité n'est pas un problème. 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.



**Figure 1.7 :** Architecture d'une DEL et Structure d'une diode laser

Les sources de lumière blanche :

Une source de lumière blanche est une source de lumière avec une grande largeur de bande optique (généralement de 100 nm ou plus). Ces sources peuvent être des sources super luminescentes, par exemple diodes super luminescentes, et typiquement présentent une cohérence spatiale élevée, le rendant facile à se concentrer étroitement la sortie ou à livrer par le biais d'une fibre optique, même une fibre monomode.

D'autre part, la cohérence temporelle est faible en fonction de la large bande passante optique. Il n'existe pas de semi-conducteur permettant à lui seul d'émettre de la lumière blanche, donc le spectre d'une LED blanche n'est pas une radiation monochromatique comme les autres LED mais il est composé d'un mélange de différentes longueurs d'ondes. [15]

Du côté de l'émetteur, la source optique émet une puissance optique variable degré de focalisation souvent décrit par son angle d'émission. La puissance totale (en watts) émise par une source uniforme caractérisée par la fonction de luminosité (1.1) / surface stéroïdienne), la surface  $A_s$  et l'angle d'émission  $\Omega_s$  est donné par [16]

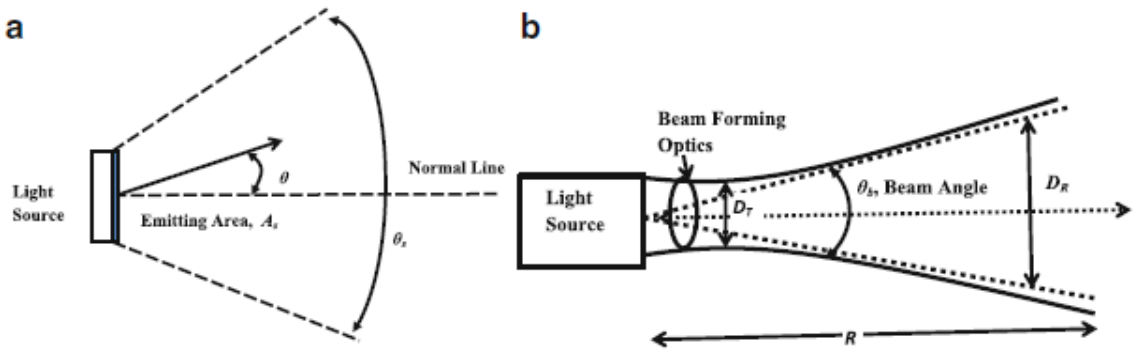
$$P_T = BA_s \Omega_s$$

Pour les sources rayonnantes symétriques, l'angle d'émission solide  $\Omega_s$  peut être lié à l'angle d'émission planaire  $\theta_s$  (voir Fig. 1.11a) en

$$\Omega_s = 2\pi[1 - \cos(\theta_s/2)]. \quad (1.2)$$



Pour toute source Lambertienne qui émet de la puissance uniformément vers l'avant, il faut  $|\theta| \leq \pi/2$  impliquant  $\theta_s = \pi$ . Il donne  $\Omega_s = 2\pi$  et donc la puissance transmise,  $P_T = 2\pi B A_s$ . La lumière peut également être collectée et recentrée au moyen de la formation de faisceau. L'optique comme le montre la Figure. 1.8b. La lumière du faisceau source est focalisée sur un point à l'aide d'une lentille convergente, et la lentille divergente élargit le faisceau à diamètre de faisceau plan  $D_R$  donné par



**Figure1. 8** : Démonstration de l'émission optique de la source lumineuse. (a) Emission lumineuse de Lambertien source [16]. b) Émission de lumière utilisant une optique formant un faisceau [16]

$$D_R = D_T \left[ 1 + \frac{(\lambda R)^2}{(D_T^2)} \right]^{1/2} \quad (1.3)$$

Où  $\lambda R$  la longueur d'onde de fonctionnement,  $D_T$  le diamètre de la lentille de l'émetteur et  $R$  le distance de la lentille ou de la plage de liaison.

$$\text{Pour} \begin{cases} \text{champ proch} & \frac{\lambda R}{D_T^2} < 1, D_R \approx D_T \\ \text{champ loin} & \frac{\lambda R}{D_T^2} > 1, D_R \approx \frac{\lambda R}{D_T} \end{cases} \quad (1.4)$$

La première condition implique que la lumière émergente soit collimatée avec un diamètre égal diamètre de la lentille de l'émetteur. La deuxième condition signifie que la lumière émergente diverge avec la distance de la source. L'angle de faisceau plan,  $\theta_b$  de la lumière divergente la source, également appelée angle de faisceau d'émetteur limité par diffraction, est approximativement donnée par [16]

$$\theta_b \cong \frac{D_R}{R} \quad (1.5)$$

En substituant la valeur de  $D_R$  pour le cas de champ lointain, nous obtenons :

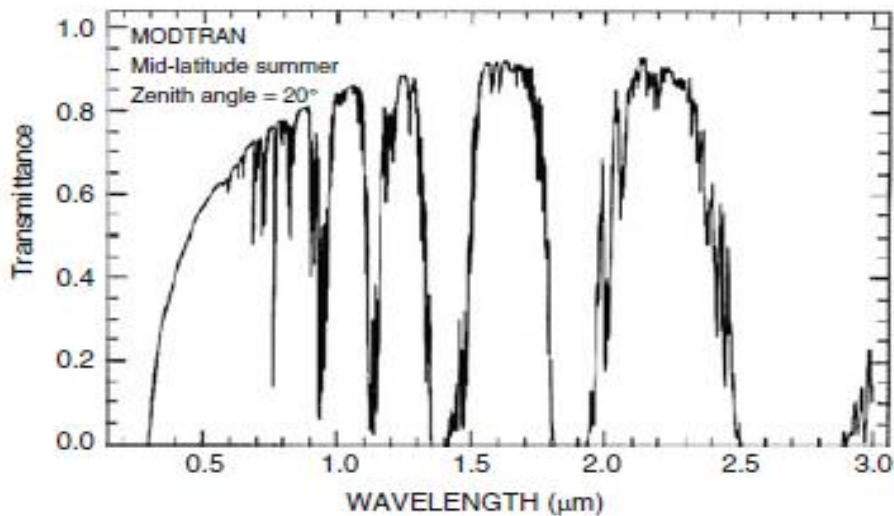
$$\theta_b \cong \frac{\lambda}{D_T} \quad (1.6)$$

L'angle solide bidimensionnel peut être approximativement lié à l'angle de faisceau plan

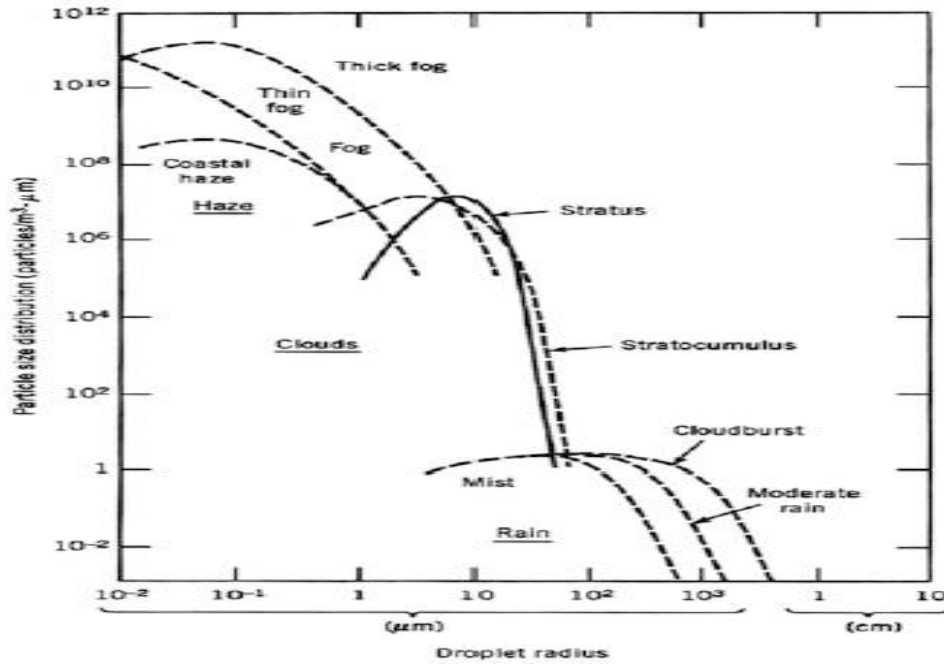
$$\Omega_s = 2\pi[1 - \cos(\theta_s/2)] \cong \left(\frac{\pi}{4}\right)\theta_b^2 \quad (1.7)$$

### 1.5.2. Modèles du canal FSO

La condition atmosphérique dans le canal FSO peut être globalement classée en trois catégories, nommément temps clair, nuages et pluie. Des conditions météorologiques claires sont caractérisé par une longue visibilité et une atténuation relativement faible. Temps nuageux les conditions vont de la brume ou du brouillard à de gros nuages et se caractérisent par de faibles visibilité, humidité élevée et forte atténuation. La pluie est caractérisée par la présence gouttelettes de pluie de tailles variables, et il peut produire des effets graves en fonction de taux de précipitations.



**Figure1. 9** : Transmittance atmosphérique (atténuation) vs. Longueur d'onde [19]



**Figure1. 10 :** Taille moyenne des particules et densité correspondante dans l'atmosphère [20].

### 1.5.2.1 Pertes atmosphériques :

Le canal atmosphérique est constitué de divers gaz et autres particules minuscules comme aérosols, poussière, fumée, etc., en suspension dans l'atmosphère. Outre ceux-ci, les grands les précipitations dues à la pluie, à la brume, à la neige et au brouillard sont également présentes dans l'atmosphère. Chacun de ces constituants atmosphériques entraîne une réduction du niveau de puissance, c'est-à-dire l'atténuation du signal optique due à plusieurs facteurs, y compris l'absorption de la lumière par des molécules de gaz, Rayleigh ou Mie diffusion. Différents types de pertes rencontrées par le faisceau optique lors de la propagation à travers le canal optique atmosphérique sont décrit dans cette section. Dans le système de communication FSO, lorsque le signal optique se propage à travers le l'atmosphère, elle subit une perte de puissance due à plusieurs facteurs, comme indiqué dans la section suivante.[6]

### 1.5.2.2 Pertes dues à l'absorption et à la diffusion

La perte dans le canal atmosphérique est principalement due à l'absorption et à la diffusion processus. Aux longueurs d'ondes visibles et IR, les principaux absorbeurs d'atmosphère sont les molécules d'eau, de dioxyde de carbone et d'ozone [21, 22]. L'atténuation ressenti par le signal optique lorsqu'il traverse l'atmosphère peut être

Quantifié en termes de profondeur optique  $\tau$  corrélée à la puissance du récepteur  $P_R$  et la puissance transmise  $P_T$  [23] comme :

$$P_R = P_T \exp(-\tau) \quad (1.8)$$

$\tau$ : le rapport de atténuation

Le rapport entre la puissance reçue et la puissance transmise dans la liaison optique appelé transmittance atmosphérique  $T_a (= P_R/P_T)$ . (1.9)

Lorsque le signal optique se propage à un angle zénithal  $\theta$  le facteur de transmittance est ensuite donné par  $T_\theta = T_a \sec(\theta)$ . La transmittance atmosphérique  $T_a$  et l'optique la profondeur  $\tau$  sont liés au coefficient d'atténuation atmosphérique  $\gamma$  et à la transmission plage R comme suit :

$$T_a = \exp\left(-\int_0^R \gamma(\rho) d\rho\right) \quad (1.10)$$

$$\tau = \int_0^R \gamma(\rho) d\rho$$

Dans les deux cas, la perte en dB Beam par le faisceau pendant la propagation à travers l'atmosphère peut être calculé en utilisant l'équation suivante :

$$Loss_{prop} = -10 \log_{10} T_a$$

Le coefficient d'atténuation est la somme des coefficients d'absorption et de diffusion partir des aérosols et des constituants moléculaires de l'atmosphère et est donné par [24] :

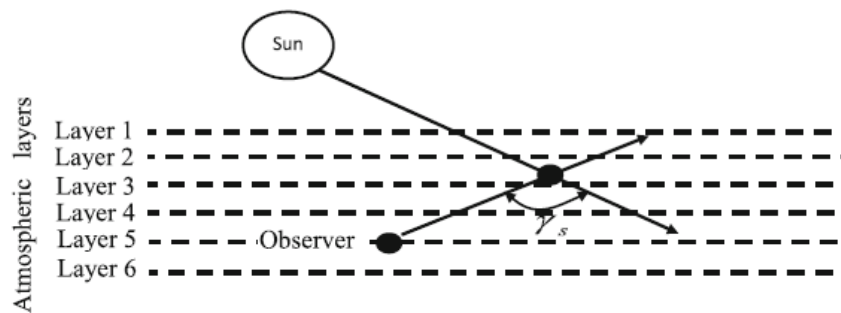
$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda)$$

Les deux premiers termes de l'équation ci-dessus représentent les molécules et les aérosols coefficients d'absorption, respectivement, tandis que les deux derniers termes sont la molécule et les coefficients de diffusion des aérosols, respectivement. L'absorption atmosphérique est un phénomène dépendant de la longueur d'onde. Quelques valeurs typiques d'absorption moléculaire les coefficients sont donnés dans le tableau 1.1 pour des conditions météorologiques claires. La longueur d'onde gamme de système de communication FSO est choisi pour avoir une absorption minimale. C'est appelée fenêtre de transmission atmosphérique. Dans cette fenêtre, l'atténuation en raison de l'absorption moléculaire ou de l'aérosol est inférieure à 0,2 dB / km. Il y a plusieurs fenêtres de transmission comprises entre 700 et 1600 nm. Majorité des systèmes FSO sont conçus pour fonctionner dans les fenêtres de 780–850 et 1520–1600 nm.

S. N	Longueur d'onde (nm)	Absorption moléculaire (dB / km)
1	550	0.13
2	690	0.01
3	850	0.41
4	1555	0.01

**Tableau 1.1:** Absorption moléculaire à des longueurs d'onde typiques.[25]

La radiance du ciel est due à la diffusion des photons solaires du chemin de propagation atmosphérique, et il provoque des bruits de fond indésirables qui dégrade le rapport signal sur bruit au niveau du récepteur. La figure 1.5 illustre le mécanisme de diffusion du modèle en couches de l'atmosphère.[26]



**Figure1.11 :** le mécanisme de diffusion du modèle en couches de l'atmosphère [6]

L'atmosphère est considérée comme modélisée en plusieurs couches chaque couche étant constituée d'un mélange homogène de gaz et d'aérosols. L'angle de diffusion  $s$  est l'angle formé entre la direction avant du Soleil rayonnement et le point d'observation. On voit que plus la concentration d'elles disperseras, plus sera le rayonnement du ciel. Comme la distance angulaire entre la direction de l'observation et le soleil diminue, il y a une augmentation de la luminosité du ciel. À moins de  $30^\circ$  du Soleil, le rayonnement du ciel est fortement dominé par la contribution des aérosols. Au fur et à mesure que la distance angulaire au soleil augmente, la source d'arrière-plan dominante le rayonnement est dû à la diffusion de Rayleigh. [26]

### 1.5.2.3 Perte de parcours dans un système de communication FSO

La perte de parcours est un paramètre plus important. Elle est liée à l'atmosphère. C'est-à-dire la perte de puissance du signal lors de sa propagation dans l'atmosphère. Ce facteur de perte est donné par l'équation suivante:

$$L_s = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (1.12)$$

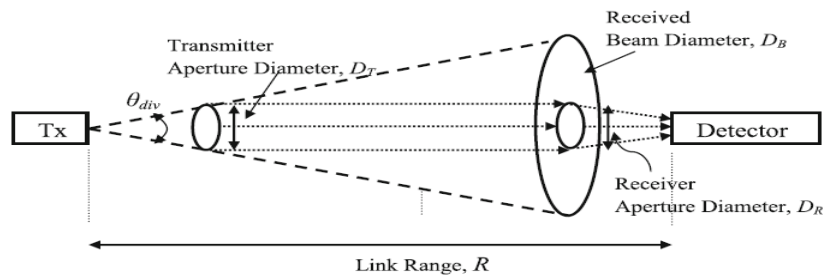
Avec  $R$  : est la distance de la liaison.

En raison de la dépendance à la longueur d'onde, la perte de parcours est beaucoup plus grande (c'est-à-dire le facteur  $L_s$  est beaucoup plus petit). Outre la perte d'espace, il existe des pertes de propagation supplémentaires si le signal passe à travers un milieu avec pertes, par exemple une atmosphère planétaire.

### 1.5.2.4 Perte de divergence de faisceau

Lorsque le faisceau optique se propage dans l'atmosphère, il se répand en raison de la diffraction. Il peut en résulter une situation dans laquelle l'ouverture du récepteur ne peut pas collecter une fraction du faisceau transmis et entraîner une perte de divergence de faisceau illustré à la Fig. 1.12. Un système FSO typique transmet un faisceau optique de 5 à 8 cm de diamètre à l'émetteur. Ce faisceau se propage à environ 1–5 m de diamètre après propagation de 1 km de distance. Cependant, le récepteur FSO a un champ de vision étroit (FOV), et il n'est pas capable de collecter toute la puissance transmise entraînant la perte d'énergie. La figure 1.12 illustre la perte de divergence du faisceau lorsque le récepteur est capable de collecter seulement une petite partie du faisceau transmis. La puissance optique collectée par le récepteur est donnée par

$$P_R = P_T G_T G_R L_P \quad (1.13)$$



**Figure 1.12:** Perte due à la divergence du faisceau [6]

$P_R$  = Puissance de récu

$P_T$  Puissance d'mession

$G_T G_R$  les gain de reception et emession

$L_p$  Affaiblissement

Et

$$L_p \left[ = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \right], G_T [\approx (4D_T/\lambda)^2], G_R [\approx (\pi D_R/\lambda)^2] \quad (1.14)$$

Donc Puissance optique réception comme :

$$P_R \approx P_T \left( \frac{D_T D_R}{\lambda R} \right)^2 \approx P_T \left( \frac{4}{\pi} \right)^2 \left( \frac{A_T A_R}{\lambda^2 R^2} \right) \quad (1.15)$$

Par conséquent, l'affaiblissement de divergence du faisceau / l'affaiblissement géométrique limité par la diffraction sont exprimés en dB est donné comme

$$L_G(\text{Geometric Loss}) = -10 \left[ 20 \left( \frac{4}{\pi} \right) + \log \left( \frac{A_T A_R}{\lambda^2 R^2} \right) \right] \quad (1.16)$$

En général, une source optique avec une divergence étroite du faisceau est préférable. Mais étroit La divergence du faisceau provoque l'échec de la liaison en cas de léger désalignement entre l'émetteur-récepteur. Par conséquent, un choix approprié de divergence de faisceau doit être fait afin de supprimer la nécessité d'un système de suivi et de pointage actif et, à la En même temps, réduire la perte de divergence du faisceau. Plusieurs fois, un extenseur de faisceau est utilisé réduire les pertes dues à la divergence du faisceau limité par la diffraction en tant que divergence du faisceau est inversement proportionnelle au diamètre d'ouverture transmis  $(\theta_{div} \cong \lambda/D_T)$

Dans ce cas, l'ouverture de diffraction est augmentée à l'aide de deux lentilles convergentes comme indiqué sur la Figure. 1.13.

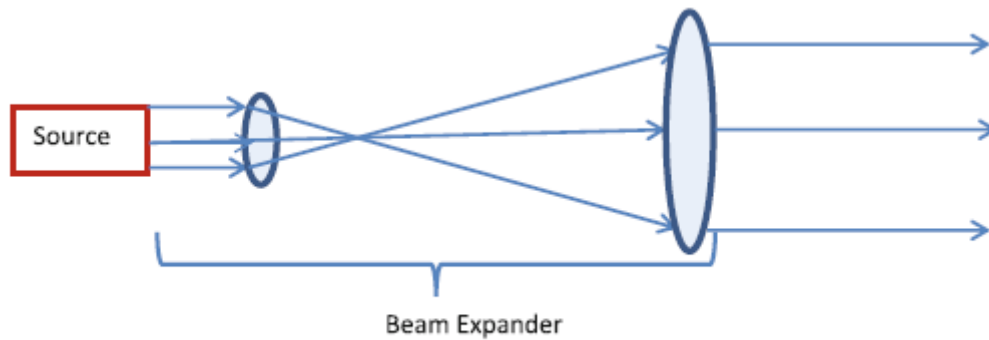
Dans le cas non limité par la diffraction, une source d'angle de divergence  $\theta_{div}$  et de diamètre  $D_T$  fera en sorte que la taille de faisceau de  $(D_T + \theta_{div} R)$  pour la distance de liaison soit égale à R. Dans cet exemple, Dans ce cas, la fraction de la puissance reçue,  $P_R$  sur la puissance transmise,  $P_T$  est donnée par

$$(1.17)$$

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{D_R^2}{(D_T + \theta_{div}R)^2}$$

Faisceau Divergence et perte géométrique  $L_G$  en dB :

$$L_G(\text{Geometric Loss}) = -20 \log \left[ \frac{D_R}{(D_T + \theta_{div}R)} \right] \quad (1.18)$$



**Figure 1.13** : Expanseur de faisceau pour augmenter l'ouverture de diffraction [6]

#### 1.5.2.5. Perte due aux conditions météorologiques

La performance du lien FSO est soumise à divers facteurs environnementaux tels que le brouillard, neige, pluie, etc. entraînant une diminution de la puissance du signal reçu. Hors de ceux-ci facteurs environnementaux, l'atténuation atmosphérique est généralement dominée par le brouillard la taille des particules de brouillard est comparable à la longueur d'onde d'intérêt dans le système FSO. Cela peut modifier les caractéristiques du signal optique ou peut entraver complètement le passage de la lumière à cause de l'absorption, de la diffusion et de la réflexion. L'atmosphère la visibilité est la mesure utile pour prédire les conditions environnementales atmosphériques. La visibilité est définie comme la distance parcourue par un faisceau lumineux parallèle. Dans l'atmosphère jusqu'à ce que son intensité baisse de 2% de sa valeur d'origine. Afin de prédire les statistiques d'atténuation optique à partir des statistiques de visibilité pour estimer la disponibilité du système FSO, la relation entre visibilité et atténuation doit être connu. Plusieurs modèles décrivant la relation entre visibilité et l'atténuation optique est donnée dans [27–28]. Caractériser l'atténuation de l'optique signal se propageant à travers un support, un terme appelé "atténuation spécifique" est utilisé ce qui signifie atténuation par unité de longueur exprimée en dB / km et est donné par :

$$(1.19)$$



$$\beta(\lambda) = \frac{1}{R} \cdot 10 \log \left( \frac{P_0}{P_R} \right) = \frac{1}{R} 10 \log (e^{\gamma(\lambda)R})$$

R distance,  $P_0$  puissance optique de transmission,  $P_R$  puissance de réception,  $\gamma(R)$  atténuation coefficient d'atmosphère.

L'atténuation spécifique de (brouillard, neige et pluie) expliquer ci –déçu :

(i) Effet du brouillard: On peut prévoir l'atténuation due au brouillard en appliquant Mie théorie de la diffusion. Cependant, cela implique des calculs complexes et nécessite informations détaillées sur les paramètres de brouillard. Une approche alternative est basée sur informations de plage de visibilité, dans lesquelles l'atténuation due au brouillard est prédite en utilisant des modèles empiriques communs. La longueur d'onde de 550 nm est généralement prise comme la longueur d'onde de référence de la plage de visibilité. L'équation (1.20) définit la spécificité atténuation du brouillard donnée par un modèle empirique commun pour la diffusion de Mie.[6]

$$B_{fog}(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-p} \quad (1.20)$$

V(Km) visibilité,  $\lambda(nm)$  longure d'onde, P coefficient de diffusion.

Dépend de Kim model, P donne par :[6]

$$p = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.16V + 0.34 & 1 < V < 6 \\ V - 0.5 & 0.5 < V < 1 \\ 0 & V < 0.5 \end{cases} \quad (1.21)$$

Dépend de Kruse model, P donne par :[6]

$$p = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.585V^{\frac{1}{3}} & 1 < V < 6 \end{cases} \quad (1.22)$$

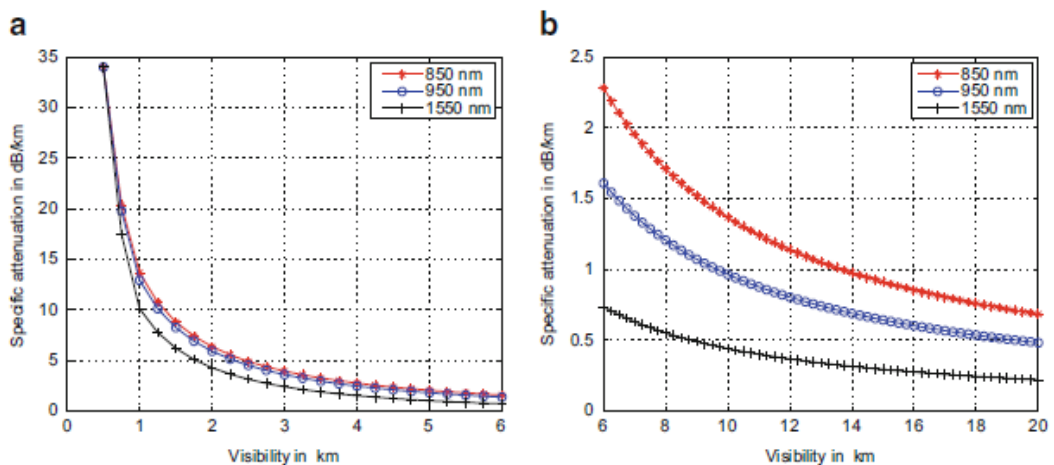
Différentes conditions météorologiques peuvent être spécifiées en fonction de leur plage de visibilité valeurs. Le tableau 1.2 résume la plage de visibilité et les pertes pour différentes conditions météorologiques. Conditions. Pour des conditions météorologiques de faible visibilité, c'est-à-dire par temps de brouillard et de nuage, la longueur d'onde de fonctionnement a un effet négligeable sur l'atténuation spécifique, tandis que pour le brouillard léger et la brume lorsque la plage de visibilité est élevée (6 km), l'atténuation est moins silencieuse à 1550 nm par rapport à 850 et 950 nm. Comme la visibilité augmente

encore au-delà de 20 km (temps clair), la dépendance de l'atténuation sur la longueur d'onde diminue à nouveau. Ceci a été montré à la Fig. 1.14a, 1.14b obtenu par simulation numérique.

(ii) Effet de la neige : l'atténuation due à la neige peut varier en fonction de la taille des flocons de neige et taux de chute de neige. Puisque les flocons de neige sont plus gros que goutte de pluie, ils produisent des évanouissements plus profonds dans le signal par rapport aux gouttes de pluie. La taille des flocons de neige peut atteindre 20 mm, ce qui peut bloquer complètement le chemin. Du signal optique en fonction de la largeur de faisceau du signal. Pour la neige,

Conditions Météorologique	Visibilité (Km)	Perte (dB/Km)
Brouillard épais	0.2	-89.6
Brouillard modéré	0.5	-34
Léger brouillard	0.770 à 1	-20 à -14
Brouillard mince / forte pluie de brouillard (25mm / h)	1.9 à 2	-7.1 à -6.7
Brume / pluie moyenne (12.5 mm / h)	2.8 à 4	-4.6 à -3
Légère brume / pluie légère (2.5mm / h)	5.9 à 10	-1.8 à -1.1
Clair / bruine (0.25mm / hr)	18 à 20	-0.6 à 0.53
Très clair	23 à 50	-0.46 à 0.21

**Tableau 1.2:** Valeurs de la plage de visibilité correspondant aux conditions météorologiques.[29]



**Figure 1.14:** Atténuation vs visibilité. (a) Pour le brouillard épais et les nuages. (b) Pour

un léger brouillard et de la brume [6].

L'atténuation peut être classée en atténuation de neige sèche et de neige mouillée. Le spécifique L'atténuation (dB / km) du taux de neige S en mm / h est donnée par l'équation suivante :[6]

$$\beta_{snow} = aS^b \quad (1.23)$$

Les valeurs de paramètres et b dans sèche et humide la neige :

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

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

Neige humide (altitude < 500 m) :

$$\beta_{snow} = (0.0001023 \times \lambda nm + 3.7855466) \times s^{0.72} dB/K \quad (1.24)$$

Neige sèche (altitude  $\geq 500$  m) :

$$\beta_{snow} = (0.0000542 \times \lambda nm + 5.4958776) \times s^{1.38} dB/K \quad (1.25)$$

L'atténuation de la neige en fonction de la plage de visibilité peut être approximée par la modèle empirique suivant

$$\alpha_{snow} = \frac{58}{V} \quad (1.26)$$

Effet de la pluie : les grosses gouttelettes de pluie peuvent être indépendantes de la longueur d'onde de diffusion, et l'atténuation produite par les précipitations augmente linéairement avec les taux de précipitations. L'atténuation spécifique pour le taux de pluie R (mm / h) est donnée par :

$$\beta_{rain} = 1.076R^{0.67} \quad (1.27)$$

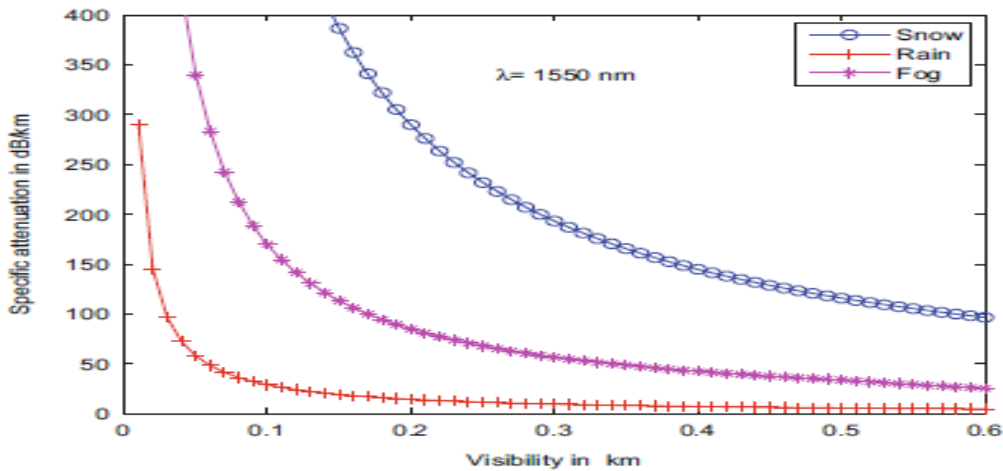
L'atténuation de la pluie pour les liaisons FSO peut être raisonnablement bien estimée par formule empirique et est donnée par

$$\alpha_{rain} = \frac{2.8}{V} \quad (1.28)$$

Où  $V$  est la plage de visibilité en km et ses valeurs basées sur le taux de précipitations est résumées dans le tableau 1.3.

Type de pluie	Taux de Pluie (mm/h)	Visibilité (Km)
Forte pluie	25	1.9-2
Pluie modérée	12.5	2.8-40
Légère pluie / bruine	0.25	18-20

**Tableau 1.3:** Les taux de précipitations et leurs plages de visibilité [30]



**Figure 1.15 :** Courbe de l'atténuation pour le brouillard, la neige et la pluie [6]

Il ressort clairement de la Figure. 1.15 que l'atténuation est maximale pour la neige et inférieure pour pluie par rapport au brouillard. En cas de brouillard, il y a une augmentation soudaine de l'atténuation pour une visibilité inférieure à 150 m. La plage de visibilité <150 m correspond à un brouillard épais et temps nuageux.

### 1.5.3 Le récepteur FSO

Ce bloc fonctionnel permet essentiellement de récupérer et d'extraire les données transmises du champ optique incident. L'unité réceptrice se compose d'une série de lentilles qui concentrent le signal lumineux reçu sur un détecteur de lumière « photodiode ». Toutefois, dans les systèmes FSO simples pour les applications à courte portée, la partie transmission et la partie réception peuvent être directement reliées à une fibre optique. Dans ce cas, le signal reste optique à la réception et le but des lentilles dans le récepteur est de concentrer la lumière afin de la coupler dans la fibre.

Dans Les systèmes où le signal optique est reconverti en un signal électrique, les lentilles de réception concentrent la lumière sur une photodiode, où il est converti en un signal électrique, plus le circuit de décision, l'amplification, le filtrage et le traitement des signaux sont effectués pour garantir une haute-fidélité de récupération de données.

A la réception, le système doit fortement exclure la lumière ambiante (lumière du soleil entre autres) qui peut perturber le signal reçu. En pratique, le détecteur possède un champ de vue optique assez petit et le dispositif de réception comporte des filtres qui permettent de ne laisser passer que les longueurs d'onde souhaitées. Généralement, les équipements sont dotés d'un logiciel de supervision qui permet une configuration de la liaison ainsi qu'une description qualitative et quantitative des différents modules. Un autre élément de conceptions important dans les systèmes FSO est l'effet de maintenir suffisamment la stabilité de pointage.

Les systèmes de communication optique sans fil peuvent inclure des dispositifs d'alignement actifs (auto tracking) dans lesquels, la rétroaction du récepteur est utilisée afin de diriger automatiquement le faisceau vers le récepteur. La complexité associée au pointant actif peut être évitée dans certaines applications (en particulier pour les liaisons courtes distances de débits de données inférieurs) [31].

### **1.5.3.1 Les Photo détecteurs :**

Le photo-détecteur (photodiode) 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 photo-électrique. Les photodiodes peuvent être classées en deux types : celles qui n'ont aucun gain interne PN et PIN, et celles qui ont un gain interne (APD).

### **1.5.3.2 Photodiode PIN**

Les photodiodes PIN (Positive Intrinsic Négative). Ce sont également des composants à semi-conducteurs qui possèdent une région intrinsèque (faiblement dopée) 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. [32]

### 1.5.3.3 Photodiode APD

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

Les photodiodes à avalanche sont aussi utilisées grâce à leurs performances, leur gain important et leur réponse rapide, mais elles sont plus coûteuses, difficiles à utiliser et nécessitant une polarisation inverse très forte. Les photodiodes de type APD présentent de meilleures performances à 2.5 et 10 Gb/s que les types PIN. Leur coût est également plus élevé. Néanmoins, pour les débits élevés à 40 Gb/s. [32]

Le transmetteur gain le  $G_T$  des équations. (30) et (31) est donné par

$$G_T = \frac{4\pi}{\Omega_b} \approx \left(\frac{4D_T}{\lambda}\right)^2 \quad (1.29)$$

Après propagation à travers la distance de liaison R, l'intensité de champ du faisceau sera

$$I = \frac{G_T P_T}{4\pi R^2} \quad (1.30)$$

Une zone de réception normale A dans le faisceau recueille la puissance de champ :

$$P_R = \left(\frac{G_T P_T}{4\pi R^2}\right) A \quad (1.31)$$

Définissons le gain du récepteur,  $G_R$ , en termes de A

$$G_T = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) A \Rightarrow A = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (1.32)$$

Par conséquent, à partir des équations. (1.11) et (1.12),

$$P_R = P_T G_T \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_R$$

Lorsque les autres facteurs de perte sont incorporés, l'équation ci-dessus dévient :

$$P_R = P_T (G_T \eta_T \eta_{TP} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 (G_R \eta_R \eta_\lambda)) \quad (1.34)$$

$P_R$  : puissance du signal à l'entrée du photodétecteur

$P_T$  : puissance de l'émetteur

$\eta_T et \eta_R$  : efficacité de l'optique de l'émetteur et du récepteur, respectivement

$G_T$  : gain de l'antenne d'émission  $\approx (4D_T/\lambda)^2$ .

$G_R$  : gain de l'antenne de réception  $\approx (4D_R/\lambda)^2$ .

$\eta_{TP}$  : facteur de perte de pointage de l'émetteur.

$\left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$  : facteur de perte d'espace, où R est la distance de liaison.

$\eta_\lambda$  : facteur de transmission du filtre à bande étroite.

## 1.6 Technologie FSO Vs Fibre optique

Les systèmes de communication optiques sans fil et les fibres optiques ont presque une même bande de transmission, d'ici vient l'importance de les comparer. Un des points les plus importants de la comparaison entre les deux systèmes est la manière dont ils transmettent la lumière. La lumière peut être transmise soit à travers l'espace libre ou à travers un milieu confiné.

Concernant la technologie optique sans fil, et comme son nom l'indique, signifie la transmission de signaux optiques à travers l'air. Cette transmission optique nécessite l'utilisation des sources lumineuses, qui peuvent être soit des LEDs ou des diodes lasers.

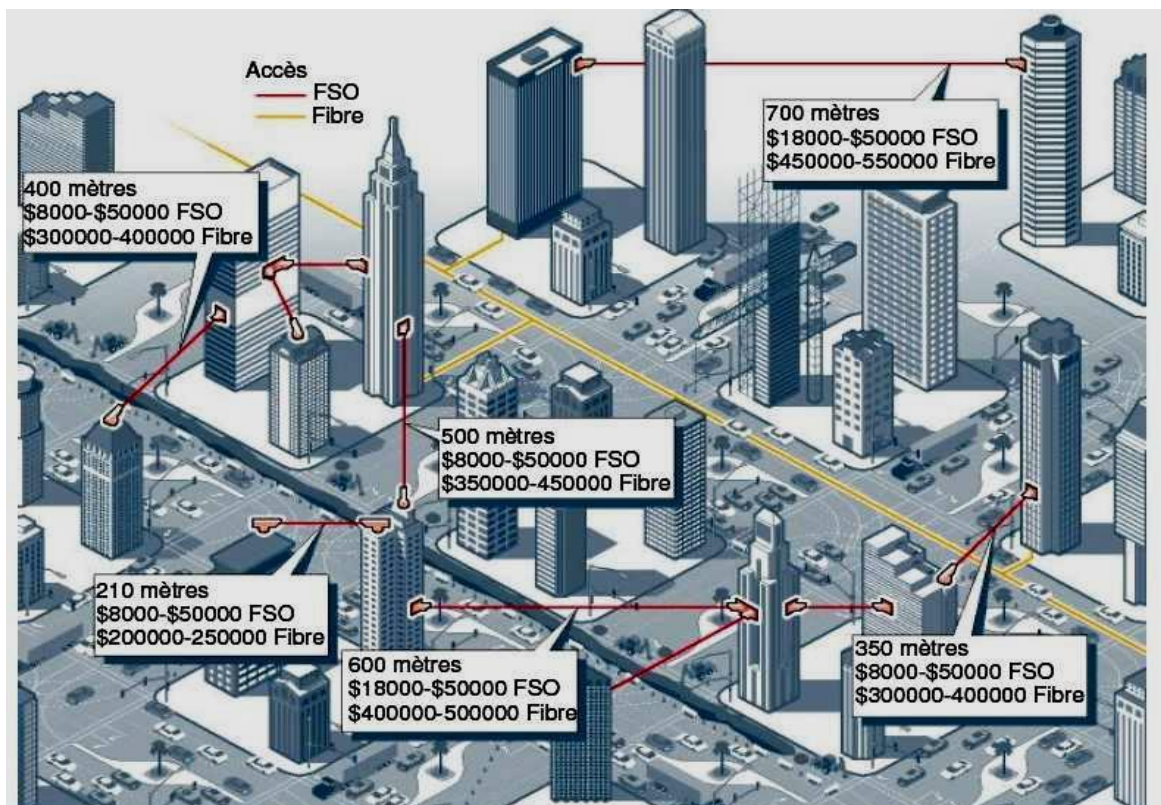
Le concept des liaisons FSO est similaire à la transmission optique à l'aide de fibres optiques, la seule différence est le support. La lumière se déplace plus vite dans l'air (environ 300.000 km/s) qu'à travers le verre (environ 200.000 km/s), ce qui fait que les communications à travers les liaisons FSO peuvent être considérées comme des communications à la vitesse de la lumière.

Le déploiement des réseaux à fibre optique prend des mois, tandis que les systèmes optiques sans fil peuvent être mis en place en quelques heures, et à une fraction du coût. En plus, les réseaux FSO sont des plateformes redéployables, ils offrent un avantage

économique sur la fibre optique. Un autre aspect important à prendre en compte est les avantages environnementaux de l'optique atmosphérique. L'installation des fibres nécessite le creusement de tranchées, qui peut causer la pollution, l'abattage des arbres et la destruction

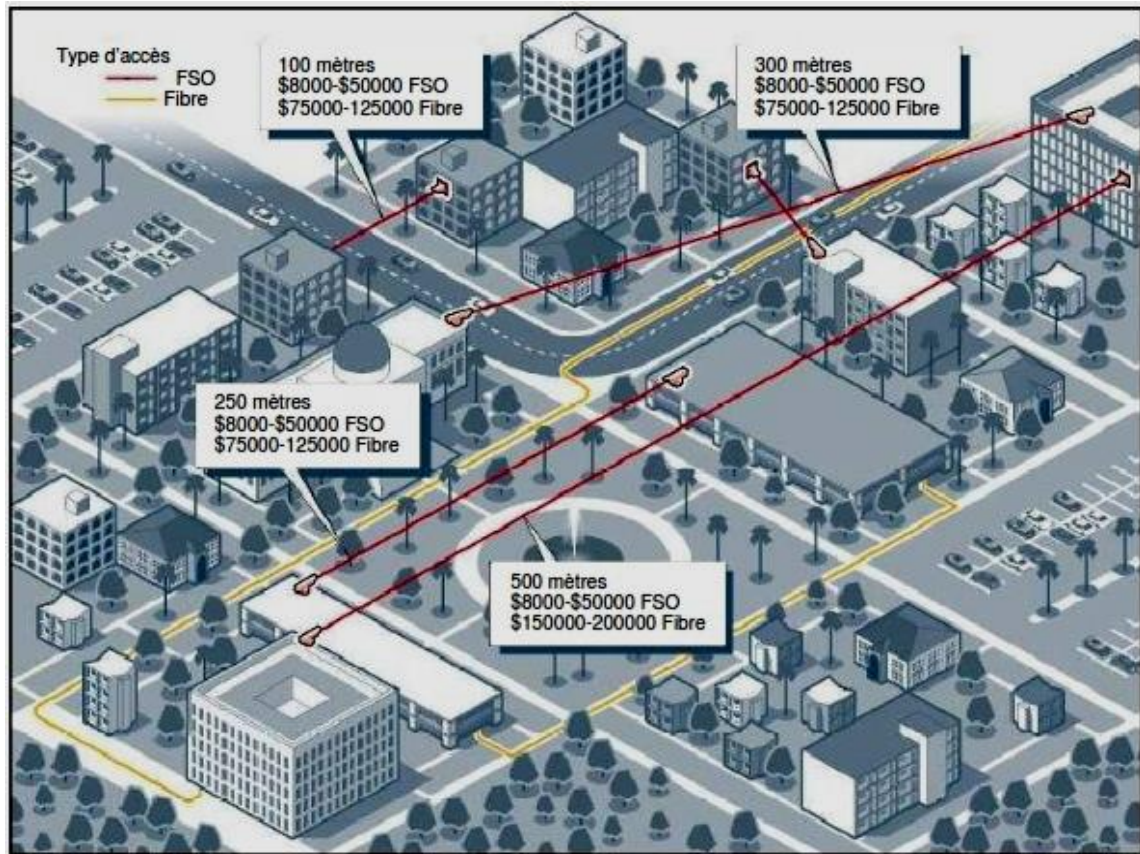
Des monuments historiques, ce n'est pas le cas pour FSO, par conséquent les systèmes FSO sont respectueux de l'environnement.

Les liaisons optiques sans fil permettent d'établir des communications à des débits comparables à ceux de la fibre optique. Cette dernière atténue le signal à des taux connus et l'amplification permet de compenser ces pertes. Les fibres optiques sont préférables pour les liaisons à grandes distances ainsi que pour les épines dorsales des réseaux. Pour les réseaux urbains, les liaisons FSO ont l'avantage d'être peu coûteuses, rapides et faciles d'installer, flexibles et peuvent être déployées dans tous les réseaux. A titre d'exemple la figure 1.16 et la figure 1.17 représentent une comparaison de coût du service d'accès fourni à des systèmes FSO (Light point) et celui du service assuré par des fibres optiques pour une région urbaine et sur un campus [33]. :



**Figure 1.16:** Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (Light point) et celui du service assuré par des fibres optiques dans une région urbaine





**Figure1.17** : Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (Light - point) et celui du service assuré par des fibres optiques sur un campus.

### 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les technologies optiques FSO. Nous avons exposé le canal de transmission de ce système ainsi que les principales caractéristiques qui font cette technologie appropriée pour une utilisation dans le réseau d'accès ont été mises en évidence. Avec l'augmentation des demandes en bande passante, l'absence d'une infrastructure à grande vitesse qui relie les clients professionnels et individuels, et l'augmentation des coûts et du temps de déploiement des réseaux à fibre ainsi que la nécessité d'avoir une meilleure sécurisation des réseaux pour des applications gouvernementales stimulent actuellement une plus large adoption des liaisons optiques sans fil.

. De plus, nous avons présenté quelques défis sur les communications optiques sans fil, et on a vu leurs canal modèle et les pertes dans system FSO. Nous pouvons dire que l'espace libre utilisé en tant que support de propagation pour la lumière est devenue un élément clé dans des systèmes de télécommunications optiques.

Les procédures pour effectuer l'encodage et le décodage d'un canal avec la technique du SAC-OCDMA seront présentées dans le chapitre suivant.

# Chapitre 2 : OCDMA par encodage spectral d'amplitude : principe et architecture

## 2.1 Introduction

Dans cette chapitre traite l'ensemble de ces techniques optiques. Dans la première partie de ce chapitre, le concept de la technique OCDMA est présenté, ainsi que l'utilité de son d'utilisation et leurs différents types de codage /décodage seront décrits. Le système OCDMA souffre de différents bruits tels que le bruit thermique. Le codage spectral d'amplitude est une technique plus efficace pour réduire l'effet d'interférences d'accès multiples. Dans la littérature plusieurs codes ont été proposés pour cette technique. Pour cela, dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons les différents codes utilisés dans notre mémoire. A savoir, le les codes double poids (EDW), les codes multi-diagonaux (MD) améliorés

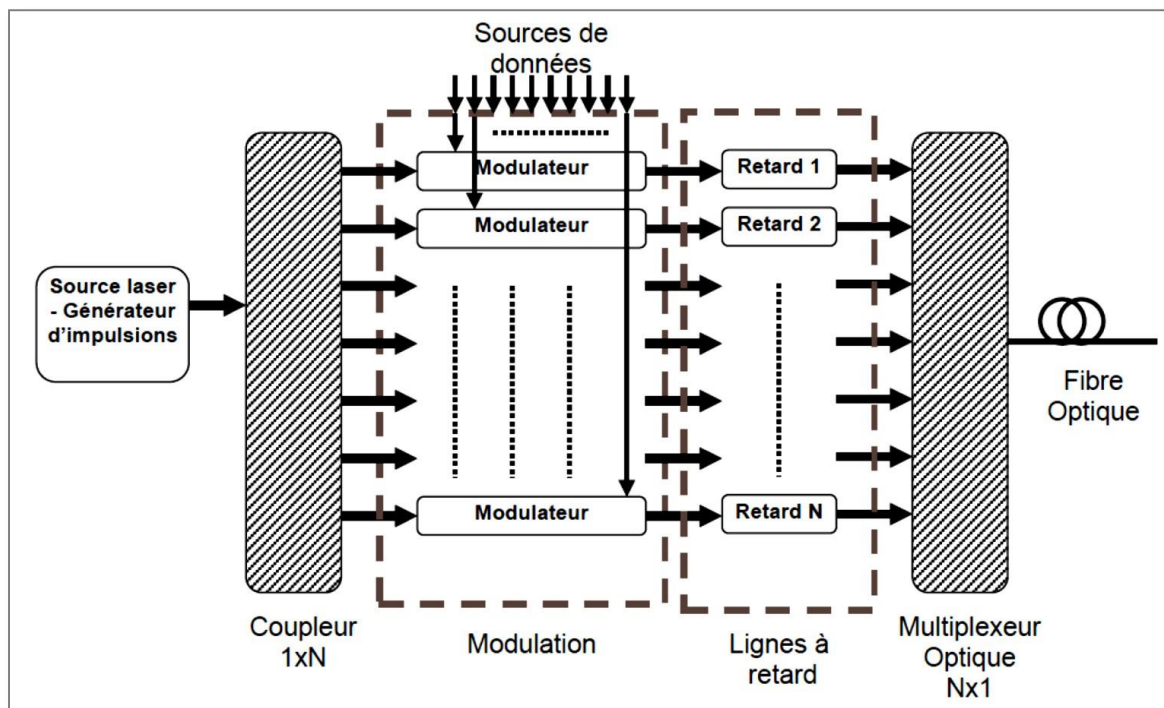
## 2.2 Généralisés sur les techniques d'accès multiples en communications optiques

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

Le principe de base de la technique OTDM (OTDM : Optical Time Division Multiplexing) est le même que celle TDM sauf que, cette dans cette technique, les données des différents usagers seront multiplexées de manière optique sur la même porteuse [32]. Ce type de multiplexage peut s'effectuer de deux manières : soit « tout- optique », on parle alors d'OTDM ou « électrique-optique », on parle alors d'ETDM (ETDM : Electrical Time Division Multiplexing) [36, 35].

#### .2.2.1.1 La technique OTDM

Comme illustré dans la figure 2.1, une chaîne de transmission utilisant le multiplexage OTDM (tout-optique) est constituée d'un émetteur, d'un récepteur [37].

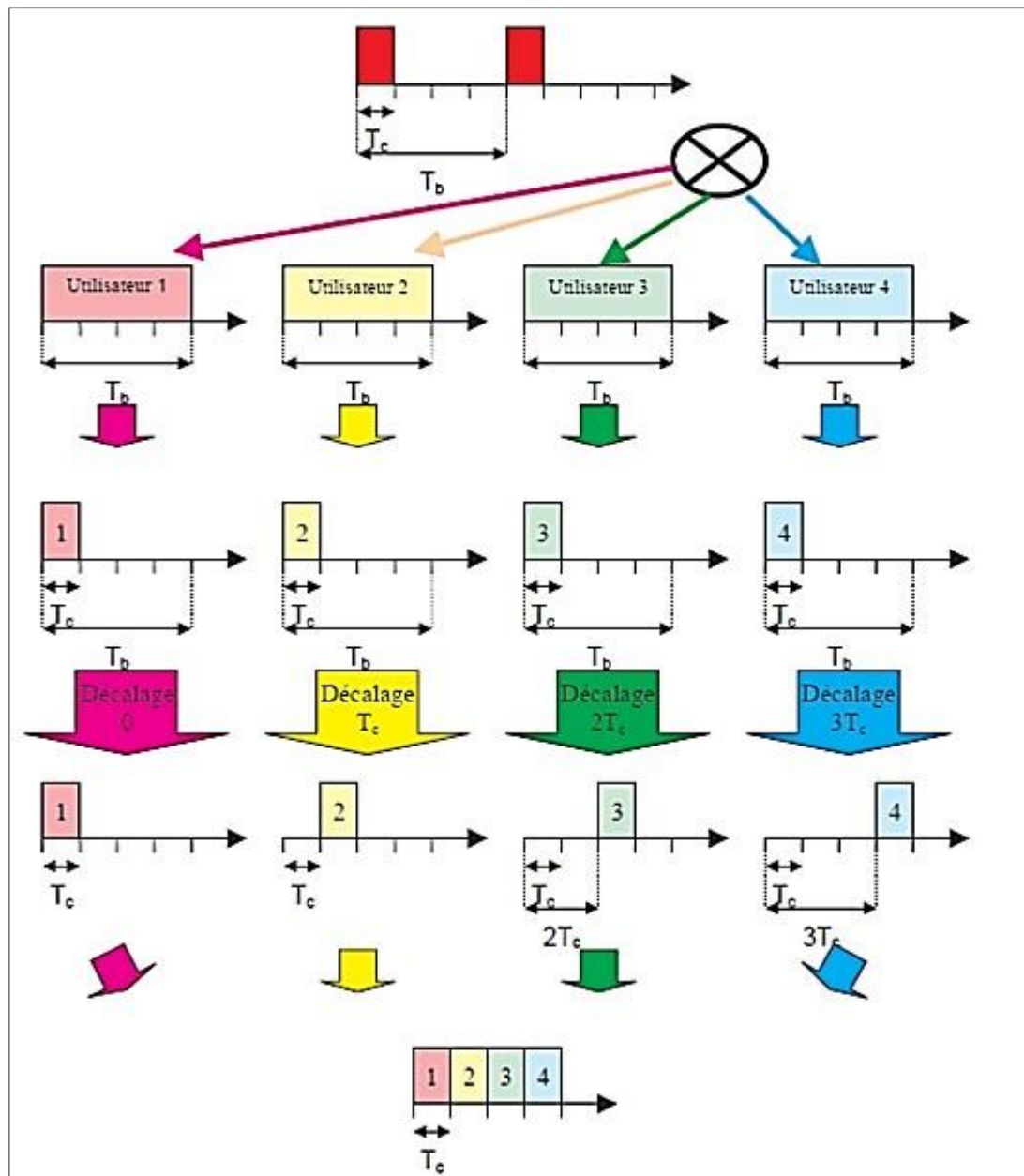


**Figure 2.1-** Emetteur OTDM à N utilisateurs [36]

A l'émission, une source optique pulsée (généralement un laser) génère un train d'impulsions optiques de durée  $T_c$  très courte (représentant la porteuse optique). Ces impulsions sont ensuite appliquées à l'entrée d'un modulateur optique, commandé par un signal électrique (représentant la donnée des utilisateurs) codé en RZ (RZ : Return to Zéro) [36] ou en NRZ (NRZ : Non Return to Zéro) à un débit binaire  $D_b = 1/T_b$  [38].

Cependant, pour que le multiplexage optique puisse se faire sans recouvrement optique, il est primordial de choisir le codage RZ puisqu'il génère des impulsions ayant une durée inférieure à  $T_b/N$  (étant le nombre d'utilisateurs) [37]. De cette manière une marge de sécurité est ajoutée afin d'éviter tout recouvrement entre les données.

Les signaux optiques en sortie des modulateurs sont ensuite décalés en temps et combinés en un seul signal, ayant un débit global  $N$  fois plus grand que celui de la donnée, avant d'être transmis à travers la fibre optique, comme montré avec l'exemple illustré sur la figure 2.2 pour quatre (04) utilisateurs [37].



**Figure 2.2-** Exemple d'un multiplexage OTDM à (04) utilisateurs [37]

En réception, les données des différents utilisateurs sont récupérées en isolant temporellement les impulsions optiques à l'aide d'un signal de synchronisation au rythme des données émises comme est illustré sur la figure 2.3 [38].

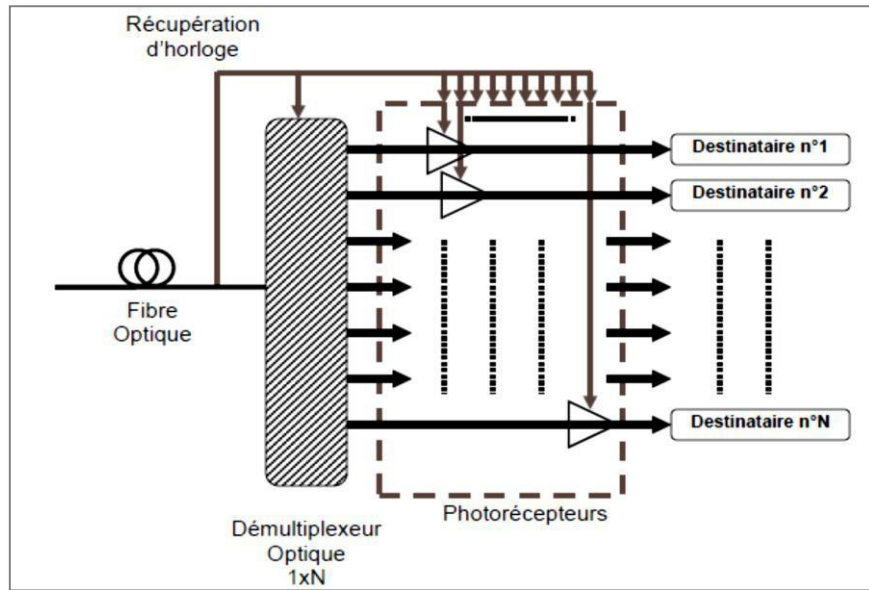


Figure 2.3-Récepteur OTDM à N utilisateurs [36].

### 2.2.1.2 La Technique ETDM

Contrairement à l'accès OTDM, la technique ETDM consiste à multiplexer les données provenant de chaque utilisateur avant de les moduler comme (voir figure 2.4) [38]. De cette manière, le modulateur optique fonctionnera à un débit  $N$  fois plus grand que celui de la donnée, ce qui constitue la principale limitation de cette technique [36, 39]. En effet, pour  $N$  de plus en plus grand, ça devient difficile de produire des impulsions de plus en plus courtes, de les transmettre correctement via la fibre optique (il faut s'assurer que l'élargissement de l'impulsion, dû au phénomène de dispersion dans la fibre, soit inférieur au temps du bit) et de récupérer le signal de synchronisme au niveau du démultiplexeur [37].

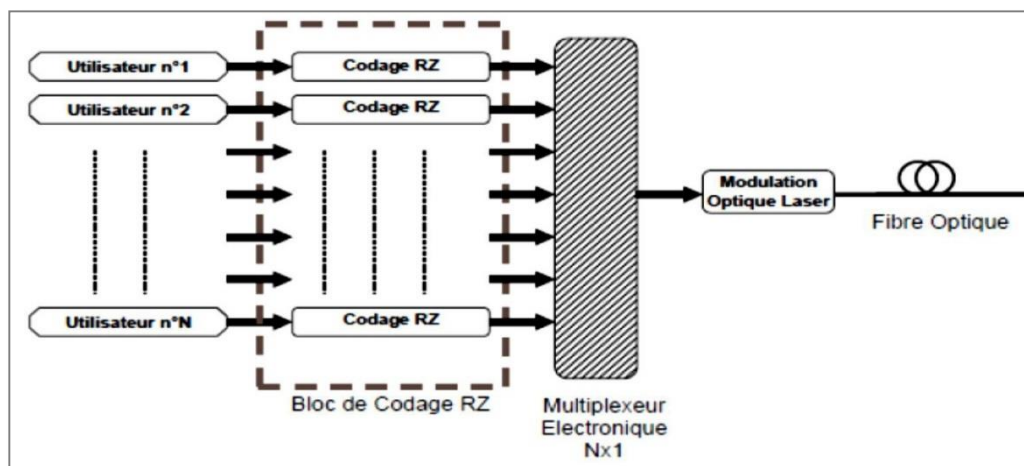


Figure 2.4 - Emetteur ETDM à N utilisateurs [37]

Le récepteur ETDM a la même structure que celui OTDM, illustré sur la figure 23, sauf que l'ordre des opérations de démultiplexage et de conversion optique/électrique est inversé.

### 2.2.2 Accès multiple par répartition de longueurs d'onde

Dans un tel système, porteuses optiques à différentes longueurs d'onde, générées par un ensemble de  $N$  sources laser, sont modulées séparément par  $N$  données électriques indépendantes. Ces signaux optiques sont ensuite multiplexés, en un seul signal composite, à l'aide d'un multiplexeur optique (voir figure 2.5) pour être ensuite transmis dans une seule fibre optique [37]. Ainsi  $N$  abonnés peuvent transmettre leurs données simultanément, chacun sur une bande de fréquence spécifique.

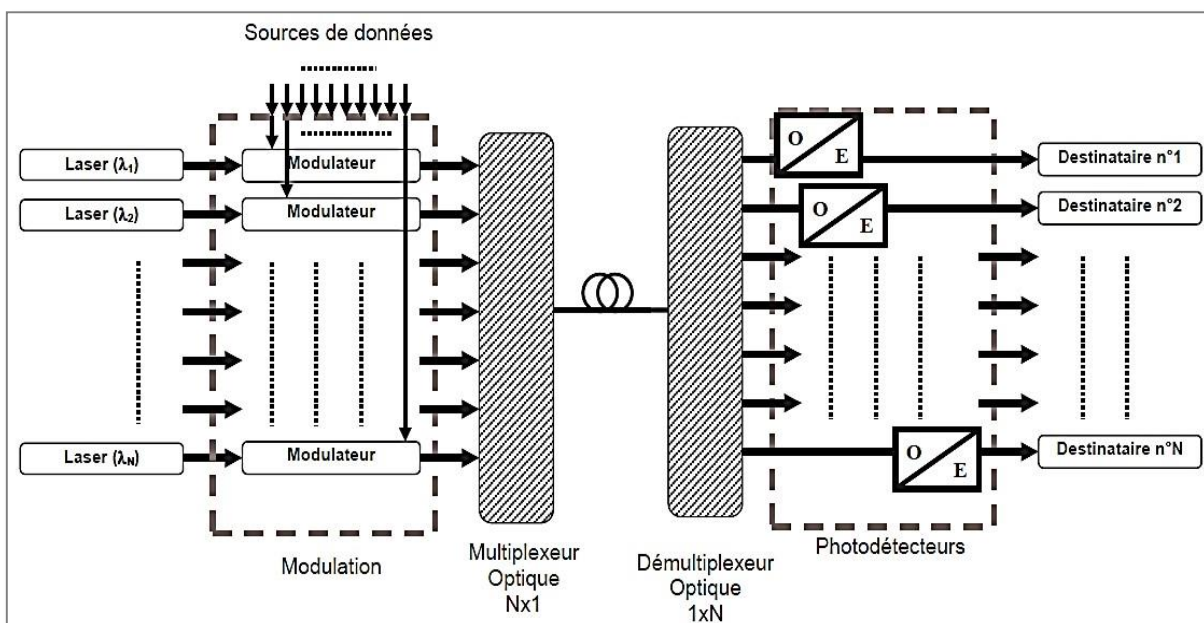
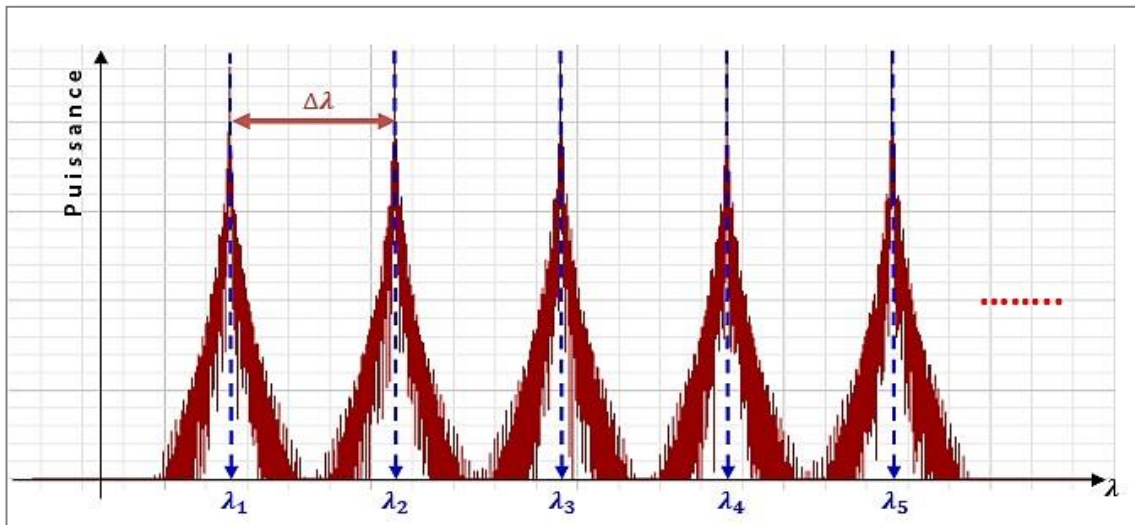


Figure 2.5- Système WDMA à N utilisateurs [27]

Au niveau réception, les différentes ondes transmises sont simplement séparées par le moyen d'un démultiplexeur optique (DEMUX : Démultiplexeur). Les composants optiques MUX/DEMUX sont des dispositifs passifs (aucun apport d'énergie extérieur n'est nécessaire pour leur fonctionnement) dont le principe de fonctionnement est similaire à des filtres sélectionnant le signal désiré dans une bande de longueurs d'onde donnée [40, 41].

Il est essentiel à noter qu'il existe deux paramètres importants à prendre en compte lors de la conception d'un tel système, qui sont l'espacement spectral minimal entre deux longueurs d'onde successives  $\Delta\lambda$ , comme montré sur la figure 2.6, afin d'éviter tout recouvrement spectral entre les

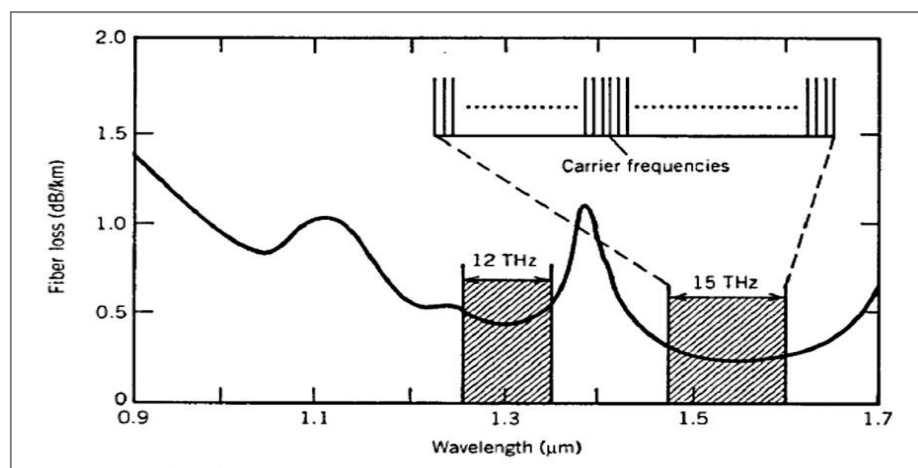
canaux adjacents et l'atténuation en fonction de la longueur d'onde choisie (due au support de transmission).



**Figure 2.6**–Spectre WDM avec  $\Delta\lambda$  l'espacement entre les canaux

Suivant la valeur de l'espacement spectral ( $\Delta\lambda$ ), deux techniques de multiplexage WDM sont considérées : le multiplexage par répartition espacée en longueur d'onde (CWDM, Coarse Wavelength Division Multiplexing) et le multiplexage par répartition dense en longueur d'onde (DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexant).

D'autre part et dans la mesure où le signal transmis sera véhiculé par la fibre optique, il est indispensable de bien choisir la bande de fréquence utilisée pour le système WDM de telle sorte que celle-ci corresponde au minimum d'atténuation (voir figure 2.7).



**Figure 2.7**- Fenêtres de transmission à faibles pertes [45]



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

Les avantages de la technique d'accès CDMA dans le domaine des radios fréquences, ont motivé les chercheurs en télécommunications à envisager son importation dans le domaine optique [38]. Ce transfert permet de s'affranchir aux problèmes des deux précédentes techniques (OTDMA et WDMA) [41,46] :

- En assurant l'asynchronisme total entre les différents utilisateurs (verrou technologique de la technique TDM) ;
- En garantissant une capacité de multiplexage élevée avec plus de débit et de flexibilité (en WDMA : nécessité d'autant de récepteurs accordables en longueur d'ondes pour autant de longueur d'ondes). Ainsi, l'OCDMA permet de [41, 47] :

Offrir plusieurs services simultanément, comme la télévision, la connexion à internet et la téléphonie, appelés aussi services « Triple Play » (vidéo, donnés, voix) en utilisant des débits multiples ;

Concevoir des réseaux optiques à coût réduit grâce à l'utilisation des systèmes DMA « tout-optique » ;

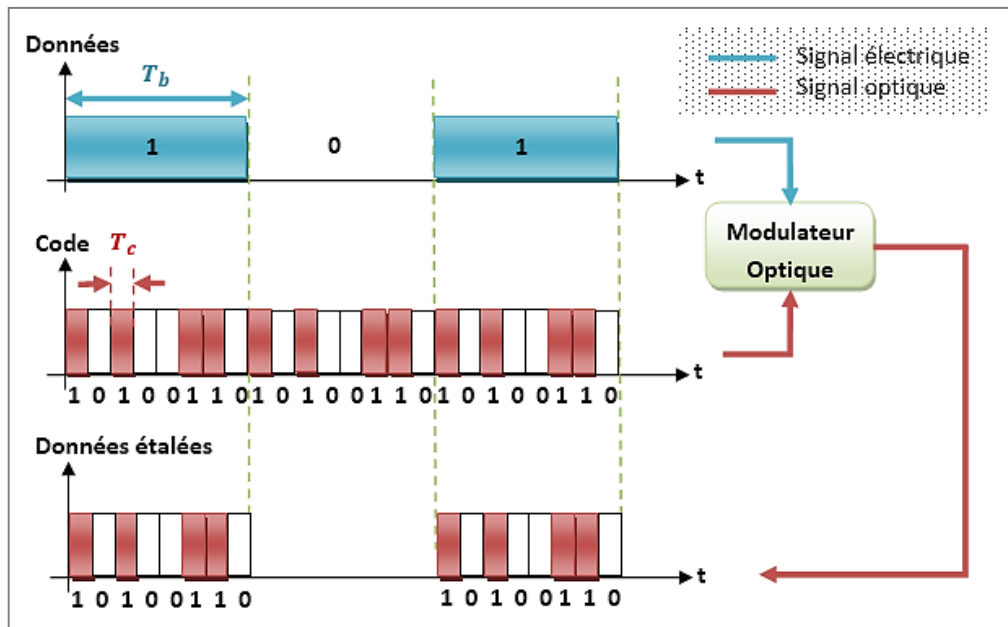
Garantir la sécurisé et la confidentialité des informations transmises par les utilisateurs en attribuant à chacun une séquence de code unique [46]. Le degré de sécurité du système dépend du codage (propriétés de corrélation des codes utilisés, complexité du code et capacité de multiplexage).

D'autres solutions peuvent être envisagées pour renforcer la sécurité du système OCDMA consiste à utiliser des systèmes de détection complexes rendant l'interception des informations plus difficile, ou bien utiliser des codes régulièrement reconfigurables.

### 2.3 Principe de la technique OCDMA

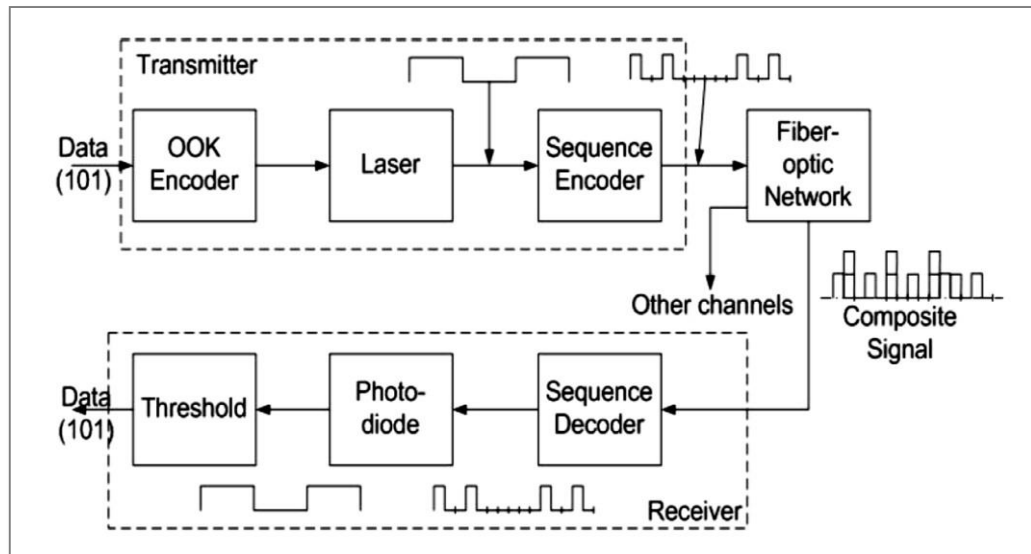
Le CDMA optique est fondé sur les mêmes notions de base du CDMA radiofréquence mais leurs implémentations sont complètement différentes, principalement, due à la différence du support de transmission où il faut prendre en compte les contraintes du canal optique (dispersion, atténuation et effets non-linéaires) [41]. Le principe consiste à attribuer à chaque utilisateur un code spécifique, appelé aussi signature optique. Ce code est composé d'une suite de  $L$  éléments binaires (bits) appelés chips, de durée  $T_c$  très inférieure (débit élevé) à celle de donnée  $T_b$  (ce qui a pour effet d'étaler le

signal), comme illustre la figure 2.8 [38]. Le nombre total des chips définit la longueur du code  $L$  et le nombre des chips ayant une amplitude « 1 » définit le poids du code  $w$ .



**Figure 2.8-** Codage de données en OCDMA

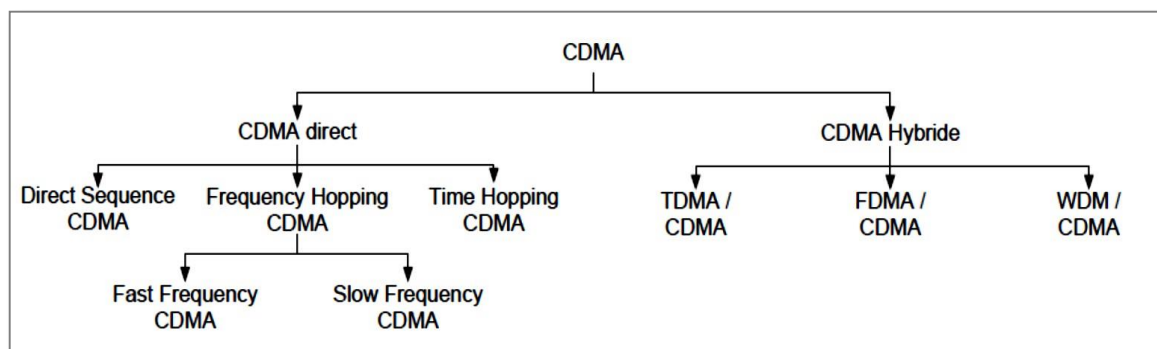
Les séquences de codes sont générées par les sources optiques dont les principales utilisées en OCDMA sont les sources incohérentes à large bande (LED : Light Emitting Diode), les lasers à impulsions courtes ou encore des sources lasers continues multi longueurs d'onde [34]. Donc pour chaque utilisateur, à l'émetteur, il existe un codeur qui génère le flux de données codé correspondant (voir figure 2.9). Les flux de données codées issues des différents utilisateurs sont ensuite combinés formant ainsi un signal composite transmis dans le support de transmission partagé. Du côté récepteur, pour chaque utilisateur, existe un décodeur qui tente de régénérer les bits de données de l'utilisateur correspondant parmi les autres bits issus de tous les utilisateurs [48]. Tous les autres bits reçus autres que ceux de l'utilisateur souhaité sont vus comme une source d'interférences MAI. Le signal optique décodé est ensuite converti en un signal électrique grâce à une photodiode.



**Figure 2.9-** Architecture d'un émetteur-récepteur OCDMA [49]

Enfin, un organe de décision à seuil permet de prendre des décisions, c'est-à-dire le bit reçu est un bit de données « 1 » ou « 0 » en fonction de l'intensité du signal reçu, pour reconstituer une suite de données qui soit aussi similaire que possible à celle émise [49].

#### 2.4 Différents architectures du système OCDMA



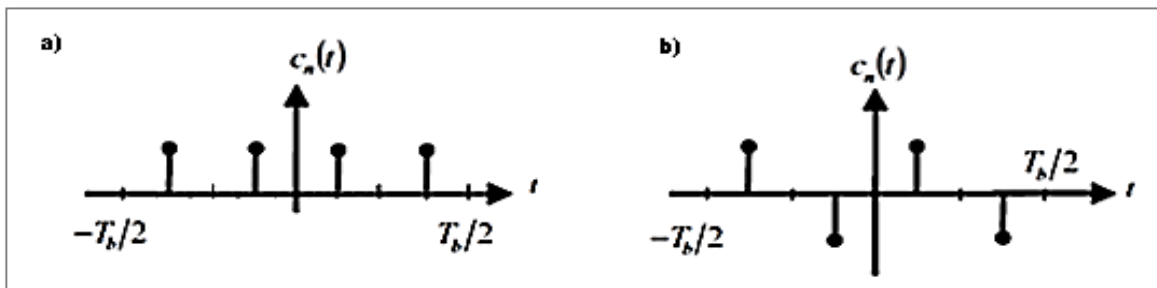
**Figure 2.10-** Classification des techniques OCDMA incohérentes [51]

En OCDMA, chaque code peut être représenté par une séquence où celle-ci peut être implémentée de différentes manières, soit dans le domaine temporel (OCDMA temporel à une dimension, 1D), soit dans le domaine fréquentiel (OCDMA fréquentiel, 1D), soit un mélange des deux (OCDMA hybride, 2D) ou soit dans l'espace [50]. Les différentes architectures du système OCDMA sont illustrées sur la figure 1.10.

### 2.4.1 OCDMA temporel

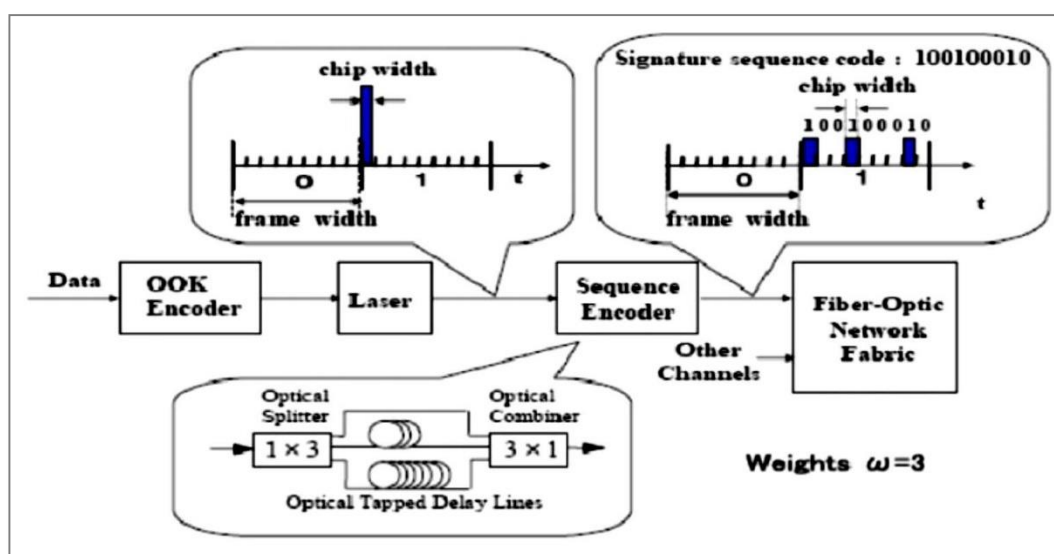
Il existe deux types d'encodage dans le domaine temporel comme représenté sur la figure 2.11 [52] : L'encodage à séquence directe (DS-OCDMA : Direct Sequence OCDMA): ainsi appelée car le codage est simplement réalisé par la multiplication directe de la donnée avec le code (chaque bit de donnée est directement modulé en amplitude par le code) (figure 2.11 a);

L'encodage temporel en phase (TPE-OCDMA : Temporel Phase Encoding OCDMA) : consiste à réaliser une modulation de phase du champ optique dans le domaine temporel (figure 2.11b).



**Figure 2.11-** Types d'OCDMA temporel : a) DS-OCDMA, b) TPE-OCDMA [52]

Dans cette section nous allons nous intéresser à l'encodage à séquence directe. Dans les systèmes DS-OCDMA, les codes sont obtenus en plaçant des impulsions optiques courtes à différentes positions temporelles (le nombre de ces impulsions correspond au poids du code  $w$ ) dont les intervalles de temps entre ces impulsions représentent le code comme montré sur la figure 2.12[53].



**Figure 2.12-** Structure d'un système DS-OCDMA [54]

Différentes propositions existent pour réaliser l'encodage tout-optique dont la plus simple est basée sur l'utilisation de  $w$  sections de fibres de longueurs variables, réalisant ainsi des retards variables, couramment appelées « lignes à retard temporel ». Le choix des retards appliqués dépend des codes choisis [55].

Donc, une impulsion courte de durée égale à la largeur des chips  $T_c$ , tel que :  $T_c = L.D$

, générée à partir d'un laser à impulsion, est envoyée vers un coupleur  $1 \times w$  (dispositif optique reliant une ou plusieurs entrées à une ou plusieurs sorties permettant ainsi de faire le mélange ou la séparation des signaux). Chacune des branches du coupleur se voit imposer un délai (retard) particulier comme expliqué sur la figure 2.13. A la sortie du coupleur, les impulsions seront retardées différemment pour être ensuite recombinaison à l'aide d'un autre coupleur  $w \times 1$  [41].

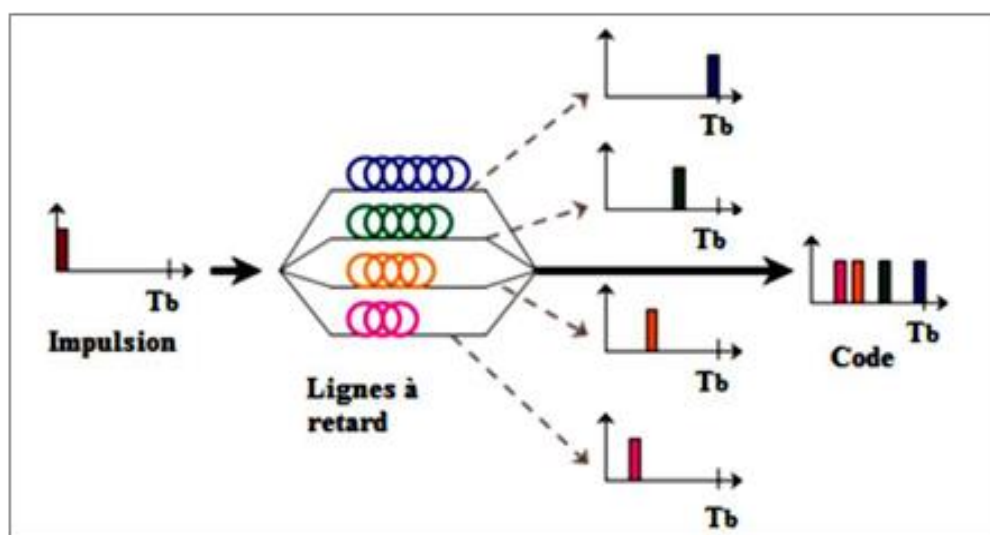


Figure 2.13- Technique du codage temporel [56]

Le retard créé par la  $j^{\text{ème}}$  ligne à retard est calculé par [54] :

$$\tau_j = i_j \cdot T_c \quad \text{avec} \quad 0 \leq i_j \leq L-1 \quad (2.1)$$

Au récepteur, Le décodeur à la même structure du codeur (composé d'un coupleur  $1 \times w$  et d'un autre de dimension  $w \times 1$ ), sauf que les retards sont modifiés, afin de compenser ceux créés en émetteur, à [54] :

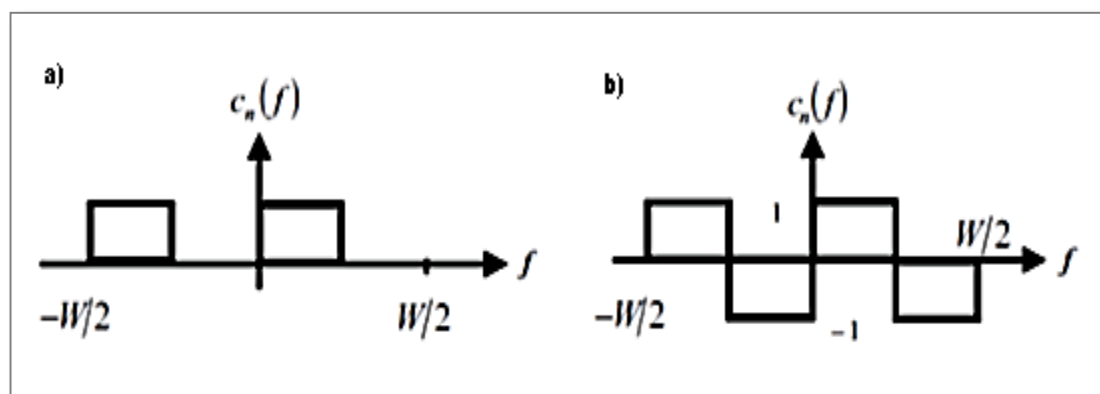
$$\tau_j = (L - 1 - i_j) \cdot T_c \quad \text{avec} \quad 0 \leq i_j \leq L-1 \quad (2.2)$$

### 2.4.2 OCDMA Spectral

Il existe deux types d'encodage dans le domaine spectral montrés sur la figure 2.14 [52]:

L'encodage spectral en amplitude (SAC-OCDMA : Spectral Amplitude Coding OCDMA): codage spectral en amplitude ou, aussi, encodage en fréquence. Cette méthode consiste à attribuer à chaque usager une partie du spectre optique comme code. (Figure 2.14 a) ;

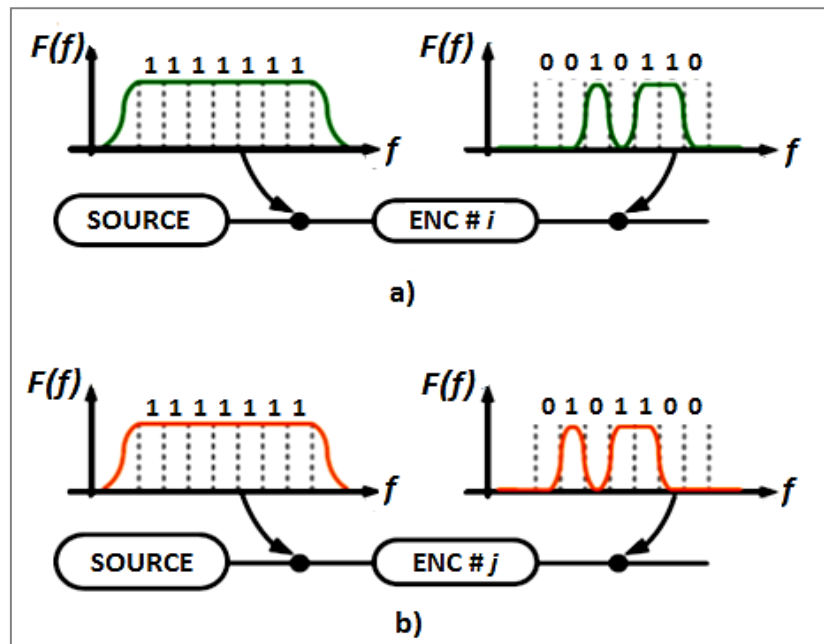
L'encodage spectral en phase (SPE-OCDMA : Spectral Phase Encoding OCDMA) : consiste à effectuer une modulation de phase dans le domaine spectral des données (figure 2.14b).



**Figure 2.14-** Types d'OCDMA spectral : a) SAC-OCDMA, b) SPE-OCDMA [52]

Dans ce qui suit, nous allons nous focaliser sur la première méthode d'encodage (SAC-OCDMA) puisque c'est sur cette méthode qui est considérée pour notre étude (étude du système SCM SAC-OCDMA).

Cette technique de codage est nommée ainsi car le codage est réalisé en amplitude sur plusieurs longueurs d'onde. Dans un tel codage, chaque utilisateur se voit attribuer un code (une empreinte) constitué d'un ensemble de longueur d'onde spécifique  $w$  parmi  $L$  longueurs d'onde disponibles produites à partir d'une source optique (voir figure 2.15) [57].



**Figure 2.15-** Principe de l'encodage spectral SAC-OCDMA : a) pour usager désiré avec le code # i, b) pour un interférent avec le code # j [58]

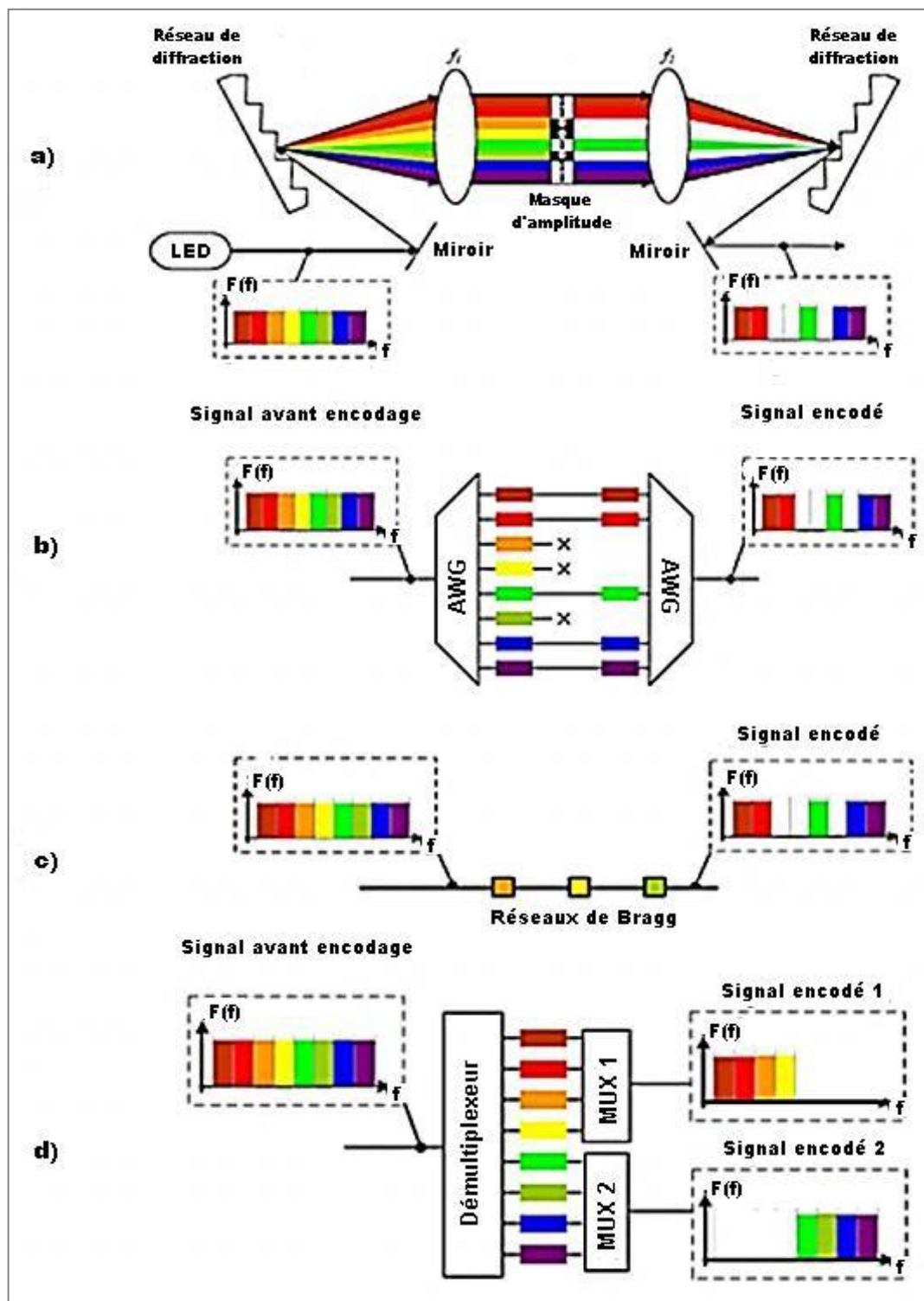
Toutefois, et comme nous avons vu précédemment, la source optique peut être soit :

- Cohérente (spectre étroit) utilisée dans les systèmes OCDMA cohérents où l'information est considérée portée par l'amplitude et la phase du signal optique donc l'étalement des données s'effectue en utilisant des codes bipolaires [15] ;
- Incohérente (spectre large bande) utilisée dans les systèmes OCDMA incohérents qui utilisent la présence ou l'absence du signal lumineux pour représenter le « 1 » et le « 0 » binaires respectivement, appelé codage unipolaire tout ou rien OOK (OOK : On Off Keying) [52, 54, 55,56].

La majorité des propositions SAC-OCDMA utilise des sources incohérentes large bande dont plusieurs technologies sont envisagées pour réaliser l'encodage (voir figure 2.15) à savoir celle utilisant [41, 43, 56]:

- un masque d'amplitude [59] (voir figure 2.15a, qui permet de supprimer les composantes spectrales indésirables) ;
- un réseau AWG (AWG : Arrayed Waveguide Grating ou réseau sélectif planaire), montré sur la figure 2.15 b ;
- des réseaux de Bragg (voir figure 1.16 c) ;
- des démultiplexeurs et multiplexeurs (voir figure 1.16 d) optiques [60].

D'autres types d'encodage envisagent d'utiliser des composants optiques de type Mach-Zehnder MZ (MZ : Mach-Zehnder) et Fabry-Perot [58].



**Figure 2.16-** Technologie d'encodage OCDMA spectral : a) Masque d'amplitude) AWG, c) Réseaux de Bragg, d) Démultiplexeurs et multiplexeurs optiques [56]



### 2.4.3 OCDMA Hybride

L'OCDMA hybride est basée sur le codage de l'information en utilisant simultanément deux dimensions différentes : longueur d'onde - temps W-T (W-T : Wavelength - Time) ou temps - espace T-S (T-S : Temporal - Spatial) ou bien deux techniques d'accès multiples, comme par exemple le système WDM / OCDMA [41, 61].

#### 2.4.3.1 W-T / OCDMA

Le schéma général d'un réseau W-T / OCDMA est illustré à la figure 2.17. Un codage 2D est effectué à la fois en temps et en longueur d'onde. En effet, des impulsions courtes sont placées dans différents chips (à « 1 ») durant le temps bit et chaque chip à une longueur d'onde particulière, en suivant un modèle de saut de longueur d'onde, ce qui permet d'augmenter la flexibilité de la conception des codes (augmenter le nombre d'utilisateurs) ainsi que la performance du code [62]. Contrairement à la technique SAC-OCDMA, le format RZ est adopté au lieu du format NRZ [53].

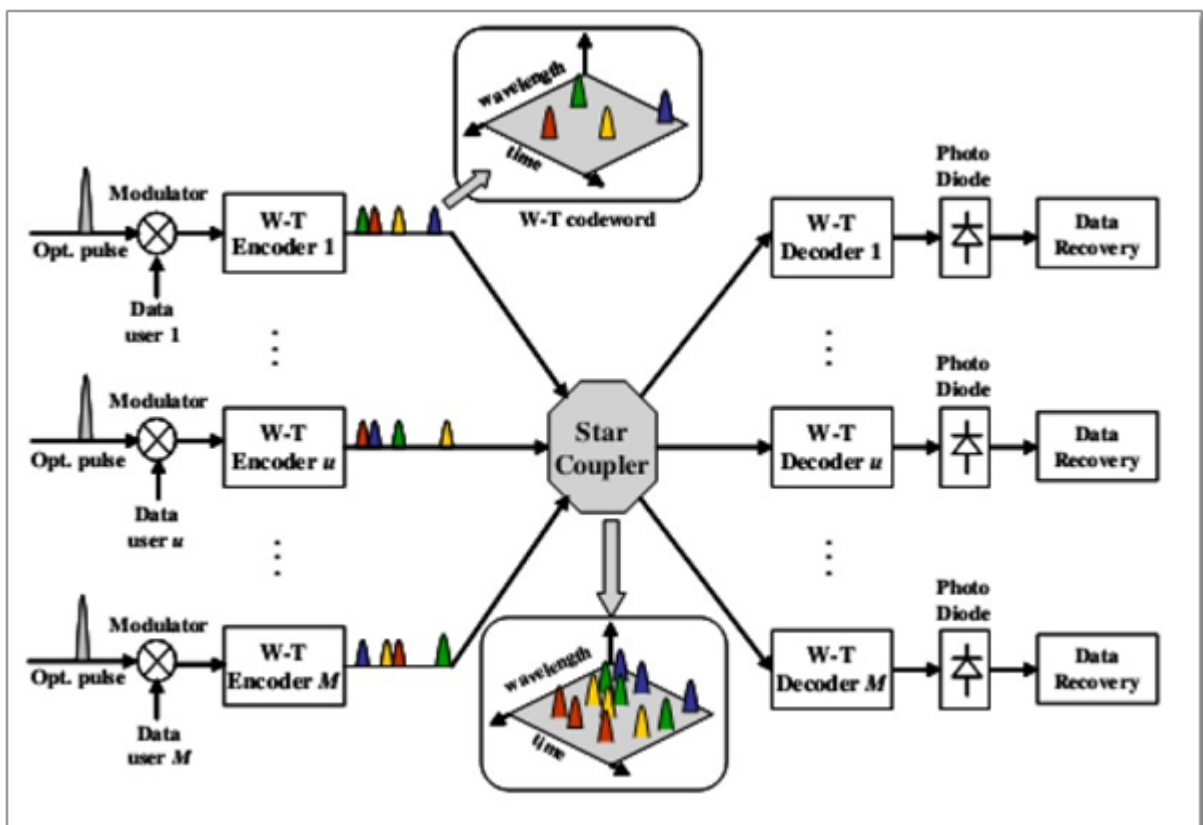


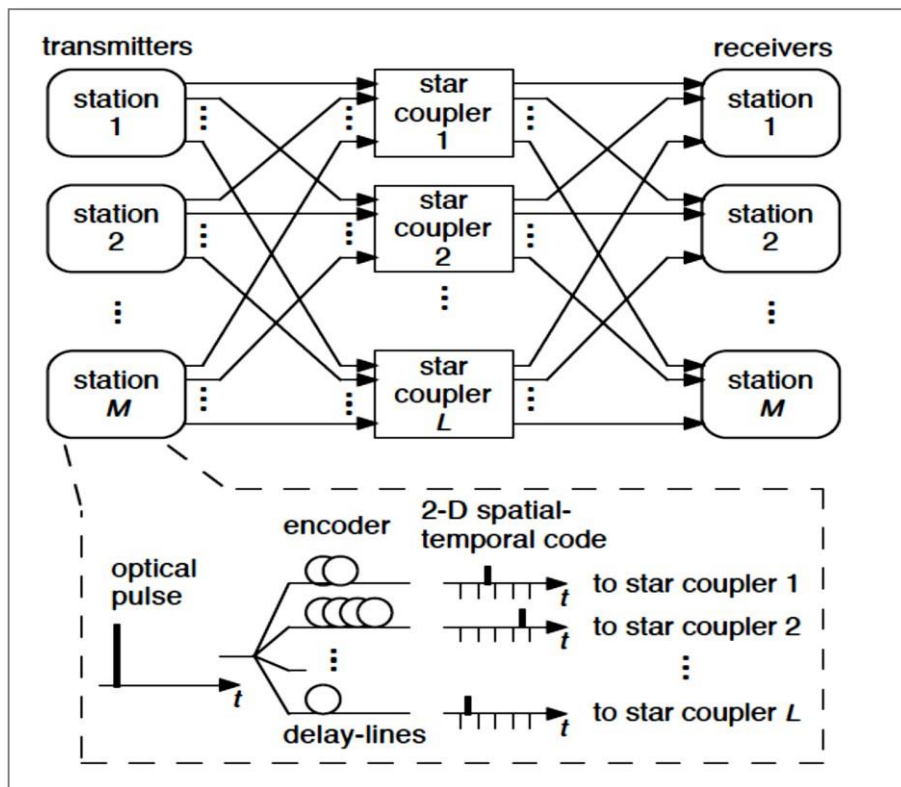
Figure 2.17- Architecture d'un réseau W-T / OCDMA [62]

L'intérêt de ce type de codage réside dans le fait qu'il permet de réduire les contraintes sur l'étalement temporel 1D (longueur des codes admissible) et l'étalement spectral 1D (nombre

de longueurs d'onde disponibles). Néanmoins, la difficulté à réaliser la détection à la fois en temps et en longueur d'onde représente sa limitation principale [63].

### 2.4.3.2 T-S/OCDMA

La structure de ce type de codage est représentée sur la figure 2.18. La dimension temporelle est obtenue en utilisant les lignes à retard (même principe d'un système OCDMA temporel 1D) et le domaine spatial est assuré par de multiples canaux de transmission tels que l'espace libre (free space), de fibres multiples ou fibre multicœurs (câble optique réduit aux dimensions d'une seule fibre pouvant contenir plusieurs guides monomodes) [64]. De ce fait, L'inconvénient de ce codage est la complexité du système [41].



**Figure 2.18-** Architecture d'un réseau T-S / OCDMA [64]

### 2.4.3.3 WDM /OCDMA

Cette technique d'accès consiste à associer à l'OCDMA une dimension supplémentaire en longueur d'onde (voir figure 2.19). Dans ce cas, chaque séquence de code est réutilisable et émise simultanément à différentes longueurs d'onde [34]. L'intérêt de cette technique est le pouvoir d'améliorer la capacité de multiplexage avec un accès flexible en relâchant les contraintes d'orthogonalité des codes [41].

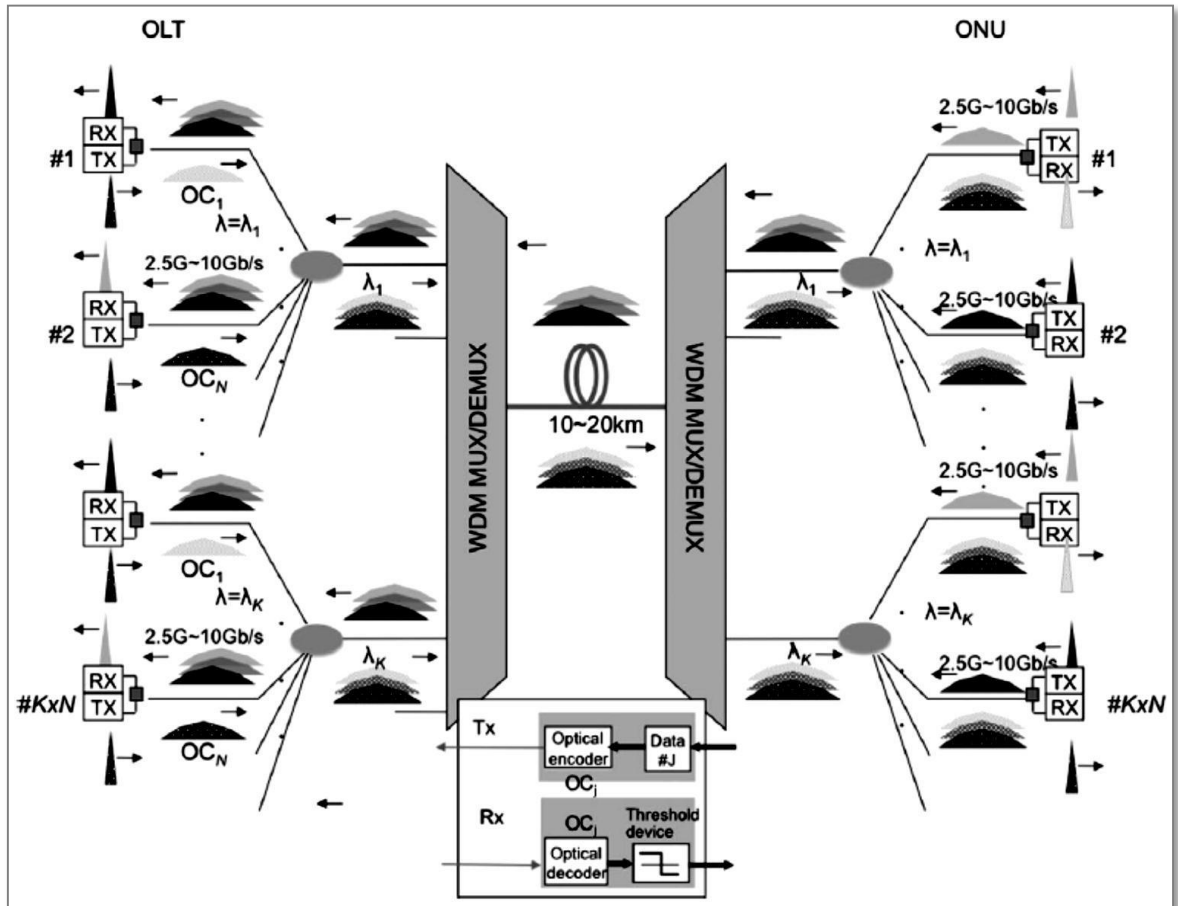


Figure 2.19- Architecture d'un système WDM / OCDMA PON [65]

## 2.5 Techniques de détection en SAC-OCDMA

Il y a deux paramètres essentiels qui ont un impact direct sur les performances du système OCDMA ; le choix des codes utilisés et le choix du type de détection [67]. Ces techniques de détection peuvent être classées en deux grandes catégories : *la détection directe* (corrélation croisée, entre les codes, nulle) et *la détection balancée* (corrélation croisée, entre les codes, fixe) [38,66].

### 2.5.1 Détection balancée

L'architecture d'un système SAC-OCDMA utilisant la détection balancée est illustrée sur la figure 2.20. Dans cette structure, pour chaque utilisateur, le récepteur est composé d'un coupleur  $1 \times 2$  (utilisé comme un splitter [68]) où le bras supérieur comporte le décodeur de l'utilisateur désiré (son spectre est identique à celui du codeur) et le bras inférieur comporte le décodeur complémentaire (son spectre est complémentaire à celui du codeur)[69]. L'utilisation d'une photodiode balancée, pour chaque utilisateur, permet de générer à la sortie de celle-ci un

signal électrique proportionnel à la différence entre les photo courants produits par les deux photodiodes correspondantes à l'utilisateur en question. De plus, un atténuateur est inséré dans le bras inférieur du coupleur afin d'ajuster la détection balancée [58, 69, 70, 71].

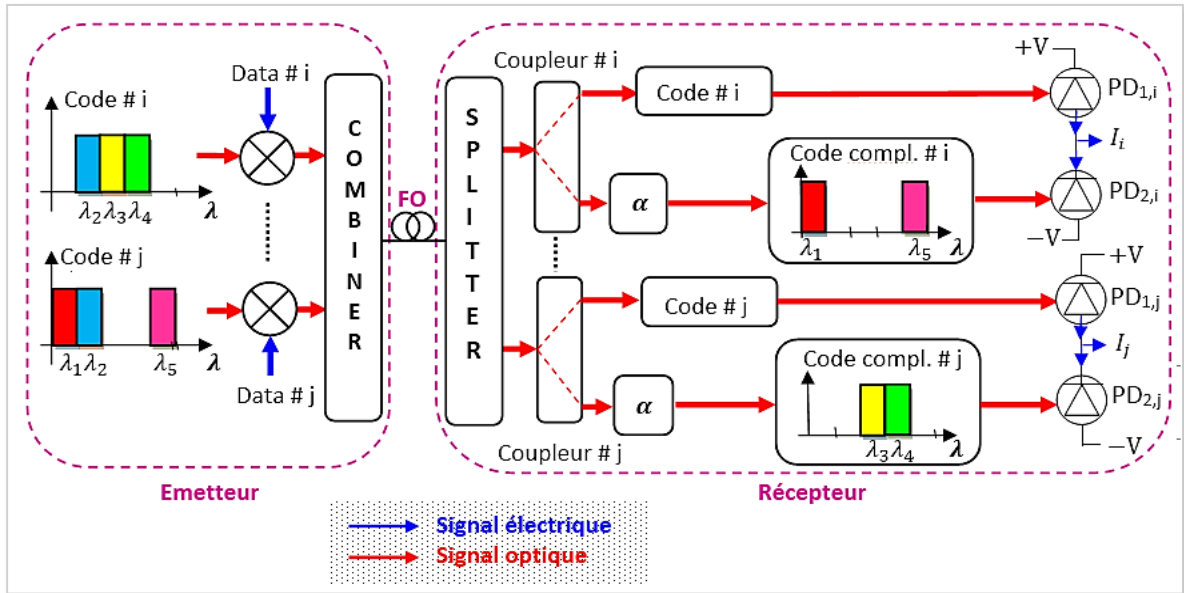


Figure 2.20- Architecture d'un système SAC-OCDMA à détection balancée

Le facteur d'atténuation  $\alpha$  peut être calculé comme suit [38, 56]:

$$\alpha = \frac{\lambda_c}{\lambda_c - w} \quad (2.3)$$

Avec :  $w$  est le poids du code et  $\lambda_c$  la corrélation croisée.

De cette façon, l'utilisateur désiré sera favorisé par rapport aux utilisateurs interférents. En effet, afin d'expliquer mieux le principe de la détection balancée, prenant l'exemple donné sur le tableau 2.1. Les résultats de l'analyse sont détaillés (l'architecture du récepteur, de la figure 2.20, est éclatée et divisés en deux parties) et illustrées sur la figure 2.21.

Paramètre	Valeur
$w$	3
$\lambda_c$	1
$\alpha$	1/2
Code # i	0 1 1 1 0 → utilisateur désiré
Code compl. # i	1 0 0 0 1
Code # j	1 1 0 0 1 → utilisateur interférent
Code compl. # j	0 0 1 1 0

Tableau.2.1- Paramètres de l'exemple étudié.

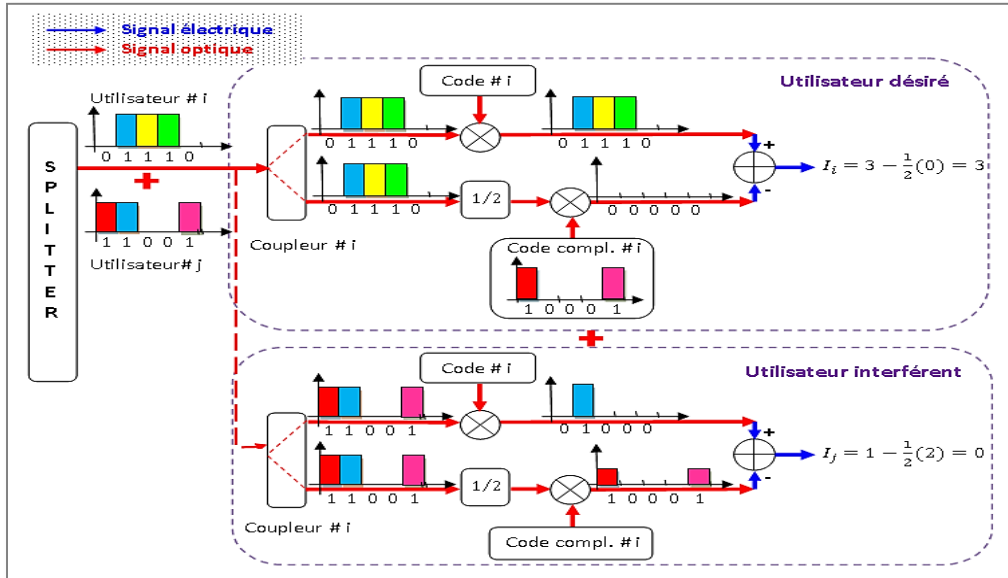


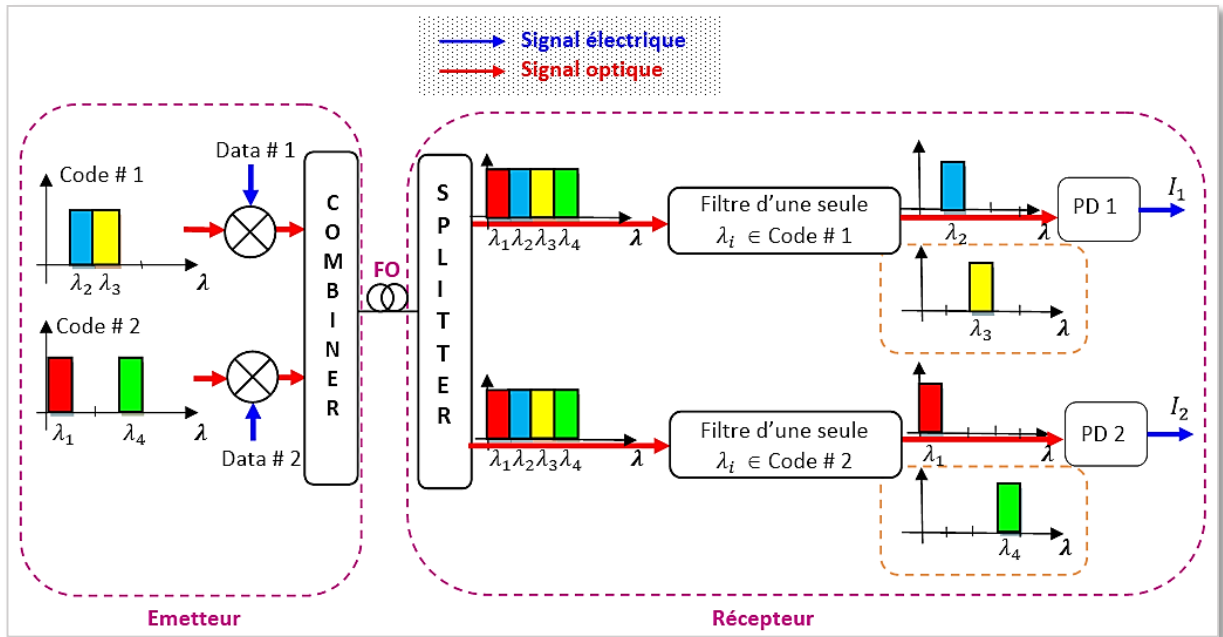
Figure 2.21- Exemple de fonctionnement de la détection balancée

D’après les résultats obtenus, nous constatons qu’avec ce type de détection, seul le signal désiré sera récupéré au niveau de l’usager correspondant. Les autres signaux interférents seront étouffés : éliminant ainsi les interférences entre utilisateurs (MAI). Cependant, malgré les bonnes performances obtenues, la détection balancée souffre d’une complexité accrue des récepteurs.

### 2.5.2 Détection directe

La mise en œuvre du système SAC – OCDMA utilisant DD pour la  $W = 3$  et  $N = 3$  (code généralisé) sont illustrés à la Fig2.22. DD utilise les longueurs d'onde ne se chevauchant pas dans son processus de détection. À la réception ver, les longueurs d’ondes ne se chevauchant pas, qui sont uniques pour chaque Les utilisateurs sont sélectionnés et envoyés aux photodiodes. Il nécessite une seule photo détectrice pour détecter les longueurs d’onde sans aucun soustracteur utilisé en détection équilibrée (section 4). Intensité induite par phase Le bruit (PIIN) est éliminé lors de la détection des ondes non superposées. Longueurs. Il en résulte une complexité réduite du récepteur avec amélioration des performances. Par rapport à la détection équilibrée, DD ne nécessite pas de séparateur de puissance, deux photodiodes et une soustraction au décodeur de chaque utilisateur. En raison de l’utilisation de moins de composants, là le coût du système est inférieur.

Soit  $C_i(j)$  le  $j^{\text{ème}}$  élément de la  $k^{\text{ème}}$  séquence de code proposée. Les longueurs d’onde  $W-2$  ne se chevauchant pas pour chaque utilisateur de  $C_z(j)$  sont :



**Figure 2.22 :** Configuration du système SAC – OCDMA pour  $W = 2$  en utilisant la détection directe pour le code généralisé.

Donc générateur  $C_z(j)$  pour tout utilisateur selon corrélation fonction [53] :

$$C_x(j) = \sum_{j=1}^L (C_z(j) \cdot C_k(j)) \tag{2.4}$$

$$= \begin{cases} W - 2 & k = l \text{ meme utilisateur} \\ 0 & K \neq l \text{ autre} \end{cases}$$

La variance de la photo courante due à la détection d'un problème idéal La lumière thermique non polarisée peut être écrite comme :

$$\langle I^2 \rangle = \langle I_{Shot}^2 \rangle + \langle I_{therm}^2 \rangle \tag{2.5}$$

Ici  $\langle I_{Shot}^2 \rangle$  et  $\langle I_{therm}^2 \rangle$  sont shot bruit et thermique bruit successivement. le PSD de récepteur optique signal est [53] ;

$$r(v) = \frac{P_{sr}}{\Delta v} \sum_{k=1}^N d_k \sum_{j=1}^L C_k(j) rect(j) \tag{2.6}$$

-  $d_k$  est Data bit de numéro utilisateur

-  $P_{sr}$  Puissance de récepteur.

-rect appliqué Unit Ste fonction.

Après avoir sélectionné des longueurs d'ondes ne se chevauchant pas, puissance totale incident à l'entrée de la photodiode du kth récepteur pendant un bit période peut être donnée comme [53] :

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} G(v)dv &= \int_0^{\infty} \left[ \frac{P_{sr}}{\Delta v} \sum_{k=1}^N d_k \sum_{j=1}^L C_k(j)C_x(j) \left\{ u \left[ \frac{\Delta v}{L} \right] \right\} \right] dv \\ &= \frac{P_{sr}}{\Delta v} \frac{\Delta v}{L} \sum_{k=1}^N d_k \sum_{j=1}^L C_k(j)C_x(j) \end{aligned} \quad (2.7)$$

En utilisant les propriétés de corrélation :

$$\int_0^{\infty} G(v)dv = \frac{P_{sr}(W-2)}{L} \quad (2.8)$$

Le photo courant générée par incident puissance optique

$$I = \mathcal{R} \int_0^{\infty} G(v)dv \quad (2.9)$$

Replacer la valeur dans les équations précédent est écrire

$$I = \frac{\mathcal{R}P_{sr}(W-2)}{L} \quad (2.10)$$

Shot bruit :

$$\langle I_{Shot}^2 \rangle = 2eB\mathcal{R} \left( \frac{P_{sr}(W-2)}{l} \right) \quad (2.11)$$

Bruit de puissance

$$\langle I^2 \rangle = 2eB\mathcal{R} \left[ \frac{P_{sr}(W-2)}{l} \right] + \frac{4K_b T_n B}{R_L} \quad (2.12)$$

La probabilité de bit envoie un seul utilisateur :

$$SNR = \frac{\left( \frac{\mathcal{R}P_{sr}(W-2)}{L} \right)^2}{eB\mathcal{R} \left[ \frac{P_{sr}(W-2)}{L} \right] + \frac{4K_b T_n B}{R_L}} \quad (2.13)$$

Le TEB peut être exprimé comme :

$$TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{SNR}{8}} \right) \quad (2.14)$$

## 2.6 Les propriétés des codes utilisés en SAC-OCDMA

Pour réduire IAM et PIIN, il existe de nombreux codes pour le système optique SAC-OCDMA avec des codes de meilleure propriété d'auto/inter-corrélation.

Il y a trois conditions nécessaires qu'une famille de code doit respecter pour pouvoir être utilisée dans un système SAC-OCDMA :

1. *Une longueur  $L$  (du code) constante pour tous les codes de la famille.*
2. *Un poids  $W$  (nombre des '1' dans chaque code) constant.*
3. *Avoir une inter-corrélation  $\lambda_c$  constante entre chaque deux séquences des codes de la famille.*

Nous présentons dans ce chapitre quelques familles de codes EDW et MD.

### 2.6.1 Construction de codes

#### 2.6.1.1 Construction de code multi diagonale MD

Un code MD est conçu sur la base d'une combinaison de matrices diagonales. Ce code présente les avantages suivants [72] :

- ✓ Le code doit être unique pour chaque utilisateur.
- ✓ Pas de chevauchement de bit '1' entre les utilisateurs. Si le nombre d'utilisateurs augment la valeur d'intercorrélacion sera maintenu '0'.
- ✓ Le nombre d'utilisateurs et le poids sont également flexibles et peut être facilement augmentés.
- ✓ Le code doit être pratique et mis en œuvre à l'aide des dispositifs optique.

#### 2.6.1.2 Conception du code MD

Le code MD se caractérise par les paramètres  $N$ ,  $W$  et  $\lambda_c$ , où  $N$  est la longueur du code (c.-à-d., le nombre total de chips),  $W$  le poids de code, et  $\lambda_c$  la phase de corrélation croisée.

Maintenant, nous formulons le théorème de corrélation croisée. Tout d'abord nous allons introduire, comme d'habitude dans l'algèbre lin-oreille, l'identité (ou unité) matrice de taille  $N$  comme une matrice  $N$  par  $N$  carré avec des composants de l'unité sur sa diagonale principale et



composantes nulles ailleurs. Elle est notée comme  $I_N$ , ou tout simplement, si la taille est sans importance. Finalement, il peut être défini comme suit [72] :

$$I_1[1], I_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \dots, I_N \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

En utilisant une notation utilisée parfois pour décrire de façon concise des matrices diagonales, nous pouvons écrire  $I_N = \text{diag}(1, 1, \dots, 1)$ . La matrice orthogonale représente une matrice carrée avec des entrées réelles dont colonnes et les lignes sont des vecteurs unitaires orthogonaux. En d'autres termes, une matrice  $A$  est orthogonale si sa transposée est égale à son inverse :  $A^T A = A A^T = I$

Maintenant, le théorème de corrélation croisée indique que certains ensembles de séquences complémentaires ont fonctions de corrélation croisée qui résument à zéro en utilisant toutes les permutations par paires. Ici, toute croisée les permutations de la fonction de corrélation sont nécessaires pour que leur somme soit égale à zéro de façon identique.

Donc, si  $X_{ij}$  est une entrée de  $X$  et  $Y_{ij}$  est une entrée de  $Y$ , une entrée du produit  $C =$

$XY$  est  $N$  donnée par  $C_{ij} = \sum_{k=1}^N x_{ik} y_{kj}$  Pour le code des séquences  $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  et

$Y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ , la fonction de corrélation croisée peut être représenté par  $\lambda_c = \sum_{i=1}^N x_i y_i$

Quand  $\lambda_c = 0$ , il est considéré que le code possède zéro propriété de corrélation croisée. La matrice de Code MD représente une matrice  $K \times N$  selon fonctionnellement sur le nombre d'utilisateurs  $K$ , et le poids du code  $W$ . Pour le code MD, le choix de la valeur de poids est gratuit, mais il devrait être supérieur à l'unité ( $W > 1$ ). Les étapes suivantes expliquent comment le code MD est construit [72].

### Étape 1

Tout d'abord, commençant par la construire d'une séquence de matrices diagonales en utilisant des valeurs spécifiques de la  $W$  de poids et le nombre d'abonnés  $K$ . Selon ces valeurs, nous avons l'ensemble  $i, j_w$ . Ici,  $K$  et  $W$  sont des nombres entiers positifs, de sorte que ( $i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$  et  $n = K$ ) sont définis par le nombre de rangées dans chaque matrice, et ( $j_w = 1, 2, 3, 4, \dots, w$ ) représentent le nombre de matrices diagonales.

### Étape 2

Les séquences MD sont calculées pour chaque matrice diagonale basée sur les relations

$$S_{i,j_w} \begin{cases} (i_n + 1 - 1), \text{ pour } j_w = \text{even} \\ i \quad \text{pour } j_w = \text{odd} \end{cases}$$

$$S_{i,1} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ K \end{bmatrix}, S_{i,2} \begin{bmatrix} K \\ \vdots \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}, S_{i,3} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ K \end{bmatrix}, \dots, S_{i,w} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ K \end{bmatrix}$$

Il est évident que  $T_{i,1} = [S_{i,1}]_{k \times k}, T_{i,2} = [S_{i,2}]_{k \times k}, T_{i,w} = [S_{i,w}]_{k \times k}$  Par Conséquent, nous obtenons.

$$T_{i,1} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{k \times k}, T_{i,2} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{k \times k}, T_{i,w} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{k \times k}$$

### Étape 3

La combinaison totale des matrices diagonaux données par Eq. (II-7) représente le code MD comme matrice  $K \times N$  :

$$MD = [T_{i,1} T_{i,2}; \dots \dots; T_{i,w}]_{K \times k}$$

$$MD = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,n} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & \dots & a_{3,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{in,1} & a_{in,2} & \dots & a_{in,n} \end{bmatrix}_{k \times k}$$

Dans la matrice de base donnée par l'équation. (II-9), les lignes déterminent le nombre d'utilisateurs. [14] Notez que l'association entre le poids de code, la longueur de code et le nombre d'abonnés peut être exprimée comme  $N=k \times w$

Afin de générer la famille de code MD selon les étapes précédentes, laissez-nous mettre, à titre d'exemple,  $K = 4$  et  $W = 3$ . Ensuite,  $i = 1,2,3,4$  ;  $i_{n+1} = 5$ , et  $j_w = 1,2,3$ . Les matrices diagonales peuvent être.

$$S_{i,1} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}, S_{i,2} \begin{bmatrix} 5 \\ 4 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}, S_{i,3} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}, S_{i,4} \begin{bmatrix} 5 \\ 4 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

La séquence de code MD pour chacune des matrices diagonales est définie par

$$T_{i,1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} k * k, T_{i,2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} k * k \quad K=5$$

Finalement le matrix de MD code complètement avec combinaison de  $T_{i,1}$  et  $T_{i,2}$  :

$$MD = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} 5 * 10$$

Avec  $K=5$ ,  $N=10$

$$user1 \Rightarrow \lambda_1, \lambda_{10}$$

$$user 2 \Rightarrow \lambda_2, \lambda_9$$

$$user 3 \Rightarrow \lambda_3, \lambda_8$$

$$user 4 \Rightarrow \lambda_4, \lambda_7$$

$$user5 \Rightarrow \lambda_5, \lambda_6$$

La conception du code MD illustre le fait que l'évolution des composants de la matrice dans la même partie diagonale se traduirait par la variable zéro corrélation croisée. Voilà pourquoi il est construit avec zéro propriété de corrélation croisée, qui annulent l'AMI. Le code MD offre une plus grande flexibilité dans le choix des paramètres  $W$  et  $K$  et, en même temps que la conception simple, ce qui peut donner à un plus grand nombre d'utilisateurs, si on les compare avec les autres codes comme ceux MAC et RD. En outre, il n'y a pas de chevauchement entre symbole pour les différents utilisateurs.

### 2.6.2 Structure de code EDW

L'algorithme de construction de code généralisé est expliqué au-dessous de. La section est divisée en 2 sous-sections 2.1 explique l'algorithme de construction de code. 2.2 contient la construction du code exemples de poids pairs [73].

### 2.6.2.1 Algorithme de génération de EDW :

La valeur de poids (W) et le nombre d'utilisateurs (N) sont choisis. La longueur du code est donnée par  $L = N * (W-1)$  pour W et N. La matrice de base (M) de taille  $2 * (W-1)$  est construite

$$\text{comme suit. } M = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{w-2}{2} \right] 0_s & \left[ \frac{w+1}{2} \right] 1_s \\ \left[ \frac{w}{2} \right] 1_s & \left[ \frac{w-1}{2} \right] 0_s \end{bmatrix} 2 * (w - 1)$$

L'ensemble de codes complet est représenté par la matrice U de taille  $N * L$  pour N utilisateurs. La construction de U comporte 3 étapes dans les quelles un la matrice intermédiaire U est d'abord construite. M est répété N -1 fois en U' comme indiqué ci-dessous.

$$U' = \begin{bmatrix} R1 & .. & .. & .. & .. & .. \\ R2 & R1 & . & . & . & . \\ . & R2 & R1 & . & . & . \\ . & . & R2 & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & .. & R1 & . \\ . & . & . & . & R2 & . \end{bmatrix}$$

Pour remplir complètement toutes les colonnes, les lignes de base de la matrice R1 et R2 sont ajouté à la dernière ligne et à la première ligne de la dernière colonne de la matrice U comme indiqué ci-dessous.

$$U'' = \begin{bmatrix} R1 & \dots & \dots & \dots & R2 \\ R2 & R1 & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & R2 & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & R1 & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & R2 & R1 \end{bmatrix} N * L$$

Le jeu de codes complet est obtenu en remplissant les espaces vides dans U'' avec des zéros.

$$U'' = \begin{bmatrix} R1 & 0 & 0 & \dots & R2 \\ R2 & R1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R2 & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & R1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & R2 & R1 \end{bmatrix} N * L$$

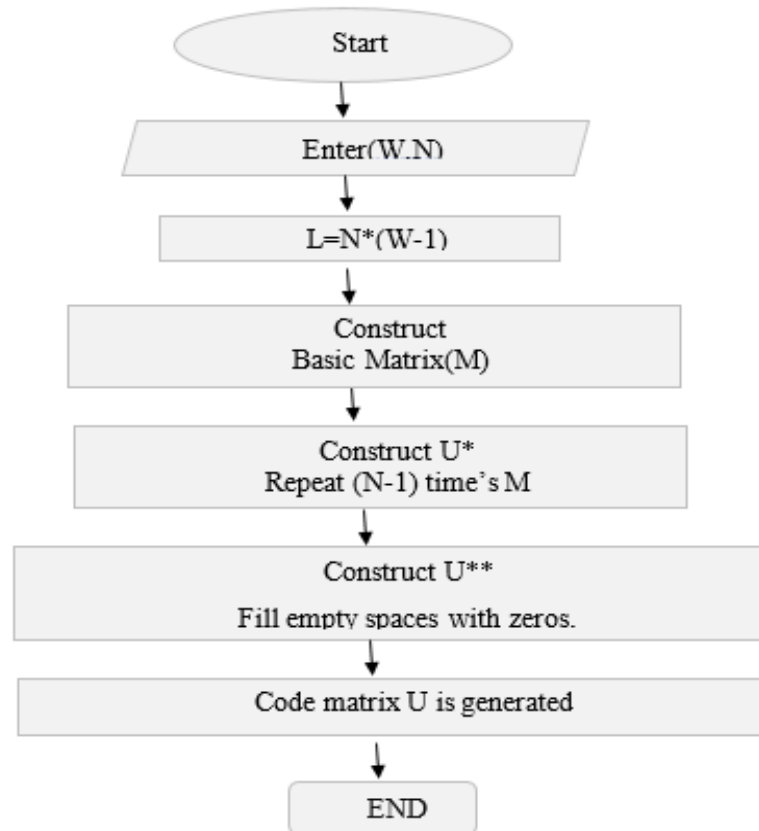
L'algorithme est défini comme suit :

Choisissez W ; N et calculez la longueur du code L.

Construire M selon Eq. (1).

Répétez-M ''en U' conformément à l'équation. (2).

R1 et R2 sont ajoutés à U selon Eq. (3) et des places vides en U'' sont remplis de zéros pour terminer la construction du code pour tous les utilisateurs



**Figure2.23** : L'organigramme de l'algorithme EDW[53]

**Exemple de construction des codes :**

Poids  $W = 3$

**Étape 1 :** Laisser le nombre d'utilisateurs  $N=4$ . La longueur du code est calculée en tant que  $L=N*(W-1) = 4*(2) = 8$ .

**Étape 2 :** La taille de la matrice est définie à  $2*(3-1) = 2*2$ . Matrix est créé en tant que :

$$M = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{3-2}{2} \right] 0_s & \left[ \frac{3+1}{2} \right] 1_s \\ \left[ \frac{3}{2} \right] 1_s & \left[ \frac{3-1}{2} \right] 0_s \end{bmatrix} 2 * 2$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} 2*2$$

**Étape 3 :** M répété 3 fois

$$U' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 1 & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & 0 & 1 & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix} N * L$$

**Étape 4 :** La rangée supérieure R1 de la matrice et la rangée inférieure R2 sont placées en dernier et première rangée de la dernière colonne, respectivement

$$U' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & 0 & 1 & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} 4 * 8$$

Les places restantes sont remplies de zéros.

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} 4 * 8$$

*user 1*  $\Rightarrow \lambda_{1,2}, \lambda_7$

*user 2*  $\Rightarrow \lambda_1, \lambda_3, \lambda_4$

*user 3*  $\Rightarrow \lambda_3, \lambda_5, \lambda_6$

*user 4*  $\Rightarrow \lambda_5, \lambda_7, \lambda_8$

### 2.6.3 Système SAC-OCDMA avec les codes

Le schéma du système SAC – OCDMA est présenté sur la Figure 2.24. Elle contient d'une source de lumière, d'un codeur, d'un modulateur et de données d'utilisateur au moment de la transmission.

Les longueurs d'onde sont sélectionnées en fonction du code à transmis sur le canal. Ces signaux sont modulés par Mach Zehnder Modulator (MZM) en fonction des données fournies. Codes de différents utilisateurs sont combinés avant leur lancement sur le canal.

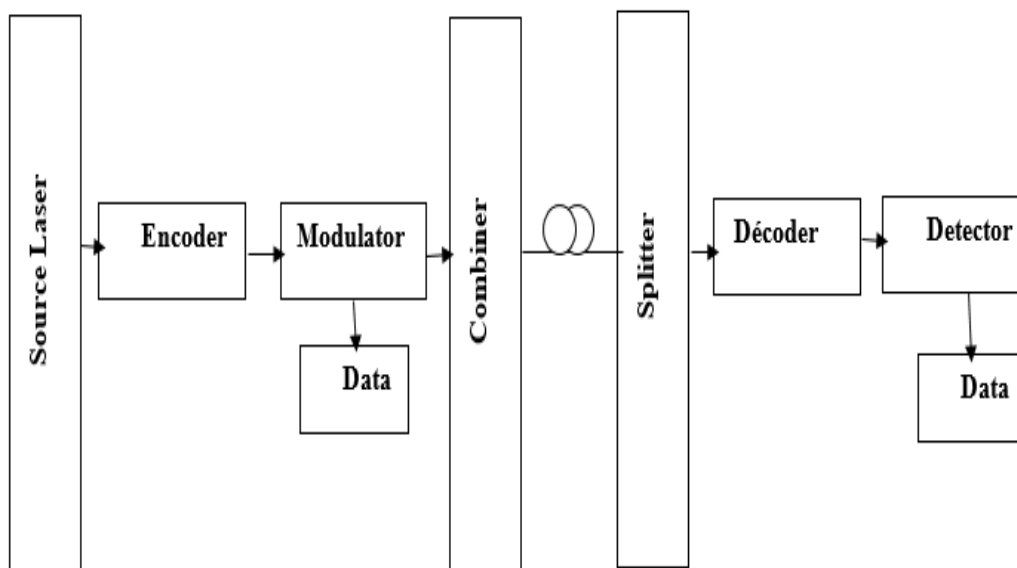
Au récepteur, le signal reçu se divise en deux bras. La partie supérieure le bras du décodeur utilise la même structure de longueur d'onde que celle de l'encodeur. Dans le bras inférieur du

décodeur, la structure en longueur d'onde est donnée en fonction de la somme binaire des colonnes de la matrice U.

Pour un exemple de poids,  $W = 3$  et de nombre d'utilisateurs,  $N = 3$ ; U la matrice est donnée comme

$$\begin{array}{r}
 \text{Wavelengths } \lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4 \quad \lambda_5 \\
 \text{user1} \\
 \text{user2} \\
 \text{user3} \\
 \text{---} \\
 \text{sum}
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1
 \end{bmatrix}$$

La somme binaire de toutes les colonnes de la matrice U donne W-2 non chevauchement des longueurs d'ondes pour chaque utilisateur. Le non-chevauchement longueurs d'onde qui ne sont pas présentes chez l'utilisateur souhaité sont utilisées pour éliminer le MAI.



**Figure2.24:** block Diagram SAC-OCDMA [53]

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, la technique d'accès multiple par repartitions de code optique particulièrement le système à encodage spectral en amplitude SAC-OCDMA. Ce système est présente plusieurs avantages, tels que la flexibilité de l'attribution de canal, la capacité à fonctionner de manière asynchrone, l'amélioration de la confidentialité et l'incrément

de capacité du réseau. Les codes EDW et MD sont utilisés avec la technique de détection directe. Dans le système SAC-OCDMA, un modulateur optique externe est utilisé pour moduler la séquence de code avec des données. Les données sont un signal numérique unipolaire indépendant. Le modulateur de Mach-Zehnder (MZM) est utilisé et la combinaison de séquences de code modulées est transmise via la liaison en espace libre et ces séquences sont séparées par un séparateur optique situé du côté du récepteur. Les filtres passe-bande optiques sont utilisés par les codeurs et les décodeurs. Un filtre passe-bas est utilisé pour récupérer les données d'origine.



# Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les performances d'un système de communication optique SAC-OCDMA sous un canal FSO (Free Space Optical), chaque canal émet leur signal avec un débit de données de 10 Gbps. Ce système hybride est très efficace pour fournir une transmission de données à des débits élevés avec un taux d'erreur binaire très faible (BER). Les théories présentées dans les chapitres précédents nous a permis de développer une simulation introduite sous le logiciel industriel Opti-System. Nous présentons l'évaluation des performances du système SAC- OCDMA-FSO utilisant deux codes MD et EDW. Nous étudions les performances du système pour différentes configurations : systèmes hybrides mono utilisateur afin d'assurer l'opération de codage et décodage ou systèmes hybrides multi utilisateurs afin d'évaluer la distance et qualité de transmission. Dans notre mémoire, trois critères de qualité ont été utilisés pour mesurer les performances du système SAC-OCDMA/FSO : le taux d'erreur binaire (BER : Bit Error Rate), le facteur Q et le diagramme de l'œil du signal. Tout d'abord, nous commençons à présenter le modèle du système hybride sous Opti-Système. Ensuite, nous présentons les performances d'un système hybride SAC-OCDMA/FSO à haut débit en fonction des paramètres du canal FSO et le nombre des utilisateurs. Les résultats de la simulation ont été discutés dans la section 3. Ainsi que, les performances du système proposé sous conditions météorologiques ont été évaluées et analysées dans la section 4. La conclusion de nos résultats simulés est présentée à la section 5.

## 3.2 Critère de qualité de la transmission optique

Pour définir la qualité d'une transmission FSO, différents critères existent. Les trois principaux critères de qualité d'un signal transmis :

- Le taux d'erreurs binaires (BER),
- Le facteur de qualité (Q),
- Le diagramme de l'œil.

Ces trois critères sont décrits dans la suite :

### 3.2.1 Taux d'erreurs binaires

La qualité de transmission numérique binaire est intrinsèquement simple à évaluer puisqu'il suffit de comparer la séquence de symboles envoyés avec la séquence de symboles reçus, et de compter les erreurs c'est-à-dire le nombre de fois d'un « 0 » est détecté pour un symbole « 1 » émis ou vice versa. On définit alors le taux d'erreurs binaires ou Bite Error Rate en anglais (BER) correspondant au nombre d'erreurs sur le nombre de bits transmis pendant la durée de la mesure :

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

Le taux d'erreur binaire communément accepté dans le milieu des télécommunications optiques est de  $10^{-9}$ , correspondant à une erreur commise sur un milliard de bits lus. La mesure de qualité globale d'un système de canaux multiplexé en longueurs d'onde passe par la mesure du taux d'erreur de tous les canaux. Si un seul canal parmi plusieurs canaux présente des erreurs, le taux d'erreurs du système global est proche du taux d'erreurs du canal présentant des erreurs.

### 3.2.2 Facteur de qualité

Le facteur de qualité est le rapport signal sur bruit électrique en entrée du circuit de décision du récepteur. Le signal mesuré à l'entrée du canal de l'oscilloscope 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  $\mu_1$  et  $\mu_0$ . Le bruit représente les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens, il est quantifié en combinant les écarts-types  $\sigma_0$ . On définit donc le facteur Q à partir de relevé du diagramme de l'œil par :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.2)$$

Où  $\sigma_0$  et  $\sigma_1$  les variances des probabilités de puissance des symboles «1 » et «0 ». Le facteur de qualité est donc relié au taux d'erreur binaire (TEB) dans l'hypothèse où la distribution de puissance des symboles est gaussienne, par la relation suivante :

$$TEB = \frac{1}{2} \left[ \text{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (3.3)$$

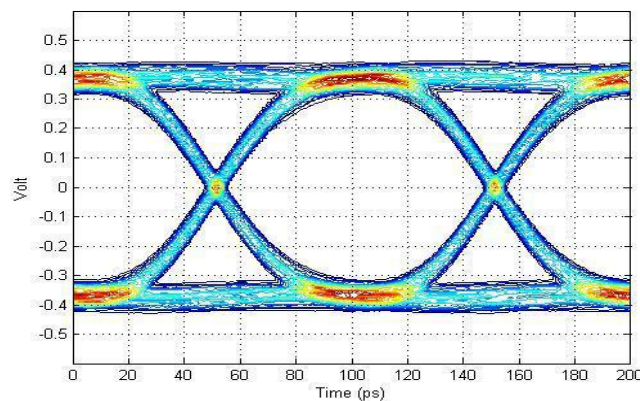
Où *erfc* est la fonction erreur complémentaire définit par :

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

Il est souvent utilisé plutôt que le taux d'erreur binaire dès lors que le taux d'erreur binaire est trop faible pour être mesuré. En effet, plus le taux d'erreur binaire est faible, plus le temps de mesure est long pour une même précision sur la mesure. Expérimentalement, le taux d'erreur binaire n'est par conséquent pas toujours mesurable directement. Le facteur de qualité est fréquemment utilisé pour quantifier la qualité d'une liaison ; un facteur de qualité de 6 correspond à un taux d'erreur binaire de  $10^{-9}$ .

### 3.2.3 Diagramme de l'œil

La façon la plus « visuelle » de juger la qualité d'un signal est d'observer le diagramme de l'œil qui représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise. Plus le signal est de mauvaise qualité, plus le diagramme de l'œil est fermé, plus le facteur de qualité est faible et ainsi plus la détection du signal sans erreur est difficile. Le diagramme de l'œil est donc un excellent moyen visuel de juger de la qualité du signal dans la limite de la réponse de la photodiode et de l'oscilloscope utilisé. (Figure 3.1).



**Figure 3.1** Diagramme de l'œil d'un signal au format NRZ.

### 3.3 Principe de fonctionnement du système hybride SAC-OCDMA/FSO

Dans le système SAC-OCDMA/FSO proposé dans notre mémoire, on montre le schéma fonctionnel du code EDW basé sur SAC-OCDMA avec la technique SDD dans le système de communication FSO. Au niveau de l'émetteur, le laser génère des sources lumineuses avec multiplexage WDM et démultiplexage WDM, afin de répartir la longueur d'onde sur chaque utilisateur. Dans cette étude, le modulateur Mach – Zehnder est utilisé. Ensuite, les séquences de code modulées sont combinées et transmises via le lien FSO. Au niveau du récepteur, un séparateur optique est utilisé pour séparer les différentes séquences de code modulées. Le décodeur basé sur la technique SDD ne filtrera que les longueurs d'ondes ne

se chevauchant pas. La longueur d'ondes superposée sera éliminée car elle pourrait provoquer des interférences au niveau du récepteur. Ensuite, le signal décodé est détecté par le photodétecteur. Afin de récupérer les données d'origine transmises, le signal entrant est filtré à l'aide d'un filtre passe-bas (LPF). Dans cette étude, les filtres passe-bande optiques sont utilisés comme codeurs et décodeurs. Les photodiodes sont utilisées pour détecter le signal optique filtré. Un soustracteur électrique entre les deux bras est utilisé pour annuler le MAI.

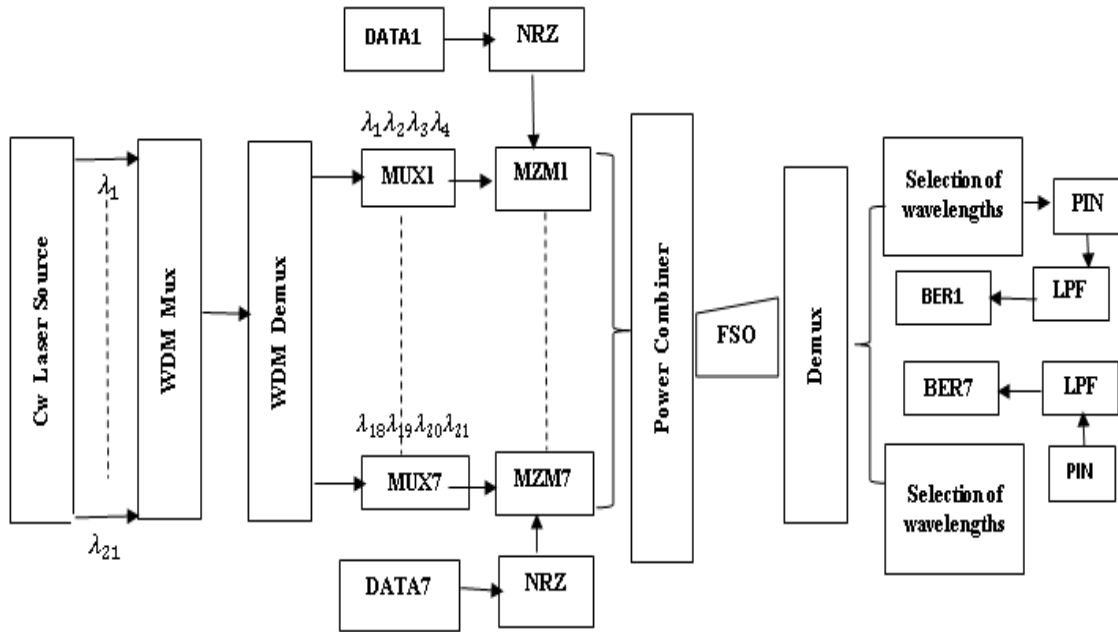
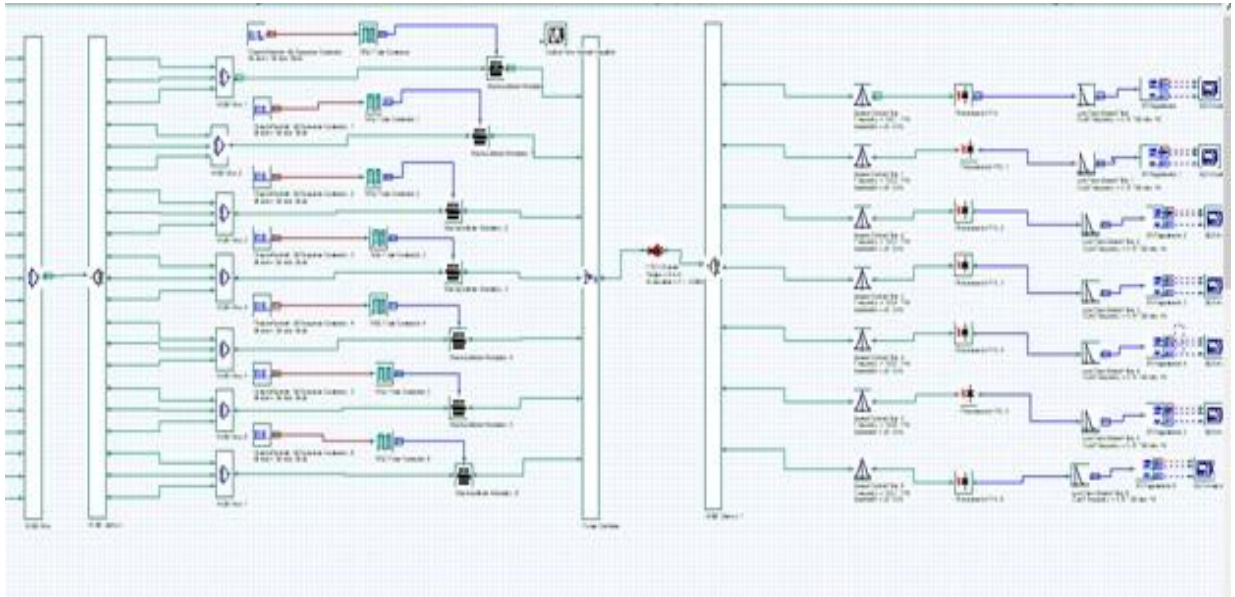


Figure 3.2 : Block diagramme de simulation SAC-OCDMA/FSO

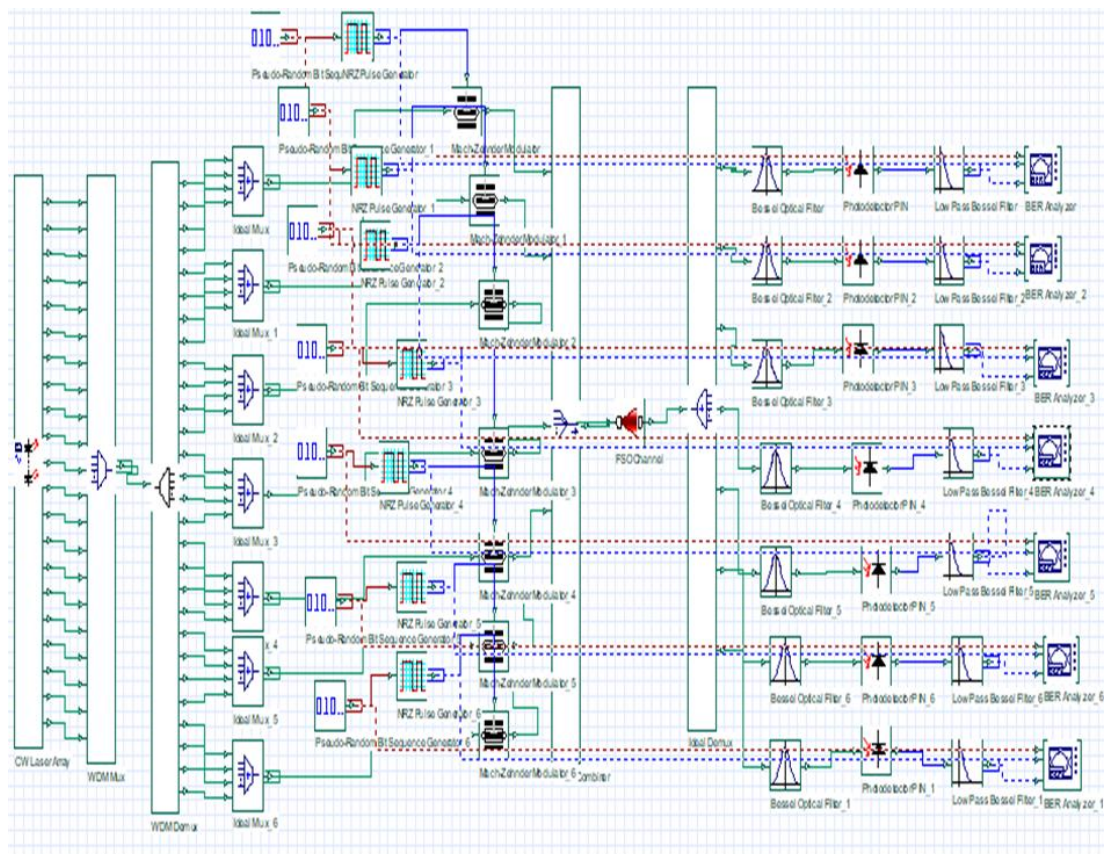
### 3.4 Modèle du système SAC-OCDMA/FSO sous Opti-System

Dans cette partie, nous présentons l'architecture du système SAC-OCDMA/FSO que nous avons simulé dans le but d'améliorer leur performance, pour 7 utilisateurs actifs utilisant deux types de codes (MD, EDW). Système FSO compose paramètre de l'angle ouverture et divergence d'ouverture.

Le schéma ci-dessous représente le modèle du système SAC-OCDMA/FSO sous le logiciel Optisystem. Ce système hybride est modélisé pour les deux codes MD et EDW.



**Figure 3.3:** Modèle du système SAC-OCDMA/FSO utilisant le code MD sous Optisystem (nombre d'utilisateur N=7).



**Figure 3.4:** Modèle du système SAC-OCDMA/FSO utilisant le code EDW sous Optisystem (nombre d'utilisateur N=7).

### 3.4.1 Partie d'émission

Le rôle de l'émetteur consiste à délivrer à la fibre un signal optique modulé, sur lequel sont inscrites les données électriques binaires, il est donné par la figure suivante.

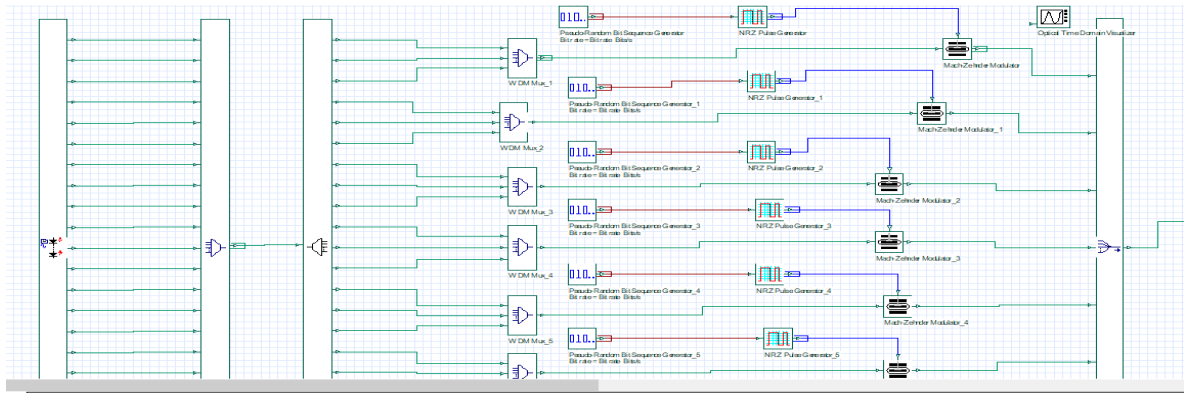


Figure 3.5: Bloc d'émission pour chaque utilisateur d'un système SAC-OCDMA/FSO

### Source de la lumière large bande

Une source de lumière large bande est une source d'émission incohérente dont ces caractéristiques sont représentées dans le tableau 3.1 :

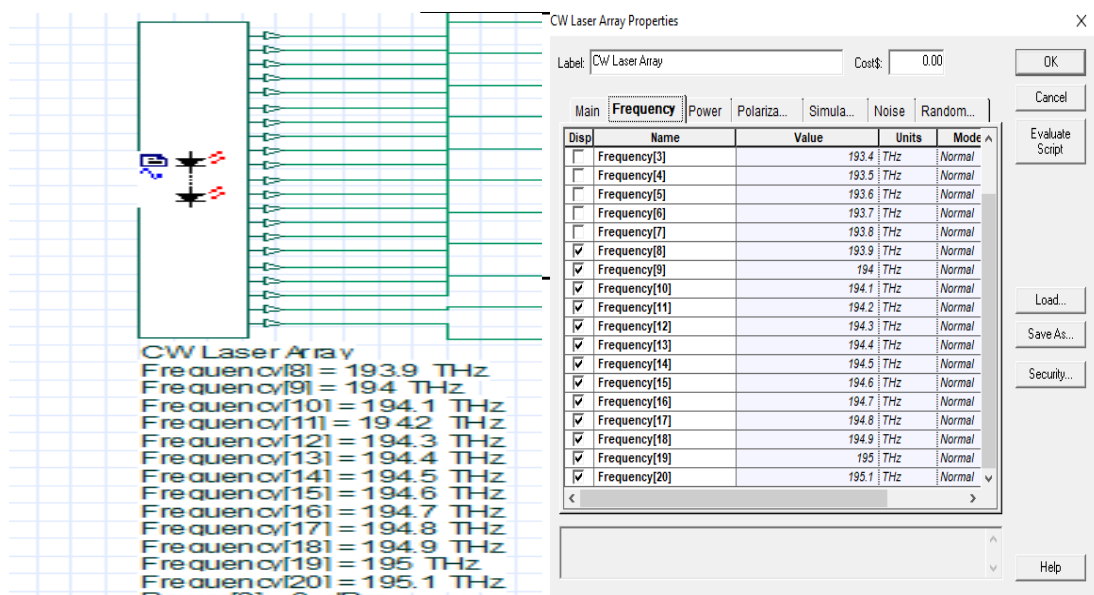
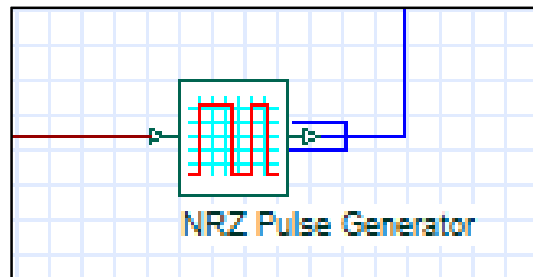


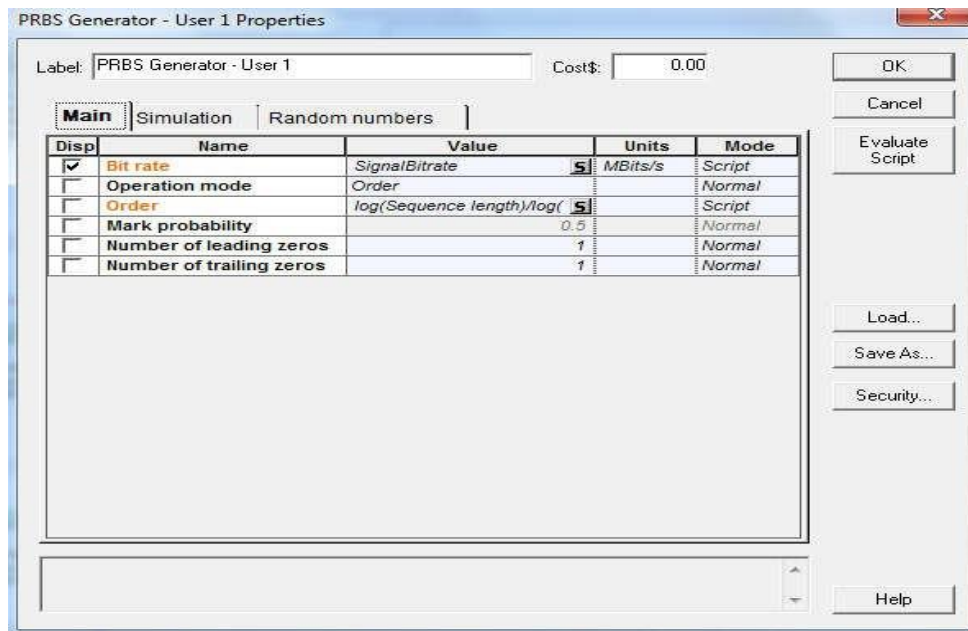
Figure 3.6: modèle de la source de lumière large bande.

### Générateur d'impulsion NRZ

Un générateur de séquence binaire pseudo- aléatoire de type non-retour à zéro (NRZ) est utilisé dans notre travail. Pour ce générateur, le bit « 1 » est représenté par un état significatif (tension positive), et le bit « 0 » par un autre état significatif (tension négative), il n'existe pas d'état intermédiaire



**Figure3.7 :** modèle de simulation de générateur d'impulsion.



**Figure 3.8:** Paramètres du générateur pour chaque utilisateur.

**Modulateur Mach Zehnder**

Le Mach-Zehnder permet de moduler le courant électrique représentant la séquence de données sur une puissance optique de la source lumineuse.

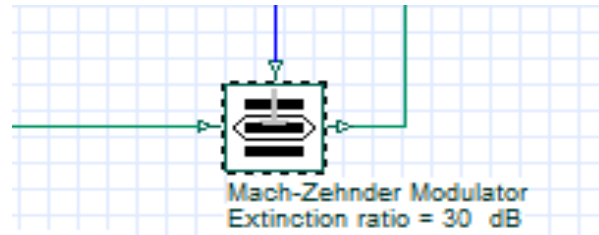


Figure 3.9 : modèle de simulation de Mach-Zehnder

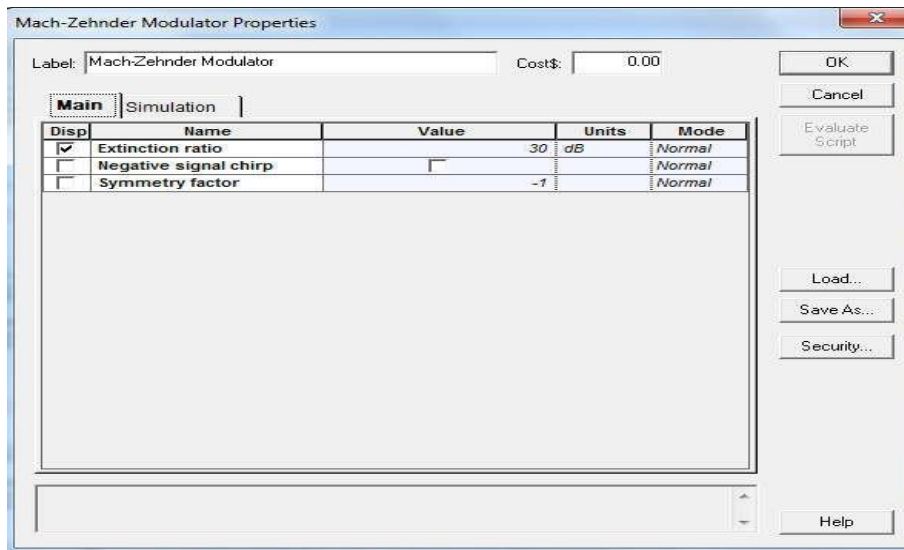


Figure 3.10: Paramètres de Modulateur de Mach-Zehnder pour chaque utilisateur

### Multiplexeur WDM

WDM sont utilisés en série pour donner les codes signatures dont ces caractéristiques sont représentées dans la figure 3.11

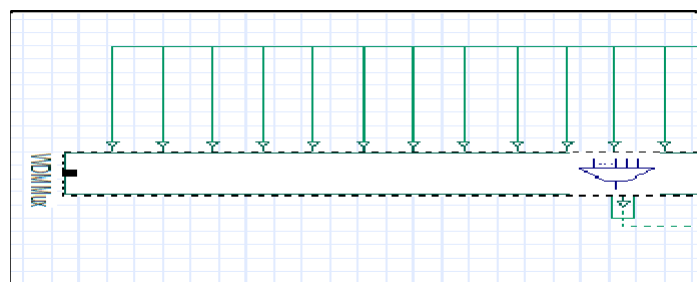
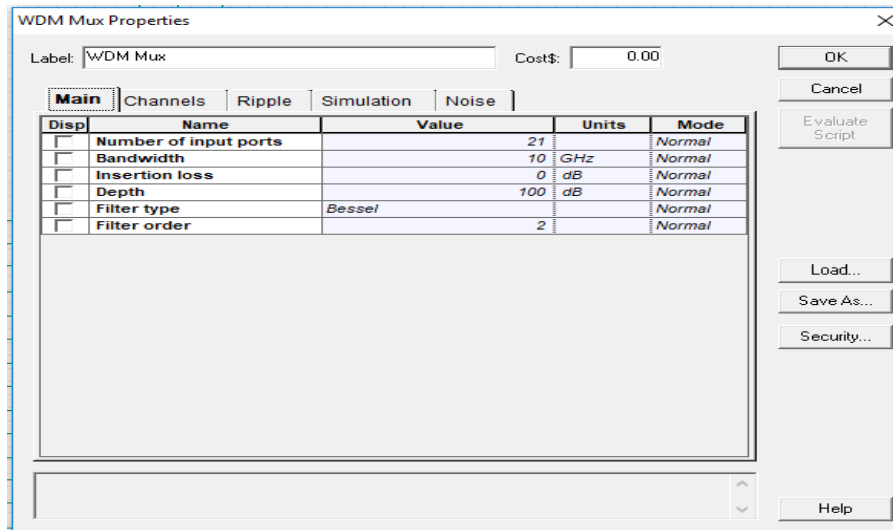


Figure 3.11: Modèle de simulation de multiplexeur WDM

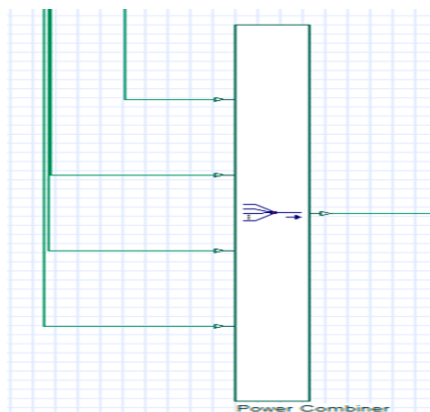




**Figure 3.12:** Paramètres de multiplexeur de WDM

### Coupleur

Le coupleur est un dispositif optique reliant une ou plusieurs entrées à une seule sortie Nx1



**Figure 3.13:** Modèle de simulation de coupleur.

### Canal de transmission

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

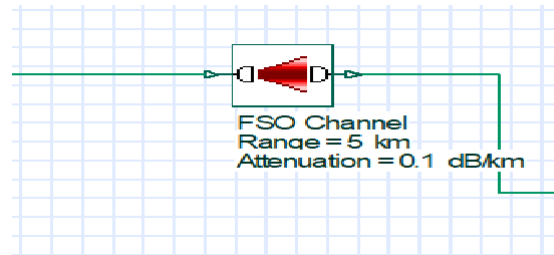


Figure 3.14: Modèle de simulation du canal FSO.

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Range	100	m	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	330.6183	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Geometrical loss	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter aperture diam	5	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver aperture diamete	20	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Beam divergence	1	mrad	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Additional losses	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Propagation delay	0	ps/km	Normal

Tableau 3.1 : Paramètres de canal FSO

### 3.4.2 Partie de réception

Le rôle de récepteur consiste à filtrer les fréquences optiques et détecter le signal optique et la convertie aux données électriques binaires, il est donné par la figure3.15.

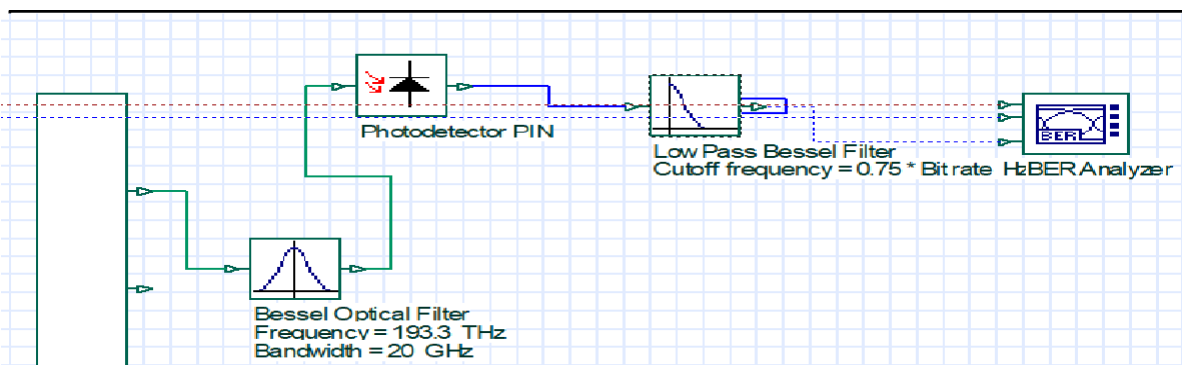
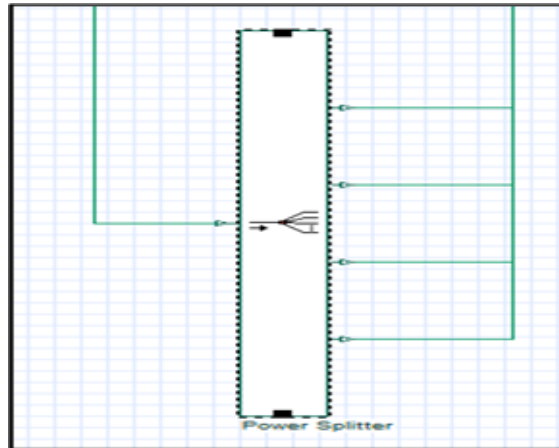


Figure 3.15: Modèle de simulation de la partie de réception.

### Splitter

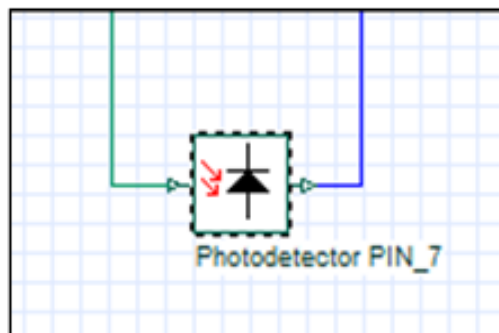
Le splitter est un dispositif optique qui permet de diviser ou séparer un signal on plusieurs signaux 1xN.



**Figure 3.16 :** Modèle de simulation de Splitter.

### Photodétecteur

Le photodétecteur est un dispositif qui transforme la lumière qu'il absorbe en une grandeur mesurable généralement un courant électrique ou une tension électrique. Le type de photodétecteur utilisé est une photodiode PIN dont ces caractéristiques sont représentées dans le tableau 3.2.



**Figure 3.17:** Modèle de simulation de photodétecteur.

<b>Sensibilité</b>	<b>1 A/W</b>
<b>Courant d'obscurité</b>	<b>10 na</b>
<b>Longueur d'onde centrale</b>	<b>1550.5</b>
<b>Bruit signal ASE</b>	<b>Oui</b>
<b>Bruit thermique</b>	<b><math>10^{23}</math> W/Hz</b>

**Tableau 3.2 :** Paramétré de photo diode

### Filtre passe bas

Le filtre passe-bas est utilisé pour rejeter le bruit et les interférences composants qui se situent en dehors des informations du spectre du signal et sa fréquence de coupure est de  $0,65 \times$  débit binaire.

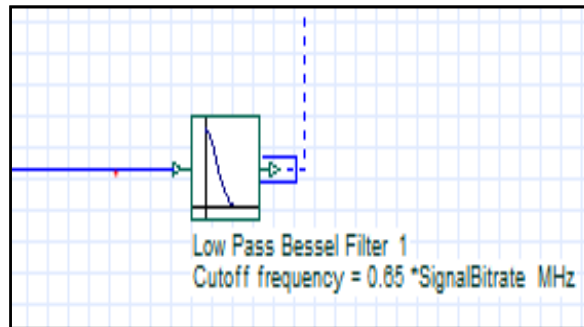


Figure 3.18: Modèle de simulation de filtre

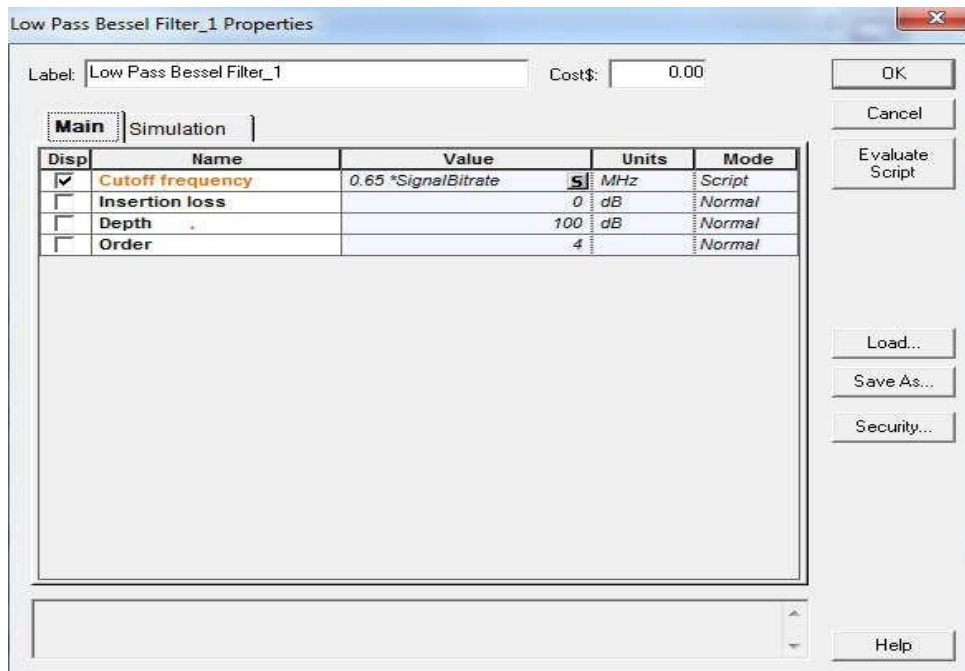


Figure 3.19: Caractéristiques de filtre passe bas pour chaque utilisateur.

### 3.4.3 Paramètres de la simulation

Les paramètres et les valeurs utilisés dans notre mémoire pour l'étude des performances du système FSO (Free-Space-Optic) sont répertoriés dans les tableaux suivants :

Paramètre	Valeur
Intervalle Longueur d'onde	Band -C
Débit	10 Gbit/s
Diamètre d'ouverture d'émetteur FSO	5cm
Diamètre d'ouverture de récepteur FSO	20cm
Angle de divergence	1mrad
Distance de la liaison FSO	[1-10] Km
Atténuation	[0.244-330] dBm/Km
Nombre de Utilisateur	7
Poids du code MD	3
Longueur du code MD	21
Poids du code EDW	4
Longueur du code EDW	21

**Tableau 3.3:** Paramètres des composants utilisés dans la simulation.

### 3.5 Génération des codes sous Opti-System

Pour obtenir les quatre premières signatures, une à chaque utilisateur, nous avons utilisé 7 multiplexeurs WDM, ayant la même bande passante et des MUX différentes. Les Sète WDM, connectés en série, sont utilisés pour obtenir le code signature de chaque usager suivant le code montré dans le tableau 3.5 3.6. Les signaux modulés à la sortie des modulateurs optiques sont combinés à l'aide d'un coupleur optique (7x1) dont la sortie est couplée avec le system FSO pour implémenter le code MD, chaque utilisateur prend 3 poids (1) et l'autre (0). Alors que pour le code EDW chaque utilisateur prend 2 longueurs d'ondes pour chaque utilisateur. Ensuite toutes les longueurs d'ondes sont combinées par le composant combineur de puissance et ensuite ils sont transmis dans le canal de transmission (FSO).

La puissance optique à la sortie du canal de transmission est divisée en Sète puissances à l'aide d'un coupleur optique de type diviseur optique (1x7). Le signal optique de chaque utilisateur est par la suite divisé en 7 composantes à l'aide d'un diviseur optique (1x7). La composante du bras supérieur est filtrée à travers un décodeur direct qui est le même codeur utilisé au niveau de l'émetteur. Alors que, la composante du bras inférieur est filtrée à travers son décodeur complémentaire. La sortie du décodeur (code et conjugué) est détectée par deux photodiodes connectées dans une structure équilibrée. Le signal résultant de ces deux détecteurs est filtré par un filtre passe-bas, et ensuite appliqué à la partie numérique du récepteur pour

extraire les données. Le filtre électrique passe-bas est utilisé pour rejeter le bruit et les interférences composantes situent en dehors des informations du spectre du signal.

Utilisateur	Code
1	100000000000011000000
2	010000000000100100000
3	001000000001000010000
4	000100000010000001000
5	000010000100000000100
6	000001001000000000010
7	000000110000000000001

**Tableau 3.4:**Le code MD correspond à chaque utilisateur.

Utilisateur	Code
1	0110000000000000000110
2	1100110000000000000000
3	0001100110000000000000
4	0000001100110000000000
5	0000000001100110000000
6	000000000000110011000
7	0000000000000000110011

**Tableau 3.5:** Le code EDW correspond à chaque utilisateur

### 3.6 Etude des performances du système SAC-OCDMA/FSO

Dans le système FSO, il existe de nombreuses simulations d'accès SAC-OCDMA avec le

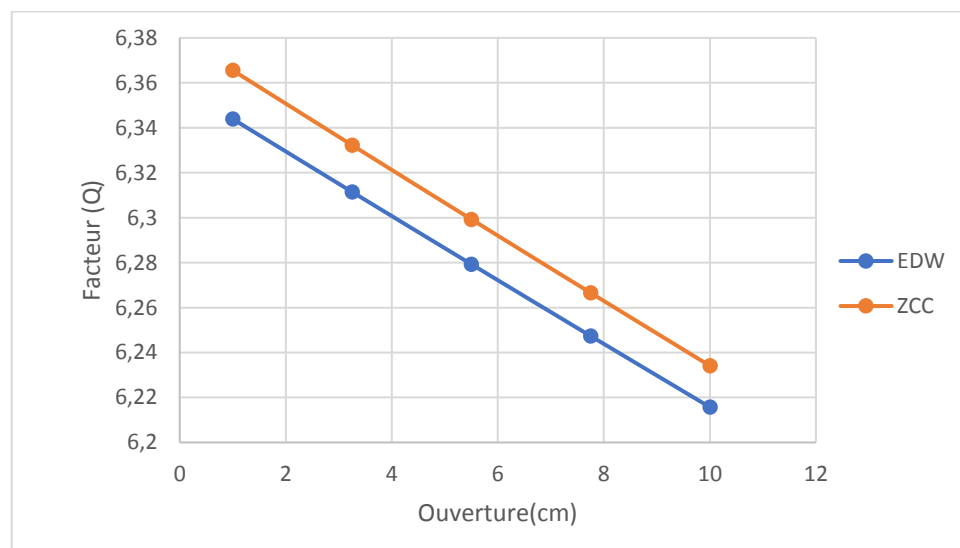
code de différence MD et EDW permettant de définir le meilleur résultat et les meilleures performances pour cette étude. Notre projet est basé sur la divergence du faisceau, le nombre d'utilisateurs, les conditions météorologiques et l'ouverture du capteur.

Conditions météorologiques	Atténuation (dBm/km)	Visibilité (m)
Clair	0.244	18100
Brume	2.6802	2800
Brouillard modéré	33.9618	500
Brouillard épais	330.6183	50

**Tableau 3.6 :** Paramètres d'atténuation.

### 3.6.1 l'influence de variation du diamètre de l'émetteur FSO

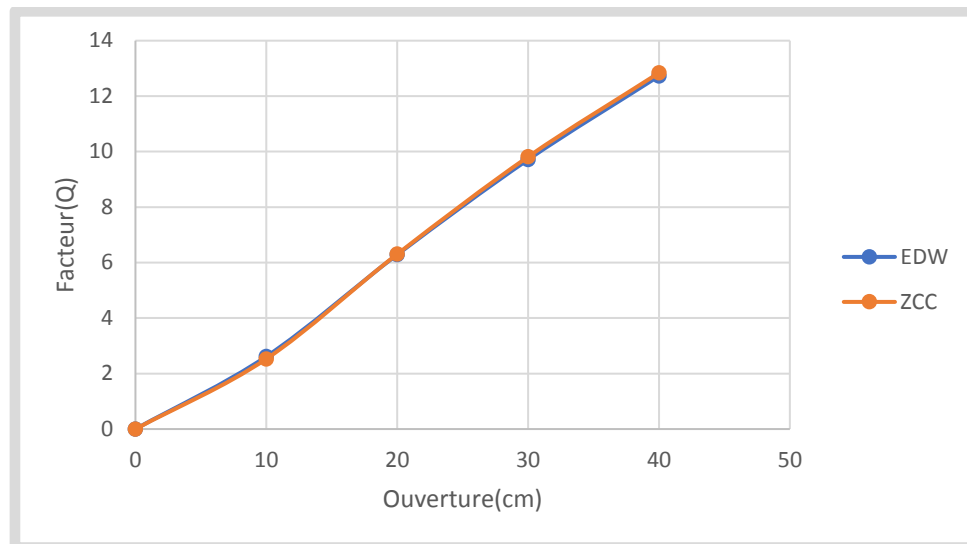
La figure 3.20 illustre les valeurs de Q en fonction du diamètre d'un émetteur FSO, avec un format de codes EDW et MD à 5 km, un débit de 10 Gbps pour chaque canal et un diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO de 7.5 cm. D'après les résultats de simulation que nous avons obtenus, on a conclu que l'augmentation de diamètre d'un émetteur FSO dégrade la performance de la liaison SAC-OCDMA/FSO. C'est-à-dire que le Q diminue et la qualité de réception des données pour chaque Utilisateur devenu mauvaise. Par exemple, pour un diamètre de 5 cm, la valeur de Q du code EDW prend 14 et pour un diamètre de 30 cm le Facteur de Q est 4.



**Figure 3.20:** Q vs diamètre d'un émetteur FSO avec un format de code EDW et MD

### 3.6.2 l'influence de variation du diamètre de l'ouverture du récepteur FSO

La figure 3.21 illustre les valeurs de Q en fonction du diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO, avec un format de codes EDW et MD à 5Km, un débit de 10 Gbps pour chaque utilisateur et un diamètre d'un émetteur FSO de 5 cm. D'après les résultats obtenus sur la figure 3.21, nous avons constaté, si on augmente le diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO, le Facteur de qualité binaire augmente et vice versa.



**Figure 3.21:** Q vs diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO avec un Codes EDW et MD

Puisque l'augmentation de diamètre d'ouverture du récepteur FSO rend le Facteur de qualité plus acceptable, donc nous avons constaté que la qualité du signal reçu au niveau de chaque récepteur est améliorée. Par exemple : avec ouverture est très grande 40 cm ,50 cm, nous obtenons les meilleurs Qualités 14 ,13.5.

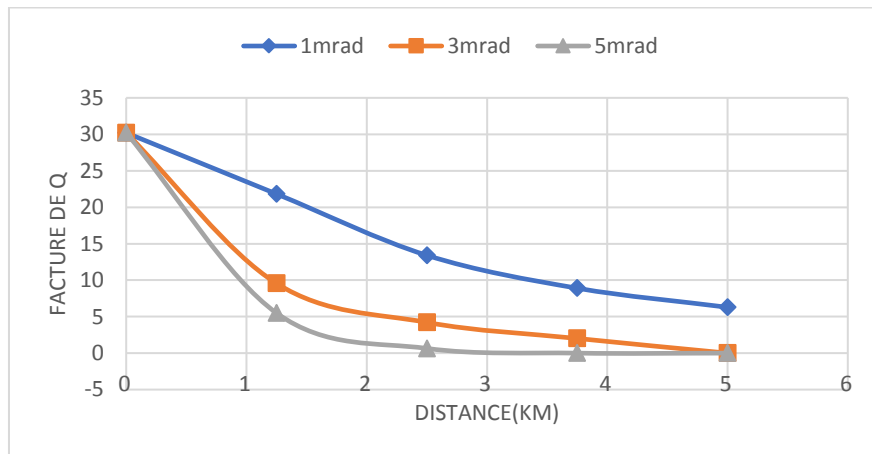
### 3.6.3 l'influence de variation de la divergence des faisceaux optiques

Dans cette partie de simulation, nous avons étudié et estimé la variation d'un paramètre très important dans les liaisons optiques FSO « la divergence d'un faisceau optique ». Cette étude est effectuée autour de la fréquence 193.1 THz (c'est-à-dire,), le débit de ce canal est de 10 Gbps et la distance de liaison SAC-OCDMA-FSO varie de 1 km jusqu'à 5 km.

La figure 3.22 présente la variation de facteur de qualité en fonction de la distance de liaison SAC-OCDMA/FSO avec différentes valeurs de divergences d'un faisceau optique pour un émetteur LASER. Pour une divergence de 1 mrad, les valeurs de Q sont obtenues comme suit :25,20 et à des distances de 1Km et 2Km, respectivement. Par contre, pour une divergence de 3 mrad, les valeurs de Q sont obtenues comme suit : 14 et 5 à des distances de 1Km et 2Km, respectivement. A partir de ces résultats, nous avons constaté qu'il y a une relation



proportionnelle entre trois métriques à savoir : le Facteur de qualité , la distance de liaison SAC-OCDMA/FSO et la divergence d'un faisceau optique pour un émetteur Aussi, nous retenons que l'augmentation de la divergence et de la distance de liaison pénalisent fortement les performances de la liaison SAC-OCDMA/FSO et cela est confirmé via les résultats obtenus facteur de qualité du signal reçu vers des récepteur (voir la figure 3.22).

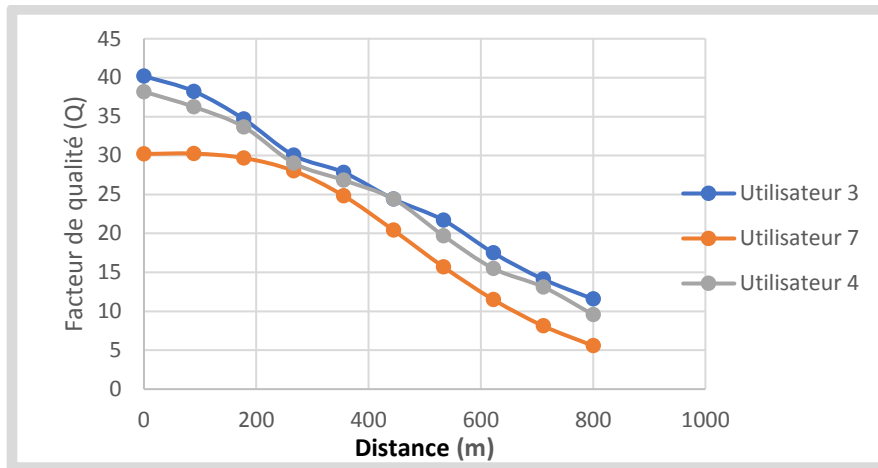


**Figure 3.22:** variation de divergence de faisceaux avec la distance de la liaison FSO.

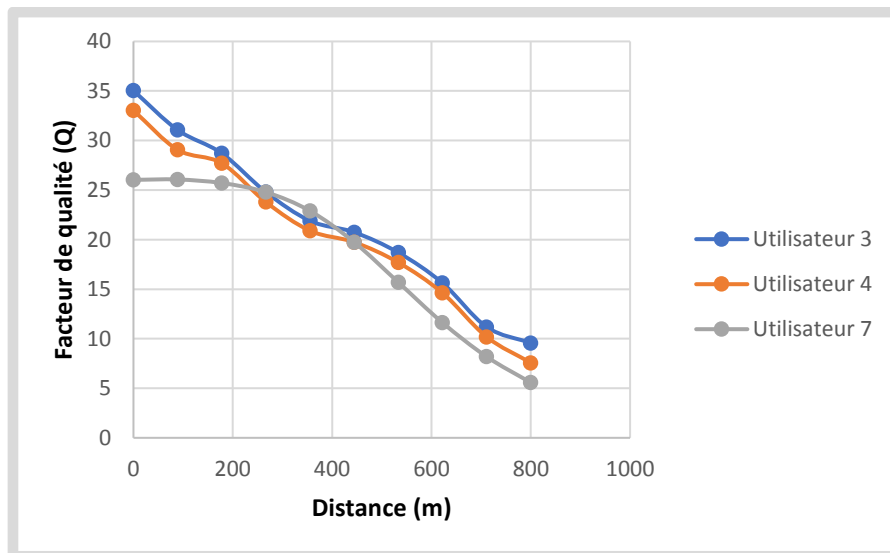
Après cette simulation, on confirme divergence de faisceaux est une importance paramétrée dans system FSO est conception le faisceaux 'étroite, large ce paramètre est relation pour qualité de system FSO comme 1 mrd faisceaux est très étroite donc propage dans espace libre et faible effectué avec la turbulence et diffusion d'atmosphère presque elle est très étroite par rapport les molécules qui existe dans l'atmosphère.

### 3.6.4 l'influence de variation de nombre des utilisateurs

Le nombre de utilisateurs est un autre paramètre qui influe sur les performances du système hybride SAC-OCDMA/FSO. Lorsque le nombre des utilisateurs augmente, le poids des codes MD et EDW augmentent ce qui influe sur la technique de détection employée dans le récepteur SAC-OCDMA/FSO.



**Figure 3.23:** l’effet de nombre des utilisateurs sur les performances du système SAC-OCDMA/FSO (EDW).



**Figure 3.24 :** l’effet de nombre des utilisateurs sur les performances du système SAC-OCDMA/FSO (MD).

D’après les résultats montrés dans les figures 3.23 et 3.24, nous observons que le nombre des utilisateurs n’influe pas sur les performances du système hybride SAC-OCDMA/FSO. Par conséquent, le système étudié dans notre travaille peut supporter plusieurs utilisateurs.

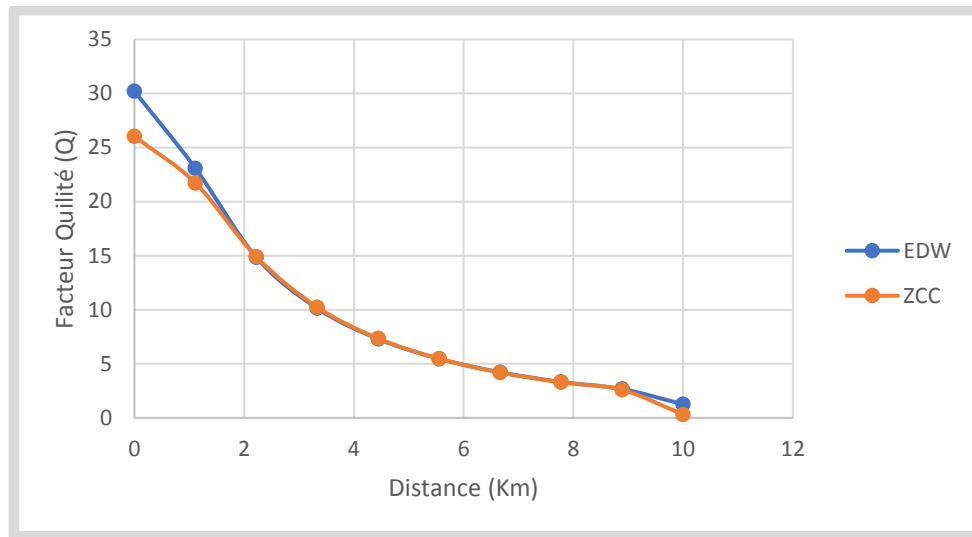
### 3.7 Performances du système SAC-OCDMA/FSO sous conditions météorologiques

La longueur de l’espace libre et les conditions météorologiques à une grande influence sur la qualité de la transmission et donc sur le facteur de qualité et le TEB. Pour cela, nous avons examiné l’influence de la longueur de distance (récepteur, émetteur) sur la performance du système étudié en fixant la puissance d’émission à 0 dBm et le débit à 10Gbits/.

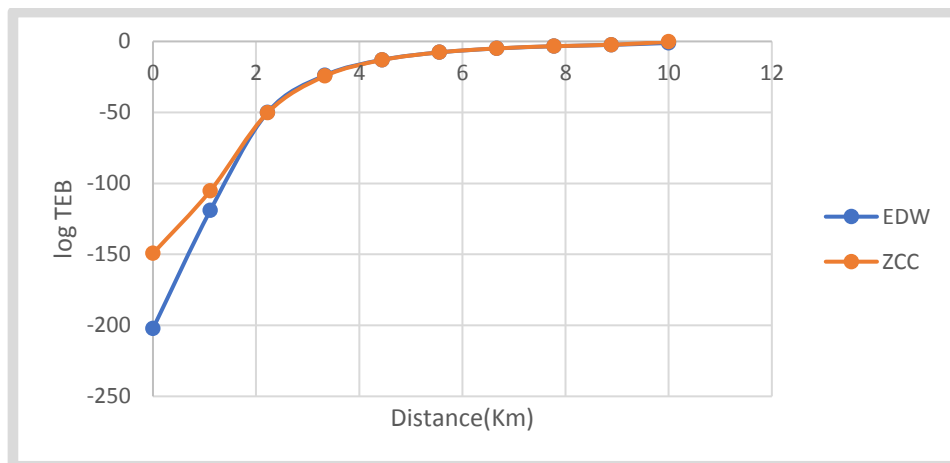
Les performances ont été étudiées pour un système SAC-OCDMA/FSO utilisant deux types de codes (ZCC et EDW) et une distance varie de 0 à 10Km.

### 3.7.1 météorologiques claire

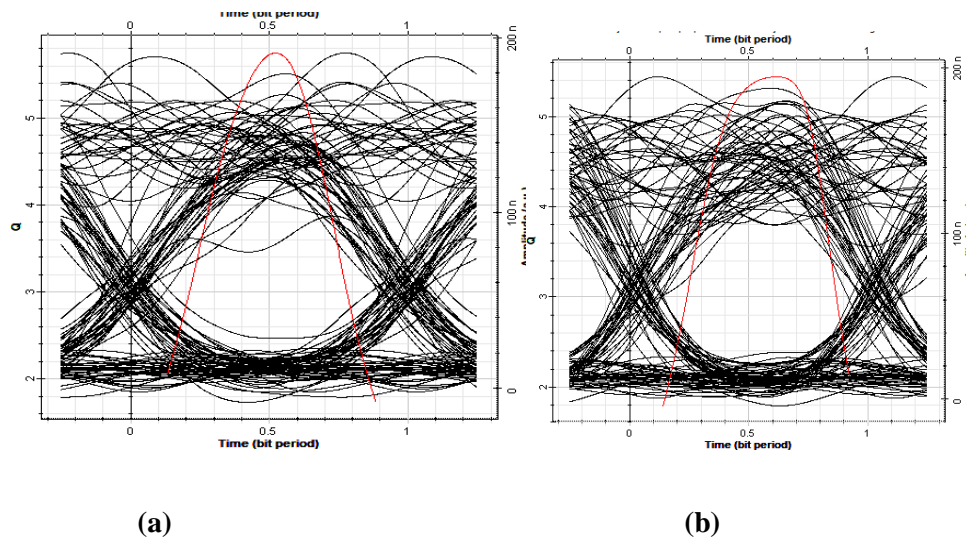
Dans cette condition l'atténuation est très faible par turbulence, diffusion, réflexion et très faible dans ce cas donc ce cas est très mirer :



**Figure 3.25:** Evolution du facteur de qualité en fonction de la distance de la liaison FSO.



**Figure 3.26:** Evolution du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la distance de la liaison FSO

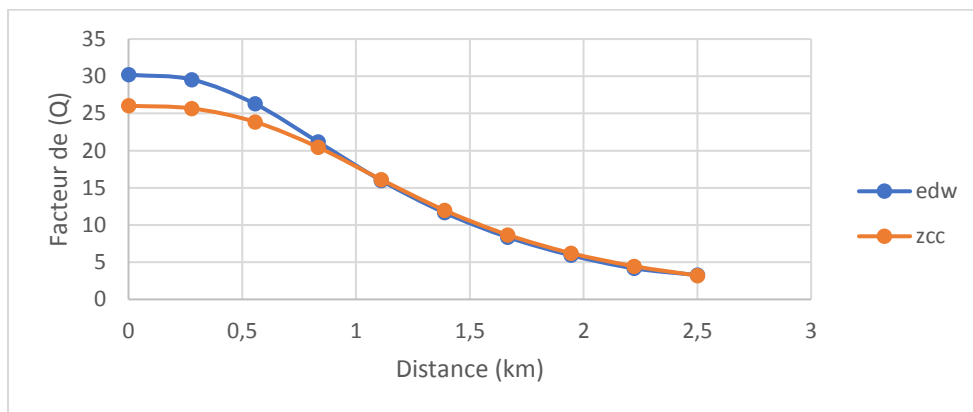


**Figure 3.27:** : Diagramme de l’œil du système SAC-OCDMA/FSO utilisant le code (a) EDW (b) MD. La distance de liaison FSO est 7Km.

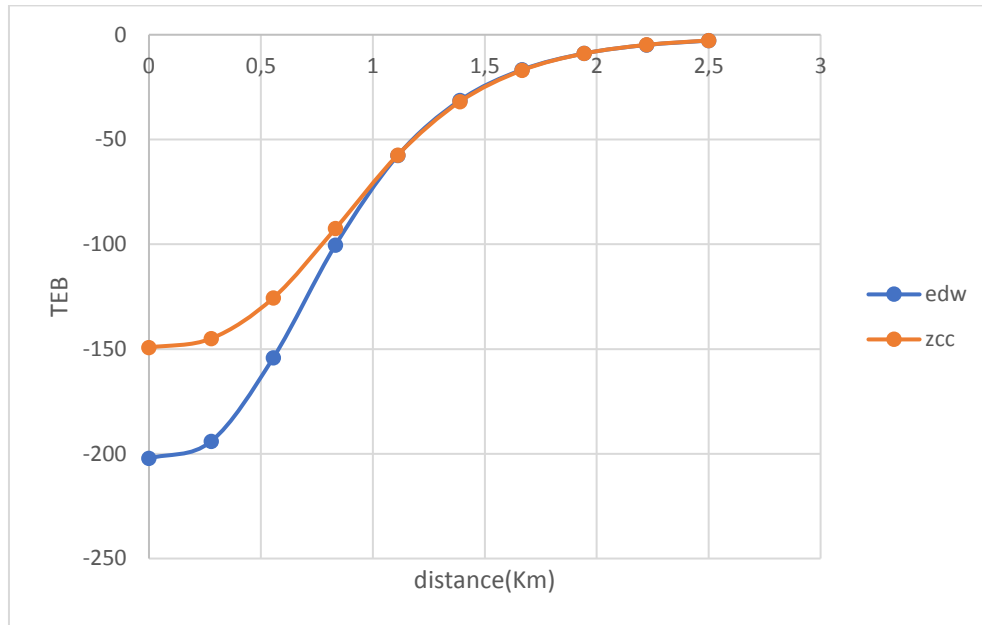
La figure 3.25 montre l’évolution des performances du système SAC-OCDMA/FSO pour une distance de la liaison varie de 0 km à 10 km. Les résultats sont analysés en termes de facteur de qualité pour différentes longueurs de liaison, sous l’effet des conditions météorologiques claires. La figure 3.27 décrit les performances du système en termes de TEB. Il est observé qu’avec l’augmentation de la distance, le TEB augmente.

### 3.7.2 Pluie légère et légère brume

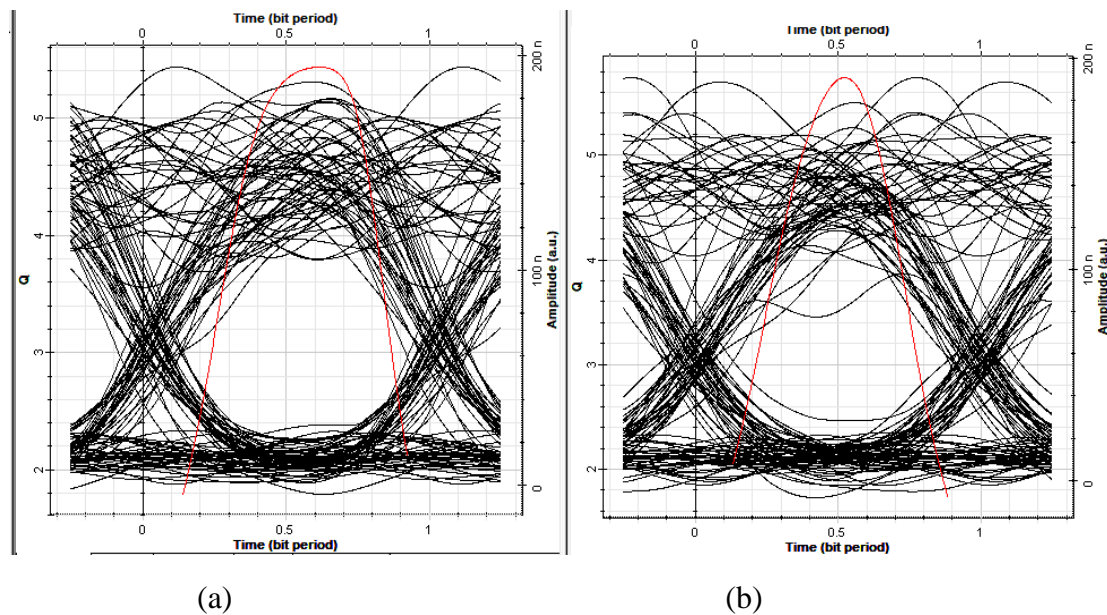
Dans cette partie, l’atmosphérique caractériser par une atténuation élever ( $A=33.9618\text{dbm/Km}$ ) à cause la densité des molécules. Ce devenir est causé par le phénomène de la diffusion et l’absorption de la lumière :



**Figure 3.28:** Evolution du facteur de qualité en fonction de la distance de système SAC-OCDMA/FSO.



**Figure 3.29:** Evolution du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la distance de la liaison FSO.



**Figure 3.30:** Diagramme de l'œil du système de SAC-OCDMA/FSO utilisant le code (a) EDW (b) MD. La distance de liaison FSO est 2.5Km.

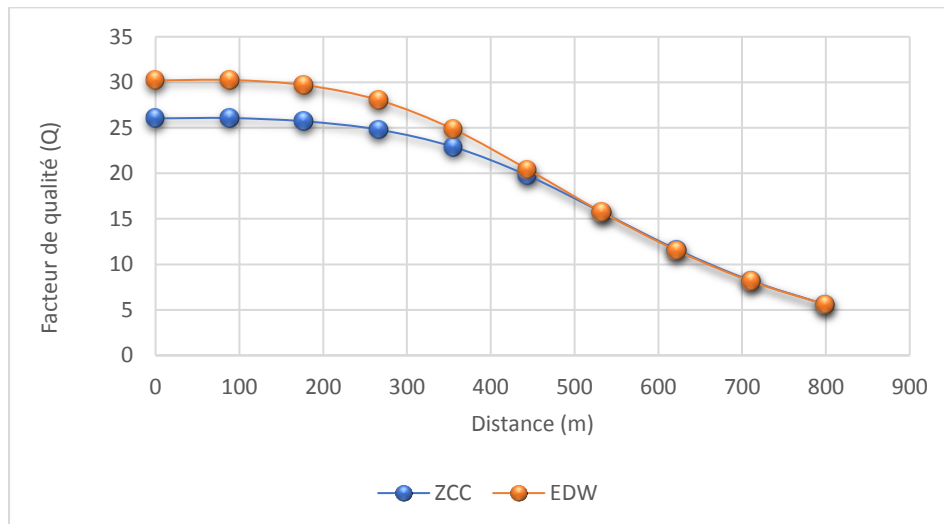
Les figures 3.28 et 3.29 montrent l'évolution de facteur de qualité et taux d'erreur de binaire (TEB) en fonction de la distance de liaison FSO pour les deux types de codes MD et EDW. Dans cette simulation, la distance de liaison FSO varie de 0 à 3 Km. Nous remarquons que pour des courtes distances (D varie de 0 à 1 Km), le code EDW donne de meilleures performances

par rapport au code MD. Alors que, pour des grandes distance ( $D > 1$  Km), les deux codes ont les mêmes performances, et ces performances diminuent lorsque la distance augmente.

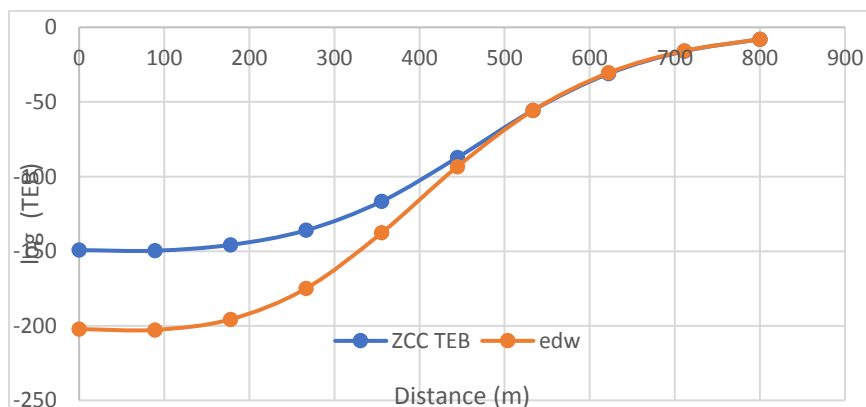
Par exemple, pour une distance de 2.5 Km, le facteur de qualité est de l'ordre de 4 et le long  $TEB = -25$  dB. Les principaux facteurs de dégradation des performances des système sont l'atténuation, l'absorption et la diffusion de la lumière. Comme montré par les diagrammes de l'œil de la figure 3.30, la qualité de transmission est très dégradée pour cette distance ( $D = 2.5$  Km).

### 3.7.3 fort brouillard et fortes pluies

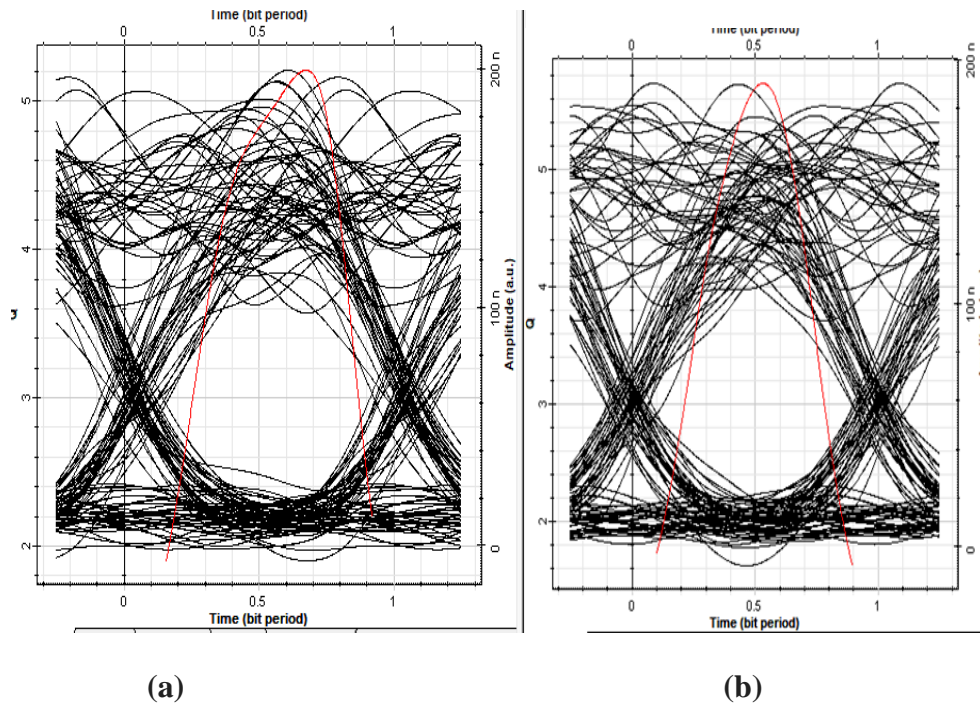
Dans ce cas, l'atmosphère est caractérisé par une atténuation très élevée par rapport au cas précédente ( $A = 330$  dBm/km). Dans ce ces conditions météorologiques, la visibilité entre l'émetteur et le récepteur n'est pas claire, à cause de pluie et bouillard.



**Figure 3.31:** Evolution du facteur de qualité en fonction de la distance de la liaison FSO.



**Figure 3.32:** Evolution du taux d'erreur binaire (TEB) en fonction de la distance de la liaison FSO.



**Figure 3.33:** : Diagramme de l'œil du système SAC-OCDMA/FSO utilisant le code (a) EDW (b) MD. La distance de liaison FSO est 800 m.

D'après les figures 3.31 et 3.32, nous remarquons que les performances du système SAC-OCDMA/FSO déclinent lorsque la distance de la liaison FSO augmente. Pour des courtes distances ( $D$  varie de 0 à 400 m), le code EDW donne toujours des meilleures performances par rapport au code MD. Il est clair que la différence entre les deux codes en termes de facteur  $Q$  et TEB est très grande. Au-delà d'une distance  $D = 400$  m, les deux codes ont les mêmes performances. Par exemple, pour une distance de 800 m le facteur de qualité est de l'ordre de 5 et le TEB = -6dB.

Comme montré par le diagramme de l'œil de la figure 3.33, la qualité de transmission est dégradée. Dans ces conditions météorologiques, la distance de la liaison FSO est de l'ordre de mètre, alors que celle obtenue dans les conditions météorologiques précédentes est de l'ordre de Kilomètre. Ce qui montre l'influence de pluie et fort brouillard sur les performances du système proposé dans notre travail.

### 3.8 Comparaisons entre les codes EDW et MD

Pour bien montrer la différence entre les deux codes utilisés dans notre travail, nous avons résumé dans les tableaux 3.7 et 3.8 les performances du système SAC-OCDMA/FSO (facteur  $Q$  et TEB) obtenus. Ainsi que, pour chaque condition météorologique nous avons indiqué l'atténuation de canal FSO et la distance maximum entre l'émetteur et récepteur.

Condition Météorologiques	Atténuation (dBm/km)	Distance Maximal(m)	TEB	Facteur Q
Clair	0.244	5700	$9.40523 \times 10^{-8}$	5.18052
Brume	2.6802	2795	$9.00424 \times 10^{-8}$	5.18862
Brouillard modéré	33.9618	599	$9.54518 \times 10^{-8}$	5.17778
Brouillard épais	330.6183	100	$9.38716 \times 10^{-8}$	5.18088

**Tableau 3.7:** Les résultats obtenus pour le code EDW.

Condition Météorologiques	Atténuation (dBm/km)	Distance Maximal(m)	TEB	Facteur Q
Clair	0.244	5225	$9.4256 \times 10^{-8}$	5.17512
Brume	2.6802	2330	$9.00355 \times 10^{-8}$	5.17862
Brouillard modéré	33.9618	420	$9.48596 \times 10^{-8}$	5.16778
Brouillard épais	330.6183	65	$9.38716 \times 10^{-8}$	5.18766

**Tableau 3.8 :** Les résultats obtenus pour le code MD.

Dans le cas du brouillard épais, la distance de la liaison FSO utilisant le code MD est très courte, il est de l'ordre de 65m. Alors que pour le code EDW, la distance de liaison FSO est de l'ordre 100 m. Par contre les deux codes donnent des même performances (facteur Q= 5 et TEB =  $10^{-8}$ ).

### 3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons évalué les performances du système hybride SAC-OCDMA/FSO sous différentes conditions météorologiques et utilisant deux codes. Pour évaluer ces performances, le taux d'erreur binaire (TEB), le facteur Q et le diagramme d'œil sont utilisés comme critère de qualité. Ainsi que, ces critères de qualité donnent des meilleures indications pour déterminer les dégradations subites par le système. Les résultats obtenus dans les tableaux 3.7 et 3.8, nous observons que dans l'état clair pour le code EDW le BER égale  $9.40523 \times 10^{-8}$  et le facteur Q égale 5.18052, et pour le code ED le BER égale  $9.4256 \times 10^{-8}$  et le facteur Q égale 5.17512. Et dans le cas d'un état brume pour le code EDW le BER égale  $9.00424 \times 10^{-8}$  et le facteur Q égale 5.18862, mais avec le code ED dans le même cas le BER égale  $9.00355 \times 10^{-8}$  et le facteur Q égale 5.17862. Et pour le cas de Brouillard modéré avec le code EDW le BER égale  $9.54518 \times 10^{-8}$  et le facteur Q est égale 5.17778, et avec le code ED le BER égale  $9.48596 \times 10^{-8}$  et le facteur Q égale 5.16778. Et dans le cas de Brouillard épais avec le code EDW le BER égale  $9.38716 \times 10^{-8}$  et le facteur Q est égale 5.18088, mais avec le code ED dans le même cas le BER égale  $9.38716 \times 10^{-8}$  et le facteur Q égale 5.18766. Donc d'après les résultats obtenus en observer que la valeur de BER dans le code EDW toujours diminue par rapport le code ED avec tous les cas. Mais la



valeur de facteur Q avec le code EDW est plus grande par rapport à le code ED avec tous les cas aussi. Par comparaison entre le résultat qu'on a obtenu avec les deux codes EDW et MD nous observons que le code EDW a donné une meilleure performance par rapport au code MD.

# Conclusion Générale

Ce mémoire de fin d'étude avait pour but l'évaluation des performances du système hybride SAC-OCDMA/FSO à détection directe en termes de différents codes EDW et MD et sous différentes conditions météorologiques. Dans un *premier temps*, nous nous sommes intéressés à introduire le système FSO dans le domaine de télécommunications. Nous limitons notre étude sur les différentes pertes (Atténuation, absorption, diffusion, perte parcours.etc.) et les composantes de système FSO. Cette technologie est combinée avec la technique SAC-OCDMA pour réaliser le système hybride SAC-OCDMA/FSO.

Dans un *douzième temps*, nous nous sommes intéressés à introduire les différentes techniques d'accès multiples utilisées dans les systèmes de communications en général et les systèmes optiques en particulier. Ceci nous a amené à opter pour la technique SAC-OCDMA. Le concept de cette technique, les raisons de son privilège ainsi que leurs différents types de décodage ont été explicités.

Les atouts de cette technique lui confèrent l'avantage d'être le candidat le plus approprié à envisager sa combinaison avec le système FSO pour donner lieu au système hybride SAC-OCDMA/FSO. Ce système hybride se démarque par sa capacité à résister aux interférences d'accès multiples et son habilité à augmenter l'efficacité spectrale et le nombre d'utilisateurs. Le principe de fonctionnement d'un tel système a été mené au cours du second chapitre. A partir de cette étude, des nouvelles codes (EDW et MD) ont été proposés pour le système hybride afin d'optimiser ses performances et donc minimiser les interférences entre symboles.

A la suite de cette étude théorique, au cours du troisième chapitre, une modélisation et évaluation des performances du système SAC-OCDMA/FSO ont été réalisées à l'aide du logiciel Optisystem version 7.0. Les résultats obtenus, en termes de TEB, facteur Q, et de diagramme de l'œil confirment le bien-fondé des codes optiques utilisés. Nous avons conclu après les simulations que le code EDW nous donne une excellente performance dans le système SAC-OCDMA/FSO

par rapport le code ED. Les aboutissements de ce mémoire de fin d'étude serviront de travail de base pour explorer les performances du système hybride SAC-OCDMA/FSO avec les codes EDW, MD et ouvriront la voie à d'autres contributions sur l'amélioration de la capacité de ce type de système.

Berra Salah, KASSA-BAGHDOUCHE Lazhar and Ashu Verma '***SAC-OCDMA SYSTEM WITH EDW CODES OVER FSO UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF WEATHER***' INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH AND ANALYTICAL REVIEWS (IJRAR).

## Références bibliographiques

- [1] → site web:<http://www.laseroptronics.com/index.cfm/id/57-66.htm>. Consulté 27 April 2019.
- [2] → site web <http://inventors.about.com> consulté 27 April 2019.
- [3] → D. Killinger, « Free space optics for laser communication through the air », *Optics & Photonics News*, vol. 13, pp. 36-42, Oct. 2002.
- [4] → R. W. Burns, « Communications: An International History of the Formative Years (History of Technology Series) », Publié par: Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [5] → I. Kim, « 10 G FSO systems position technology for the future », *Lightwave online* pp. 19-21, Juillet. 2009.
- [6] → H.T. Yura, W.G. McKinley, « Optical scintillation statistics for IR ground-to-space laser communication systems », *Appl. Opt.* 22(21), 3353–3358 (1983).
- [7] → M. Al Aboulai, « Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques propagation, disponibilité et fiabilité », Thèse de doctorat l'université de Bourgogne, France, 2005.
- [8] → Zaman, Imam Uz, et al. « Polarization mode dispersion-based physical layer key generation for optical fiber link security », *Optical Sensors*. Optical Society of America, 2017.
- [9] → A. Jurado-Navas, J.M. Garrido-Balsells, J. Francisco Paris, M. Castillo-Vázquez, A. Puerta-Notario, « Impact of pointing errors on the performance of generalized atmospheric optical Channels », *Opt. Exp.* 20(11), 12550–12562, 2012.
- [10] → site web: <http://www.cie.co.at/>, consulté 28 Feb 2019.
- [11] → Arief, A.R., Aljunid, S.A., Anuar, M.S., Junita, M.N., Ahmad, R.B., Ghani, F. « Enhanced performance of new family modified double weight codes spectral amplitude coding optical CDMA system network », In: *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, pp. 488–494 (2011).
- [12] → Foucal, Vincent. « *Conception d'interconnexions optiques haut débit courte distance en espace libre: Prototypage de modules de communication pour applications* »

- embarquées*». Diss. Strasbourg, 2010.
- [13] → Arief, A.R., Aljunid, S.A., Anuar, M.S., Junita, M.N., Ahmad, R.B., Ghani, F, « Enhanced performance of new family modified double weight codes spectral amplitude coding optical CDMA system network », In: IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, pp. 488–494 ,2011.
- [14] → Ahmed, N, Aljunid, S.A., Ahmad, R.B, Rashid, M.A.: Novel OCDMA detection technique based on modified double weight code for optical access network. *Elektron. Ir Elektrotech.* 18, 117–121 (2012).
- [15] → Radhi, I.F, Aljunid, S.A., Fadhil, H.A., Al-Khafaji, H.M.R., « Performance evaluation of spectral amplitude coding signature sequences for OCDMA systems », In: 2nd International Conference on Photonics, pp. 1–4 (2011).
- [16]→ P. Kruse, L. McGlauchlin, R. McQuistan, « *Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection* », Wiley, New York, 1962.
- [17] → Dayang, H.K., Aljunid, S.A, « Optical code division multiple access (OCDMA) using double weight (DW) codes for local area network », In: International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE 2010) (2010).
- [18] → Hasoon, F.N., Aljunid, S.A., Abdullah, M.K., Shaari, S, « Multi-rate transmissions on SACOCDMA system using new enhancement double-weight (EDW) codes » In: 2<sup>nd</sup> Information and Communication Technologies (ICTTA) (2006).
- [19] → R.N. Clark, « Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy & in Manual of Remote Sensing», (Chapter 1), vol. 3, Wiley, New York, 1999.
- [20] → R.M. Gagliardi, S. Karp, « Optical Communications », 2nd edn, Wiley, New York, 1995.
- [21] → R.K. Long, «Atmospheric attenuation of ruby lasers », *Proc. IEEE* 51(5), 859–860 ,1963.
- [22] → R.M. Langer, « Effects of atmospheric water vapour on near infrared transmission at sea level », in Report on Signals Corps Contract DA-36-039-SC-723351 (J.R.M. Bege Co., Arlington, 1957).
- [23] → A.S. Jursa, « Handbook of Geophysics and the Space Environment», Scientific Editor, Air Force Geophysics Laboratory, Washington, DC, 1985.
- [24] → H. Willebrand, B.S. Ghuman, « Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks », SAMS publishings, 2002,
- [25] →. M. Rouissat, A.R. Borsali, M.E. Chiak-Bled, « Free space optical channel characterization and modeling with focus on algeria weather conditions», *Int. J.*

- Comput. Netw. Inf. Secur. 3, 17–23 (2012).
- [26] → H.C. Van de Hulst, «Light Scattering by Small Particles », Dover publications, Inc., New York, 1981.
- [27] → P. Kruse, L. Mc Glauchlin, R. McQuistan, « Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection », (Wiley, New York, 1962).
- [28] → M.A. Naboulsi, H. Sizun, F. de Fornel, « Fog attenuation prediction for optical and infrared waves », Opt. Eng. 43, 319–329 (2004).
- [29] → I.I. Kim, E. Korevaar, « Availability of free space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems», Light pointe technical report, 27 Mai 2019.
- [30] → L.-P. BOULIANNE, « Système de communication optique à accès multiple par répartition de code à saut rapide de fréquence », Thèse de doctorat, Université Laval, 2001.
- [31] → K. Tsukamoto, T. Higashino, S. Komaki, K. Kazaura, K. Wakamori, T. Suzuki, et M. Matsumoto, « A new loss model and system design method for radio on free space optical link», in International Topical Meeting on Microwave Photonics, MWP '09, pp. 1–4, October 2009.
- [32] → Sugianto Trisno, « Design and Analysis of Advanced Free Space Optical Communication Systems», Thèse de doctorat, Université de Maryland. Washington, D.C. USA. 2006.
- [33] → M. NEBELING, « ASCII IMPLEMENTATION OF AREA AND POWER MINIMIZATION FOR DA FIR FILTER» International Journal of Advanced Information Science and Technology, (IJAIST) ISSN: 2319:2682. Vol.4, No.3, page 131, March 2015.
- [34] → Y. ZOUINE, « Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA », Thèse de doctorat. Université de Limoges, 2005.
- [35] → K. Ivan P, L. Tingye and W. Alan E., « Optical Fiber Telecommunications V A : Components and Subsystems », USA: Elsevier Inc, 2008.
- [36] → R. BOUDAUD, « Contribution à l'étude des performances et limitations d'une liaison CDMA optique haut débit », Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2010.
- [37] → N. M. SAAD, « Contribution à l'étude de l'application de la technique CDMA aux systèmes de transmission optique », Thèse de doctorat, Limoges, 2005.
- [38] → A. GARADI, « Contribution à l'étude des codes optiques ZCC : application au système

- SAC-OCDMA », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2015.
- [39] →K. Ivan P., L. Tingye and W. Alan E., « Optical Fiber Telecommunications V B : Systems and Networks», vol. 2, USA: Elsevier Inc, pp. 829-833, 2008.
- [40] → Balaji, Venkatachalam Rajarajan, Mahalingam Murugan, and Savarimuthu Robinson, « Optimization of DWDM demultiplexer using regression analysis », *Journal of Nanomaterials* vol. 14, no. 12 2016, (2016).
- [41] →I. FSAIFES, « Encodage et décodage temporels" tout-optique" à réseaux de Bragg pour l'accès multiple », Thèse de doctorat, Télécom ParisTech, 2007.
- [42] →M. NEBELING and H. J. THIELE, « Coarse wavelength division multiplexing: technologies and applications », CRC Press, 2007.
- [43] →G. P. AGRAWAL, «Lightwave technology: telecommunication systems », John Wiley & Sons, 2005.
- [44] → Chenard, Francois, Oseas Alvarez, and Andrew Buff, «Mid-infrared chalcogenide fiber devices for medical applications», *Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XVIII*, Vol. 10488. International Society for Optics and Photonics, 2018..
- [45] →L. TANCEVSKI and I. ANDONOVIC, «Hybrid wavelength hopping/time spreading schemes for use in massive optical networks with increased security », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 12, pp. 2636-2647, 1996.
- [46] → A. GARADI, « Contribution à l'étude des codes optiques ZCC : application au système SAC-OCDMA », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2015.
- [47] →B. FASSI, « Contribution à l'étude des codes ZCZ (Zero-Correlation-Zone): Application au système CDMA » , Thèse de doctorat. Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2014.
- [48] →S. ARNON, « Advanced optical wireless communication systems », Phd thesis, Cambridge university press, 2012.
- [49] →F. A. UMRANI, « Applications of perfect difference codes in fiber-optics and wireless optical code-division multiplexing/multiple-access systems», Phd thesis, University of Glamorgan, 2009.
- [50] →A. GARADI, « Etude et Analyse des performances des codes optique ZCC : Application au système CDMA optique », Mémoire de Magiste, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2010.

- [51] →K. MERZOUK, « Étude d'un système bas coût de transmission optique par multiplexage temporel », Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2008.
- [52] →S. CORDETTE, « Continuum de fréquences optiques pour application OCDMA », Thèse de doctorat, Télécom ParisTech, 2010.
- [53] →S. AYOTTE, « Systèmes optiques à accès multiple par répartition des codes : études des performances et de l'impact du bruit d'intensité », Thèse de doctorat, Université Laval, 2007.
- [54] →A. Dziri, «Study of one-dimensional (1D) codes: Application to All-Optical CDMA », Master's thesis, University of Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, 2015.
- [55] →L.-P. BOULIANNE, « Système de communication optique à accès multiple par répartition de code à saut rapide de fréquence », Thèse de doctorat. Université Laval, 2001.
- [56] →C. Kandouci, « Etude et simulation du système de transmission SAC-OCDMA sous le logiciel Optisystem, », Mémoire de Master, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2012.
- [57] →G. Ashwin and A. Tony, « DWDM Network Designs and Engineering Solutions », USA: Cisco Press, 2003.
- [58] →J. PENON, « Réduction du bruit d'intensité dans les systèmes SAC-OCDMA incohérents utilisant des réseaux de Bragg », Thèse de doctorat. Université Laval, 2009.
- [59] →M. KAVEHRAD and D. ZACCARIN, « Optical code-division-multiplexed systems based on spectral encoding of noncoherent sources», Journal of lightwave technology, vol. 13, no. 3, pp. 534-545, 1995.
- [60] →T. H. ABD, S. A. ALJUNID, H. A. FADHIL and al., « Development of a new code family based on SAC-OCDMA system with large cardinality for OCDMA network », Optical Fiber Technology, vol. 17, no. 4, pp. 273-280, 2011.
- [61] →K.-I. KITAYAMA, « Optical code division multiple access: a practical perspective », Thèse de doctorat, Cambridge University Press, 2014.
- [62] →Sunny, «Performance Analysis of Optical CDMA Using W/T Codes », Master of Technology, Delhi Technological University, 2010.
- [63] →C. GOURSAUD-BRUGEAUD, « Réception multiutilisateurs par annulation parallèle d'interférences dans les systèmes CDMA optiques », Thèse de doctorat. Université de



- Limoges, 2006.
- [64] →W. C. KWONG and G.-C. YANG, « Optical coding theory with prime », CRC Press, 2013.
- [65] →P. R. PRUCNAL, « Optical code division multiple access: fundamentals and applications », CRC press, 2006.
- [66] →N. ABDLKAREM, « Design of graphical user interface for multiuser SAC-OCDMA performance analysis », Master of Electrical Engineering. Universiti Tun Hussein Onn, Malaysia, 2015.
- [67] →M. LOURDIANE, « CDMA à séquence directe appliqué aux systèmes de communications optiques », Thèse de doctorat. Télécom ParisTech, 2005.
- [68] →H. Bidgoli, « The Handbook of Computer Networks, Key Concepts, Data Transmission, and Digital and Optical Networks », John Wiley & Sons, 2008.
- [69] →H. GHAFOURI-SHIRAZ and M. M. KARBASSIAN, « Optical CDMA networks: principles, analysis and applications », John Wiley & Sons, 2012.
- [70] →A. H. Saboundji, « Etude d'un système SAC-OCDMA à détection balancée », Mémoire de Master. Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2016.
- [71] →A. M. Alhassan, N. M. Saad and N. Badruddin, « An Enhanced Detection Technique for Spectral Amplitude Coding Optical CDMA Systems », IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, vol. 23, no. 13, pp. 875-877, 2011.