



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة العربي التبسي - تبسة  
Université Larbi Tébessi – Tébessa  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

**En : Réseaux et Télécommunications**

**Spécialité : Réseaux et Télécommunications**

Par : SOUABI Mohamed

SAOUD Abdelhakim

**Sujet**

**Transmission des signaux MIMO LTE/4G en utilisant  
la technologie FSO**

Évalué, le 22 / 06 / 2021, devant le jury composé de :

Mme.Bouchemha Amel

MCA

Président

Mme.Djellab Hanane

MCA

Rapporteur

M.Saidi Riad

MCB

Examineur

Promotion : 2020/2021

## Dédicaces

---

*A ma grand-mère*

*À mes chers parents*

*À mes frères et sœurs*

*À mes amis*

*À toutes les personnes*

*qui me sont chères*

---

*SOUAHI Mohamed*

*A ma grand-mère*

*À mes chers parents*

*À mes frères et sœurs*

*À mes amis*

*À toutes les personnes*

*qui me sont chères*

---

*SAOUD Abdelhakim*

*Que ce travail témoigne de notre amour et de notre  
respect.*

---

## Remerciements

---

*Aux prémices de ce mémoire nous tenons à remercier notre encadreur Mme. DJELLAB Hanane pour nous avoir consacré tout son temps pour lire et relire patiemment notre travail. Pour son dévouement, sa capacité de transmission de ses connaissances et de répondre à nos questions et sa méthodologie de travail. Ainsi que pour ses encouragements et ses conseils.*

*Nos remerciements vont aussi aux enseignants et professeurs que nous avons croisé durant notre parcours et qui nous ont aidés à développer nos compétences et à nourrir notre potentiel.*

*Nos remerciements vont également à nos chers parents, qui nous ont soutenu toutes ces années, assisté aux moments de joie intense mais également plus difficiles en étant à l'écoute, présents, conciliants et aimants.*

*Merci à nos amis proches avec qui on a partagé nos doutes, nos angoisses, nos réussites, qui nous ont aidé, conseillé.*

*Enfin nous remercions toutes les personnes qui nous ont accompagnés durant tout notre cursus, et spécialement durant cette année charnière de notre parcours personnel et professionnel.*

## Résumé

---

L'objectif de ce travail, est de montrer l'étude de transmission des signaux MIMO 4G LTE. Il peut nous aider à mieux comprendre et simuler le fonctionnement et la structure des chaînes de transmission avec les liaisons FSO. D'abord, nous faisons une étude théorique de concept générale sur la quatrième génération en abordant toutes les définitions et les caractéristiques de ce dernier et les technologies utilisées afin d'expliquer par la suite le processus de leur application. Ensuite, nous abordons la technologie FSO. Enfin, grâce à la simulation de chaîne de transmission avec logicielle 'Optisystem' et à la déduction des résultats pratiques, nous arrivons à démontrer que pour une meilleure transmission avec un vecteur d'erreur minimale, toutes les facteurs influencent au notre signal doivent être prises en compte tout en déterminant la valeur du seuil de chaque facteur.

## Abstract

---

The objective of this work is to show the study of transmission of 4G LTE MIMO and how the signals can help us better understand and simulate the operation and structure of transmission chains with FSO links. First, we establish a theoretical study of the general concept on the fourth generation by addressing all the definitions and characteristics of the latter and the technologies used in order to subsequently explain the process of their application. Next, we illustrate everything about FSO technology. Finally, thanks to the simulation of the transmission chain with 'Optisystem' software and to the deduction of the practical results, we are able to demonstrate that for a better transmission with a minimal error vector, all the factors influencing our signal must be taken into account while determining the threshold value of each factor.

---

## ملخص

---

الهدف من هذا العمل هو إظهار كيف يمكن أن تساعدنا دراسة إرسال إشارات LTE MIMO4G على فهم ومحاكاة تشغيل وهيكـل سلاسل الإرسال باستخدام روابط FSO. أولاً ، نقوم بدراسة المفهوم النظري العام للجيل الرابع من خلال معالجة جميع تعريفات وخصائصه والتقنيات المستخدمة من أجل شرح عملية تطبيقها لاحقاً. بعد ذلك ، نوضح كل شيء عن تقنية FSO. أخيراً ، بفضل محاكاة سلسلة الإرسال باستخدام برنامج "Optisystem" واستنتاج النتائج العملية ، يمكننا إثبات أنه من أجل إرسال أفضل مع الحد الأدنى من متجه الخطأ ، يجب أخذ جميع العوامل التي تؤثر على إشارتنا. في الاعتبار أثناء تحديد القيمة الحدية لكل عامل.

---

# Table des Matières

---

<b>Dédicaces .....</b>	<b>ii</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>v</b>
<b>ملخص.....</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>x</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>1</b>
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>3</b>
<b>Chapitre 1 Généralités sur les réseaux de quatrième génération LTE</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction .....	5
1.2 Aperçu général.....	5
1.3 Les caractéristiques du système LTE .....	5
1.4 LTE-Advanced .....	6
1.4.1 Architecture du LTE .....	7
1.4.1.1 Equipement utilisateur .....	7
1.4.1.2 Réseau d'accès Evolved-UTRAN .....	7
1.4.1.3 Réseau cœur EPC.....	8
1.5 Les technologies utilisées .....	10
1.5.1 La technique OFDM .....	10
1.5.2 Avantages et inconvénients De l'OFDM.....	10
1.5.3 OFDM optique (O-OFDM) .....	10
1.5.3.1 OFDM optique à détection directe (DDO-OFDM) .....	11
1.5.3.2 OFDM optique à détection cohérente (CO-OFDM).....	12

---

---

1.6	La technologie MIMO .....	12
1.7	Conclusion .....	14
<b>Chapitre 2 Communication optique en espace libre (FSO).....</b>		<b>15</b>
2.1	Introduction .....	15
2.2	Principe de fonctionnement de FSO .....	15
2.3	Caractéristique des dispositifs FSO .....	17
2.4	Les avantages et les limites de FSO .....	17
2.5	Les applications des FSO .....	18
2.6	Caractéristiques de propagation en espace libre liées au modèle de liaison .....	20
2.6.1	Propagation par temps clair .....	20
2.6.2	Effet du brouillard.....	20
2.6.2.1	Estimation de l'atténuation du brouillard en fonction de la visibilité .....	20
	Atmosphérique .....	20
2.6.3	Effet de la pluie.....	21
2.6.4	Affaiblissement dû à la neige.....	22
2.7	L'émission et la réception optique dans les systèmes FSO .....	23
2.8	Conclusion .....	24
<b>Chapitre 3 Discussion et Résultats .....</b>		<b>25</b>
3.1	Introduction .....	25
3.2	Critères et méthodes d'évaluer la qualité de transmission .....	25
3.2.1	Taux d'erreurs binaires .....	25
3.2.2	La magnitude du vecteur d'erreur (EVM).....	25
3.3	Principes d'encodage de l'amplitude spectrale avec le code MDW .....	26
3.4	Description du système hybride SAC-OCDMA FSO .....	28
3.4.1	Partie Emission .....	29

---

---

3.4.1.1	Le générateur de séquences binaires pseudo-aléatoires (PRBS) .....	29
3.4.1.2	La source de lumière blanche .....	29
3.4.1.3	Générateur de séquence QAM.....	30
3.4.1.4	Modulateur OFDM .....	31
3.4.1.5	Le modulateur Machzehnder .....	31
3.4.2	Partie FSO.....	32
3.4.3	Partie réception .....	33
3.4.3.1	Démultiplexeur WDM .....	34
3.4.3.2	Photodiode PIN.....	35
3.4.3.3	Démodulateur en quadrature.....	36
3.5	Interprétation des résultats.....	37
3.5.1	Comparaison entre l'utilisation d'une source laser CW et une source laser CW multiple	41
3.6	Conclusion.....	43
	<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>44</b>
	<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>45</b>

## Liste des tableaux

---

TABLEAU 1-1 : DIFFERENTS PARAMETRES DU LTE-ADVANCED [2].	6
TABLEAU 2-2 : EXEMPLES DE PARAMETRES UTILISES POUR ESTIMER L'AFFAIBLISSEMENT DU A LA PLUIE.	22
TABLEAU 3-1 : LES LONGUEURS D'ONDES POUR LE CODE MDW.	27
TABLEAU 3-2 : LES FREQUENCES EN THZ POUR LE CODE MDW.	27
TABLEAU 3-3 : LES LONGUEURS D'ONDES POUR LES TROIS UTILISATEURS POUR EMISSIONS ET RECEPTION.	35

---

## Liste des figures

---

FIGURE 1-1 : ARCHITECTURE GENERALE DU SYSTEME LTE [2].....	7
FIGURE 1-2 : ARCHITECTURE EPC [3]. .....	8
FIGURE 1-3 : RECEPTEUR DU SYSTEME DDO-OFDM [5].....	11
FIGURE 1-4 : SPECTRE DES SIGNAUX DSB ET SSB O-OFDM [6].....	11
FIGURE 1-5 : SPECTRE DU SIGNAL AVANT ET APRES LA DETECTION DIRECTE [6].....	12
FIGURE 1-8 : SCHEMA REPRESENTATIF DES SYSTEMES SISO, SIMO, MISO ET MIMO [9]. .....	13
FIGURE 2-2 : CONFIGURATION DE BASE D'UNE LIAISON OPTIQUE EN ESPACE LIBRE. ....	15
FIGURE 2-3 : LES DIFFERENTES ZONES DU SPECTRE LUMINEUX [11]. ....	16
FIGURE 2-4 : LIAISONS DE RACCORDEMENT SANS FIL "BACKHAUL" DE LA TELEPHONIE MOBILE [13]. ....	20
FIGURE 2-5 : L'ATTENUATION ATMOSPHERIQUE DUE AU BROUILLARD [14].....	21
FIGURE 2-6 : SYNOPTIQUE D'UN MODULE D'EMETTEUR FSO. ....	23
FIGURE 2-7 : MODULE DE RECEPTION OPTIQUE.....	24
FIGURE 3-1 : LA CHAINE SIMULEE D'UN SYSTEME HYBRIDE FSO SAC-OCDMA D'UN UTILISATEUR. ....	28
FIGURE 3-2 : LA PARTIE EMISSION DE LA CHAINE SIMULEE.....	29
FIGURE 3-3 : LES PEIGNES DE FREQUENCES DU PREMIER .....	30
FIGURE 3-4 : LES PROPRIETES DE GENERATEUR DE SEQUENCE QAM. ....	30
FIGURE 3-5 : LES PROPRIETES DE MODULATEUR OFDM.....	31
FIGURE 3-6 : LE SPECTRE RF LA SORTIE DE QUADRATURE MODULATEUR. ....	31
FIGURE 3-7 : LES PEIGNES DE FREQUENCES APRES MODULATION AVEC LES DONNEES.....	32
FIGURE 3-8 : CANAL DE FSO. ....	32
FIGURE 3-9 : LES PROPRIETES DE CANAL FSO. ....	33
FIGURE 3-10 : LA PARTIE EMISSION DE LA CHAINE SIMULEE.....	33
FIGURE 3-11 : LES PROPRIETES DE DEMULTIPLIXEUR WDM.....	34
FIGURE 3-12 : DECODAGE DE SIGNAL APRES DEMULTIPLIXEUR WDM DU PREMIER .....	34
FIGURE 3-13 : LES PROPRIETES DE PHOTODIODE PIN.....	35
FIGURE 3-14 : LE SIGNAL DECODE CONVERTI EN SIGNAL ELECTRIQUE. ....	36
FIGURE 3-15 : LES PROPRIETES DE DEMODULATEUR EN QUADRATURE. ....	36
FIGURE 3-16 : LE SPECTRE RF LA SORTIE DE DEMODULATEUR EN QUADRATURE. ....	37
FIGURE 3-17 : RESULTATS DE CONSTELLATION POUR UN UTILISATEUR. ....	37
FIGURE 3-18 : L'EVM EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FSO.....	38

FIGURE 3-19 : L'EVM EN FONCTION DEBIT BINAIRE (GBIT/S). .....39

FIGURE 3-20 : L'EVM EN FONCTION DE PUISSANCE TRANSMISE (DBM). .....39

FIGURE 3-21 : IMPACT DE CHANGEMENT DE CLIMAT SUR L'EVM.....40

FIGURE 3-22 : LA PUISSANCE REÇUS EN FONCTION DE DISTANCE (KM). .....40

FIGURE 3-23 : LA PUISSANCE REÇUS EN FONCTION DE PUISSANCE TRANSMISE (DBM). .....41

FIGURE 3-24 : L'EVM EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FSO.....42

FIGURE 3-25 : L'EVM EN FONCTION DEBIT BINAIRE (GBIT/S). .....42

FIGURE 3-26 : L'EVM EN FONCTION DE PUISSANCE TRANSMISE (DBM). .....43

FIGURE 3-27 : IMPACT DE CHANGEMENT DE CLIMAT SUR L'EVM.....43

---

## Liste des abréviations

---

<b>APD</b>	Avalanche Photo Diode
<b>ASE</b>	Application Service Element
<b>ADSL</b>	Asymmetric Digital Subscriber Line
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BSC</b>	Base Station Controller
<b>BSS</b>	Base Station Sub-system
<b>BTS</b>	Base Transceiver Station
<b>COOFDM</b>	Coherent Detection Optical OFDM
<b>DL</b>	Diode Laser
<b>DAB</b>	Digital Audio broadcasting
<b>DEL</b>	Light Emitting Diode
<b>DSB</b>	Double Side Band
<b>DVB</b>	Digital Video broadcasting
<b>DD-MZM</b>	Dual Drive-MZM
<b>DDO-OFDM</b>	Direct Detection Optical OFDM
<b>EO</b>	Electric optics
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>EPS</b>	Evolved Packet System
<b>EVM</b>	Error Vector Magnitude
<b>eNodeB</b>	Evolved NodeB
<b>E-UTRAN</b>	Evolved UTRAN
<b>FDD</b>	Frequency-division duplex
<b>FFT</b>	Fast Fourier transform
<b>FPB</b>	Filtre Passe-Bande
<b>FSO</b>	Free Space Optics
<b>FPBO</b>	Filtre Passe-Bande Optique
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communication
<b>HLR</b>	Home Location Register
<b>HSS</b>	Home Subscriber Service
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>I/Q</b>	In phase/ Quadrature
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>LOS</b>	Line Of Sight
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>MDW</b>	Modified Double Wide
<b>MME</b>	Mobility Management Entity
<b>MUX</b>	Multiplexer
<b>MZM</b>	Mach-Zehnder Modulator
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>NAS</b>	Network Attached Storage
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OFDMA</b>	OFDM Multiple Access
<b>PN</b>	Pseudo-Noise
<b>PIN</b>	Positive Intrinsic Negative
<b>PGW</b>	Packet-Switch GetWay
<b>PCRF</b>	Policy and Charging Rules Function

<b>PRBS</b>	Pseudo-random binary sequence
<b>PDN-GW</b>	Packet Data Network Gateway
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QOS</b>	Quality of Service
<b>LD</b>	Laser Diode
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RAN</b>	Réseau D'accès Radio
<b>RMS</b>	Root Mean Square Level
<b>RNC</b>	Radio Network Controller
<b>RRC</b>	Radio Resource Control
<b>SAE</b>	System Architecture Evolution
<b>S-GW</b>	Serving-GetWay
<b>SNR</b>	Signal to noise ratio
<b>SSB</b>	Single Side Band
<b>SGSN</b>	Serving GRPS Support Nom
<b>SSMI</b>	Subcarrier-Subcarrier Mixing Interference
<b>SD-MZM</b>	Single Drive MZM
<b>SC-FDMA</b>	Single-Carrier FDMA
<b>SAC-OCDMA</b>	Spectral amplitude coding-Optical Code Division Multiple Access
<b>TEB</b>	Taux d'Erreur Binaire
<b>TDD</b>	Time Division Duplex
<b>UE</b>	Terminal Mobile
<b>UIT</b>	Union Internationale des Télécommunications
<b>UWB</b>	Ultra-Wide Band
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>UTRAN</b>	Universal Terrestrial Radio Access Network
<b>WOC</b>	Wireless Optical Communications
<b>WLAN</b>	WIRELESS Local AREA NETWORK
<b>WCDMA</b>	Wide Coding Division Multiple Access
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project

## Introduction Générale

---

Aujourd'hui, le nombre d'appareils connectés qui ont besoin d'accéder aux données mobiles ne cesse d'augmenter. Rien qu'en 2009, il y a eu une augmentation moyenne de 160 %, surtout pour certains canaux mobiles qui ont même connu un développement rapide. Selon d'autres estimations récentes, les données mobiles continueront de doubler chaque année jusqu'en 2014. Le taux de développement annuel global est donc d'environ 108 %. Ces besoins de grande capacité ne peuvent être satisfaits que par un rendement élevé et ce dernier ne peut se faire que par une très bonne optimisation de l'infrastructure du réseau mobile, tout en prenant en compte les limitations à savoir ; sont la puissance, la bande passante et la complexité limitée.

Dans ce mémoire, nous allons aborder la transmission numérique qui est devenue omniprésente dans les systèmes de communication. De plus, nous allons expliquer comment répondre à la demande de l'émergence d'appareils multimédias plus connectés et la demande toujours croissante d'informations sur chaque appareil qui met en évidence les limites des réseaux cellulaires de quatrième génération (4G), à travers Transmission de la technologie FSO.

Dans le premier chapitre, nous abordons le concept général de la quatrième génération, en donnant un aperçu général et une description du système LTE et ses différents canaux et interfaces, en passant par son architecture et sa technologie. Ensuite on énumérait les systèmes de transmissions proposés dans ce cadre, et on finit par faire une comparaison entre ces derniers avant de couvrir l'essentiel de la technologie MIMO.

Dans le deuxième chapitre, nous allons introduire la communication optique en espace libre (FSO), où on passera par une explication de la technologie et de ses principes, et on expliquera tout ce qui concerne son application. Pour enfin aborder en détails et en calculs la propagation en espace libre liées au modèle de liaison.

Le troisième chapitre est pratique, et sera consacré aux calculs des capacités des différentes configurations. Nous avons d'abord abordé les critères et les méthodes d'évaluation de la qualité de transmission, à en compter le taux d'erreurs binaires et la magnitude du vecteur d'erreur, puis nous avons aussi traité le code MDW et les principes d'encodage de l'amplitude spectrale.

Par la suite, toujours dans le même chapitre, nous avons démontré notre chaîne tout en faisant la liaison FSO, pour expliquer chaque partie de sa composante à part. De l'étude de l'impact de la variation de la longueur FSO, la puissance transmise, le débit émis et les différents états climatique du signal envoyé durant la procédure, nous avons pu conclure comment ces derniers peuvent être affectés par le signal et en déduire la valeur du seuil de chaque facteur.

Et enfin on conclura le mémoire par la présentation du bilan des résultats obtenus lors de la simulation, et notre propre déduction.

# 1 Généralités sur les réseaux de quatrième génération LTE

---

## 1.1 Introduction

Le réseau 4G est le développement du réseau mobile de troisième génération, il est basé sur la norme LTE-Advanced (Advanced Long Term Evolution). L'introduction d'un réseau de téléphonie mobile de quatrième génération à très haut débit peut théoriquement atteindre 150 Mbit/s, par rapport au réseau cellulaire précédent, la particularité de la 4G est de passer à la structure IP (Internet Protocol), qui permet de transmettre des communications vocales sous forme de paquets de données. La 4G accompagne l'avènement des smartphones et le développement de nouveaux usages consommant de grandes quantités de données numériques et de bande passante: appels vidéo, streaming vidéo ou musique, jeux vidéo en ligne, applications géo localisées, partage de contenu, etc.

Dans ce chapitre, nous aborderons le concept général des réseaux de quatrième génération LTE.

## 1.2 Aperçu général

La LTE (Long Term Evolution) est un projet mené par l'organisme de standardisation 3GPP (appelé aussi la génération 3.9G ou Super3G) visant à rédiger les normes techniques de la future quatrième génération en téléphonie mobile [1-3].

## 1.3 Les caractéristiques du système LTE

- ✓ Il fournit un débit de donnée crête de 50 Mbits/s sur la liaison montante.
- ✓ un débit pic théorique entre 100 Mbits/s et 300 sur la liaison descendante, et le temps d'aller-retour sur l'interface radio RAN (réseau d'accès radio) est inférieur à 10 millisecondes.
- ✓ LTE utilise une bande passante de 2x20 MHz et prend en charge le duplexage basé sur le temps (TDD) ou basé sur la fréquence (FDD) ;
  - **Le TDD (time-division duplex)**

Le transfert de données depuis le mobile vers la station de base (Uplink) s'effectue à la même fréquence qu'en sens inverse (Downlink), qu'ont séparé dans le temps.

- **Le FDD (Frequency-division duplex)**

Les liaisons montantes UL (uplink) et descendantes DL (downlink) s'effectuent en même temps sur des fréquences différentes.

- ✓ la taille des cellules est de 5 km pour de meilleures performances : Grâce à l'utilisation d'antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output) et de la technologie de transmission OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), d'accès multiples : OFDMA (OFDM Multiple Access) sur la liaison descendante et la technique SC-FDMA (Single-Carrier FDMA) sur la liaison montante pour réduire les problèmes de canal.
- ✓ Le LTE répond aux nouvelles demandes (délais courts, les nouveaux services utilisent généralement l'interconnexion).
- ✓ Architecture générale et simplifiée.
- ✓ Les piles de protocoles basés sur le protocole IP.
- ✓ La qualité de service est principalement garantie par le support EPS de bout en bout (Evolved Packet System bearer).
- ✓ Il permet d'améliorer les performances grâce à la méthode « inter-couche ».

## 1.4 LTE-Advanced

La norme LTE-advanced impose des critères de base sur le débit et sur la latence, comme le résume le tableau suivant :

**Tableau 1-1** : différents paramètres du LTE-Advanced [2].

		<b>LTE</b>	<b>LTE-advanced</b>
<b>Débits crêtes maximums</b>	DownLink	300 Mb/s	1 Gb/s
	UpLink	75 Mb/s	500 Mb/s
<b>Bandes de fréquence</b>		1.4 à 20 MHz	100 Mhz
<b>Latence</b>	Données	10 ms	10ms (RTT)
	Session	100 ms	50ms
<b>Efficacité spectrale DL/UL</b>	Max	5.0/2.5 b/s/Hz	30/15 b/s/Hz
	Moyen	1.8/0.8 b/s/Hz	2.6/0.2 b/s/Hz
	En limite	0.04/0.02 b/s/Hz	0.009/0.07 b/s/Hz

### 1.4.1 Architecture du LTE

L'architecture générale du système LTE est montrée sur la figure 1.1, Les principales composantes de l'architecture du système LTE peuvent se résumer comme suit:

- a) Équipement de l'utilisateur (UE).
- b) Réseau d'accès radio (RAN).
- c) Réseau cœur EPC.

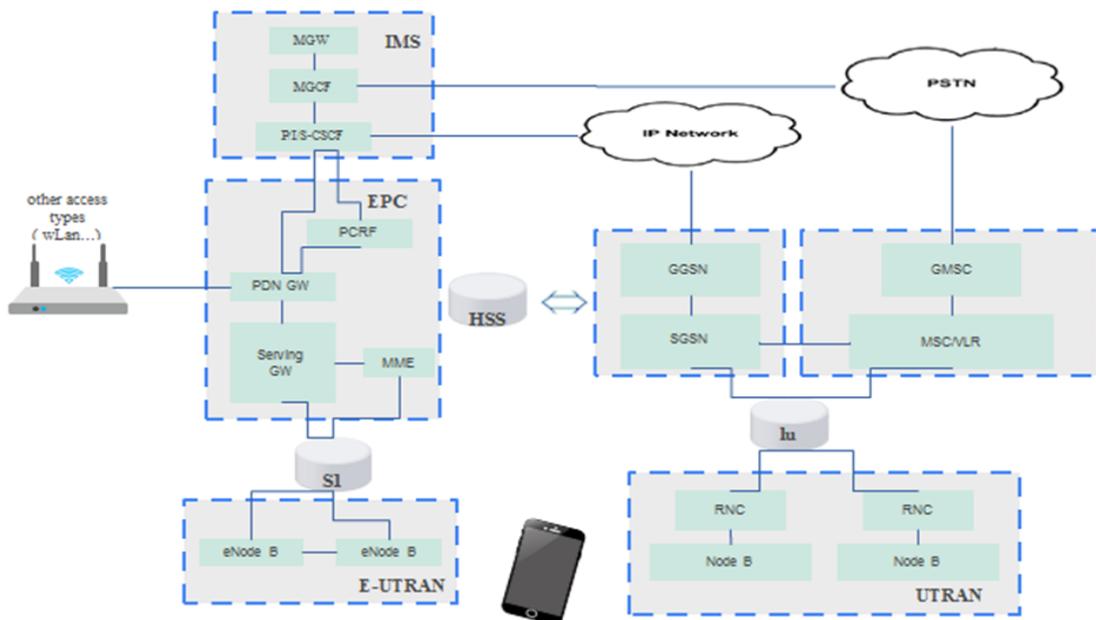


Figure 1-1 : Architecture générale du système LTE [2].

#### 1.4.1.1 Equipement utilisateur

Dans LTE, EU utilise des protocoles appropriés pour communiquer avec E-UTRAN et EPC. La communication du plan utilisateur se termine au niveau eNodeB et prend en charge tous les protocoles du plan utilisateur. Dans le coté plan de contrôle, EU communique avec eNodeB et MME via les protocoles RRC (Radio Resource Control) et NAS (Network Attached Storage) respectivement.

#### 1.4.1.2 Réseau d'accès Evolved-UTRAN

La partie radio du réseau « eUTRAN » est simplifiée par rapport les autres réseaux 2G (BSS) et 3G (UTRAN), par l'intégration dans les stations de base « eNodeB » avec des liaisons en fibres optiques et des liens IP pour connecter les eNodeB entre eux (liens X2).

Ainsi que des fonctions de contrôle précédemment implémentées dans les RNC (Radio Network Controller) des réseaux 3G UMTS. Cette partie est responsable de la gestion des ressources radio, la porteuse, la compression, la sécurité, et la connectivité vers le réseau cœur évolué.

### ❖ eNodeB

L'eNodeB est équivalent à BTS dans le réseau GSM et NodeB dans UMTS, la fonctionnalité de handover est plus puissante dans LTE. Ce sont des antennes qui connectent les UE au réseau central LTE via l'interface radio RF. Ainsi qu'ils fournies la fonctionnalité du contrôleur radio réside dans eNodeB, le résultat est plus efficace et la latence du réseau est moindre, par exemple la mobilité est contrôlée par eNodeB à la place de BSC ou RNC.

#### 1.4.1.3 Réseau cœur EPC

EPC est également appelé SAE (System Architecture Evolution), qui représente le cœur du réseau LTE. Il se compose d'appareils qui prennent en charge les connexions tout IP entre les plusieurs domaines technologiques dans l'architecture 4G. Il assure la gestion des utilisateurs, de la mobilité, de la qualité de service et la gestion de la sécurité, à l'aide des équipements tels que le MME, le SGW, PDN-GW (Packet Data Network Gateway) et le PCRF (Policy and Charging Rules Function), Comme illustré sur la figure 1.2.

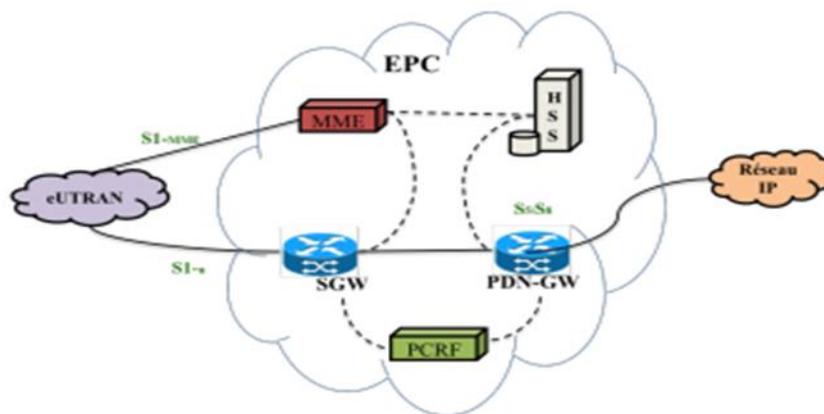


Figure 1-2 : Architecture EPC [3].

### ✓ MME : Mobility Management Entity (3GPP Release 8)

Cette partie est responsable de la localisation et la poursuite du terminal mobile (UE) entre les appels, et de la sélection du S-GW (Serving-GetWay) correct via la connexion.

Comme elle réalise le dernier point de la protection par codage, donc par conséquent c'est le point de vérification de l'interception de la signalisation. Ainsi, qu'elle gère le signal entre le UE (Utilisateur Equipment) et le réseau cœur, et assure l'établissement, la maintenance, et l'élargissement de la porteuse radio services.

### ✓ **SGW: Serving Gateway (3GPP Release 8)**

C'est le point de connexion principal entre le réseau radio accès et le réseau cœur Serving Gateway (SGW) transporter les paquets de données, le maintien de la connexion de l'inter-eNodeB handover, puis inter-système handover entre LTE et GSM/UMTS et la conservation du contexte du terminal mobile (UE), comme les paramètres de la porteuse service et le routage des informations.

### ✓ **PDN-GW: Packet Data Network GateWay (3GPP Release8)**

C'est le transporteur du chemin de données entre l'UE et le PDN, avec trois segments :

- La porteuse radio entre eNodeB et UE.
- La porteuse des données entre SGW et eNodeB.
- La porteuse des données entre PGW et SGW.

### ✓ **HSS : Home Subscriber Service**

Semblable à la base de données HLR du réseau central GSM/WCDMA réseau cœur, elle contient des informations relatives à l'utilisateur (utilisateurs voisins) (les abonnés voisins), et porte l'appel de control et la session management. Elle est Principalement utilisée pour la vérification d'identité, l'autorisation, la sécurité, le débit et pour fournir aux utilisateurs des emplacements détaillés.

### ✓ **P-GW: Packet-Switch GetWay**

Packet-Switch GetWay (P-GW) Fournit une connexion de terminal mobile (UE) au réseau d'informations par paquets externe, attribuer les adresses IP d'un UE, et les applications de la QoS, et maintenir la connexion mobile entre le système LTE/UMTS/GSM et le système non-3GPP.

## 1.5 Les technologies utilisées

La technologie utilisée dans la norme LTE est principalement basée sur l'utilisation de la technologie OFDM et MIMO.

### 1.5.1 La technique OFDM

Le principe de l'OFDM est de répartir les signaux numériques sur un grand nombre de sous-porteuses orthogonales et d'ajouter un préfixe cyclique entre les symboles OFDM pour éviter les interférences.

### 1.5.2 Avantages et inconvénients De l'OFDM

La technologie OFDM est maintenant une technologie populaire qui est adoptée par plusieurs standards. Cette technologie comme toutes technologies de communication, a des avantages et des inconvénients.

Les principaux avantages sont :

- a. L'efficacité spectrale : avec l'OFDM, il est possible d'augmenter le nombre de sous-porteuses utilisées sans augmenter la bande de fréquence utilisée, tant que l'orthogonalité entre les sous-porteuses est maintenue.
- b. Implémentation simple : une implémentation OFDM nécessite une simple FFT.
- c. Complexité réduite du récepteur : l'OFDM convertit un canal sélectif en fréquence, en plusieurs sous canaux planaires, l'égalisation être très simple au niveau du récepteur.

Les principaux inconvénients de l'OFDM sont :

- a. Par rapport à un système monoporteuse, l'apport du pique à la puissance moyenne du signal très élevé: Ceci nécessite des amplificateurs avec une très large plage de linéarité.
- b. Sensibilité aux erreurs de synchronisation de temps et de fréquence.
- c. Pertes en efficacité, due à l'ajout de sous-porteuses virtuelles dans le domaine fréquentiel et à l'ajout d'intervalles de garde dans le domaine temporel.

### 1.5.3 OFDM optique (O-OFDM)

Deux techniques principales classées selon des schémas de détection ont été proposés pour l'O-OFDM. La première technique est la détection directe de l'OFDM optique (DDO-OFDM

: Direct Detection Optical OFDM) et la seconde technique est la détection cohérente de l'OFDM optique (COOFDM : Coherent Detection Optical OFDM).

### 1.5.3.1 OFDM optique à détection directe (DDO-OFDM)

Le système DDO-OFDM a été proposé en 2005 par les deux Professeurs australien Lowery et Armstrong [4-5]. Il se caractérise par l'utilisation d'une seule photodiode pour détecter les signaux O-OFDM au niveau du récepteur (Figure 1.3).

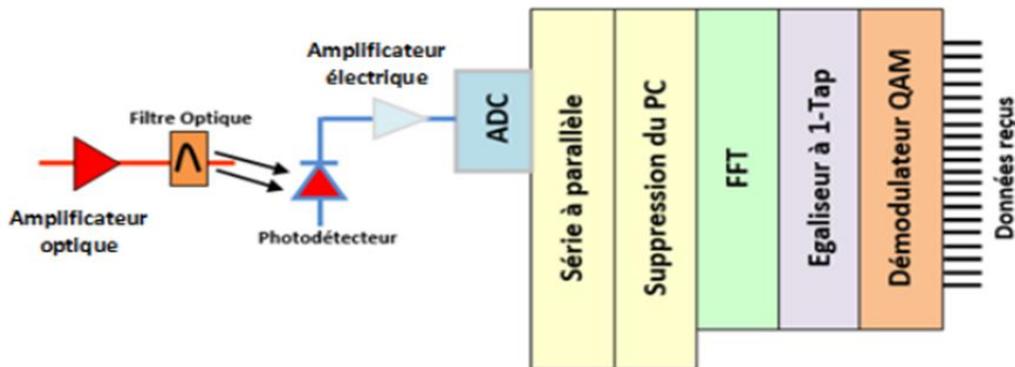


Figure 1-3 : Récepteur du système DDO-OFDM [5].

Comme le laser n'est pas requis pour la réception, la porteuse optique doit être transmise avec le signal OFDM. Généralement, la modulation EO du système DDO-OFDM est obtenue en modulant un bras modulateur externe SD-MZM (Single Drive MZM) ou en modulant deux bras modulateurs externes DD-MZM (Dual Drive-MZM) dont le spectre du signal optique de sortie (Figure 1.4) Il s'agit d'un type double bande latérale (DSB : Double SideBand) ou d'un type simple bande latérale (SSB : Single SideBand) selon la polarisation du modulateur MZM.

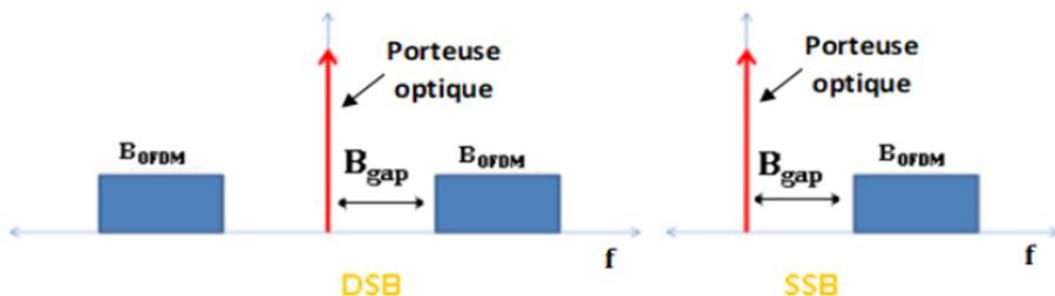


Figure 1-4 : Spectre des signaux DSB et SSB O-OFDM [6].

Avant de transmettre des signaux optiques, le système DDO-OFDM nécessite une bande passante de Protection du spectre  $B_{gap}$  (Figure 1.5) entre la porteuse optique et la bande du signal OFDM qui a pour rôle d'éviter les interférences entre porteuse optique, sous-porteuses et le bruit ASE appelés en anglais SSMI (SSMI : Subcarrier-Subcarrier Mixing Interference) générés lors de l'opération de photo-détection du signal O-OFDM. La largeur de cette bande de garde doit au moins être égale à la largeur de bande OFDM ( $B_{gap} \geq B_{OFDM}$ ).

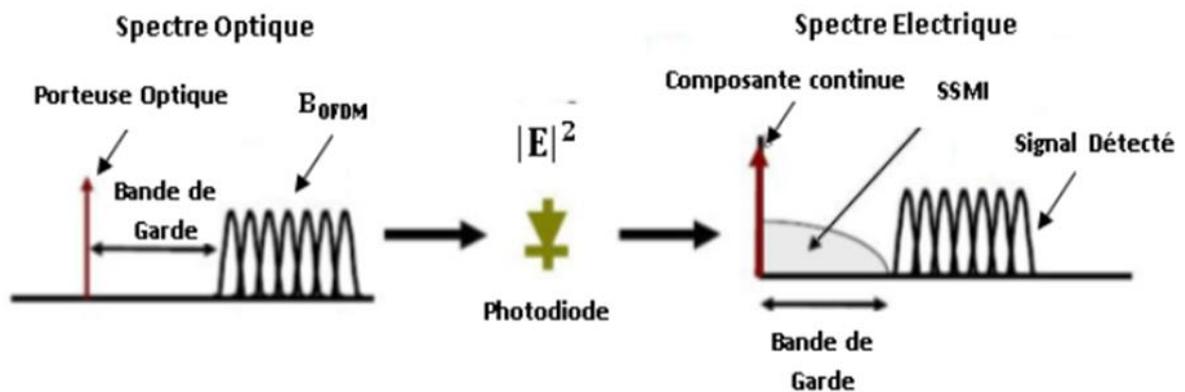


Figure 1-5 : Spectre du signal avant et après la détection directe [6].

### 1.5.3.2 OFDM optique à détection cohérente (CO-OFDM)

Contrairement aux systèmes DDO-OFDM, la porteuse optique utilisée dans un système CO-OFDM n'est pas transmise avec le spectre de l'information, elle est générée localement par un laser avant la photo-détection. De plus, l'utilisation de la détection cohérente permet d'avoir un champ optique linéaire d'où ce qui évite l'insertion d'une bande  $B_{gap}$  [7]. En raison de la sensibilité au bruit de phase, les systèmes CO-OFDM nécessitent des lasers avec une largeur de ligne (en anglais: line width) très étroite. Ceci présente un désavantage de leurs coûts excessifs [8].

## 1.6 La technologie MIMO

La technologie MIMO implique l'utilisation de plusieurs antennes pour la transmission et la réception. L'objectif de la technologie MIMO est d'augmenter le débit, d'augmenter l'efficacité du spectre et de réduire la probabilité de déconnexion de la liaison radio, etc.

Le principe de la technologie MIMO est de transmettre des signaux dans un même canal sur des antennes différents. Même à la réception et avec un nombre spécifique d'antennes et

des traitements Approprié, il s'agit de simuler cette réception dans une même bande de n canaux différents.

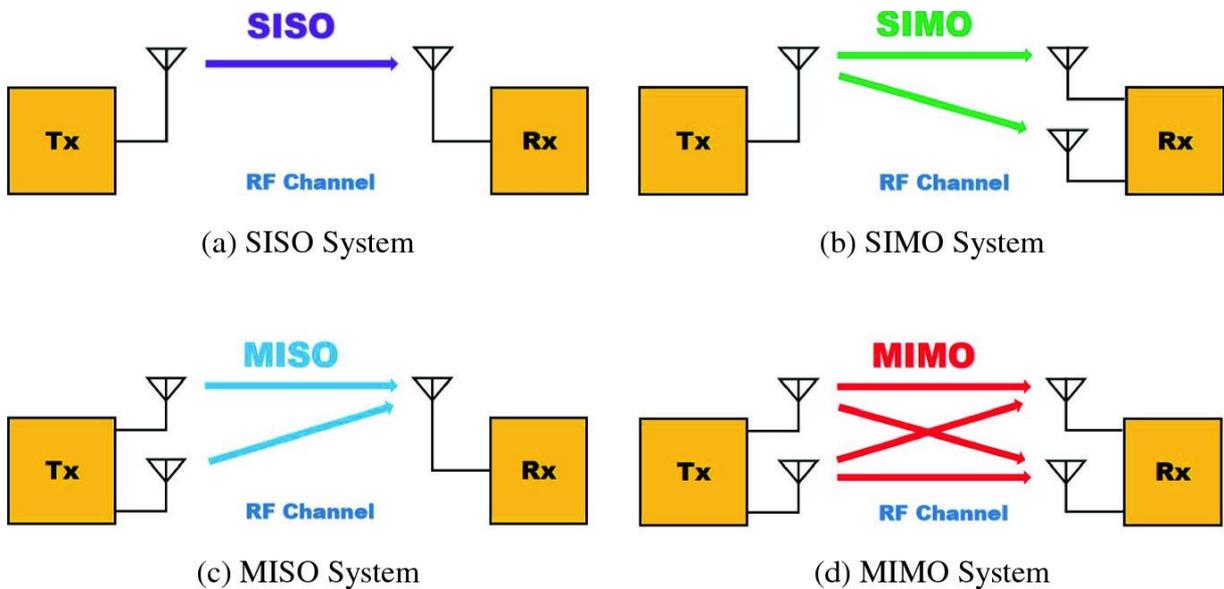


Figure 1-6 : Schéma représentatif des systèmes SISO, SIMO, MISO et MIMO [9].

La technologie MIMO utilise ces différents canaux pour augmenter la vitesse de transmission des données. On peut considérer trois types de MIMO:

- **La diversité spatiale MIMO** : Le même message est transmis simultanément sur différentes antennes à l'émission. Les signaux reçus sur chaque antenne de réception sont ensuite déphasés et additionnés de manière cohérente.
- **Le multiplexage spatial MIMO** : Chaque message est divisé en sous-messages. Les sous-messages différents sont transmis simultanément sur chaque antenne émettrice. Les signaux reçus sur les antennes de réception sont réassembles pour recombinaison l'intégralité du message d'origine.
- **Le MIMO – Beamforming (formation de Faisceau)** : le réseau d'antennes MIMO est utilisé pour diriger et contrôler le faisceau d'onde radio (amplitude et phase du faisceau). On peut ainsi créer des lobes constructifs / destructeurs et optimiser la transmission entre l'émetteur et la cible. La technologie de formation de faisceau peut atteindre une

couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple) et de limiter les interférences.

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur l'étude de la norme LTE 4G. Nous avons commencé par présenter quelques généralités sur les réseaux de quatrième génération LTE, ses architectures, ses techniques de modulations et le concept de la technologie MIMO avec ses avantages et ses inconvénients. Comme nous avons décrit en détail les différentes technologies utilisées.

## 2 Communication optique en espace libre (FSO)

### 2.1 Introduction

Les liaisons optiques atmosphériques, dénomination française de «(F.S.O) », appelées aussi «W.O.C Wireless Optical Communications » [10], une technologie alternative pour les liaisons faisceaux hertziens et les câbles optiques pour répondre à la demande croissante de télécommunications à haut débit. FSO a un taux de transmission qui peut transmettre tous les types de données équivalent à la fibre optique, et une flexibilité et des avantages significatifs par rapport à la technologie sans fil, ainsi que la mobilité de certaines applications.

Le présent chapitre donne des généralités sur la technologie FSO, en présentant son principe, ses avantages et ses limites. Après cela, les différents composants optoélectroniques constituant une liaison optique atmosphérique seront présentées.

### 2.2 Principe de fonctionnement de FSO

Le principe de base de la technologie FSO est qu'un laser en espace libre transmet une partie du spectre visible ou infrarouge. Le système FSO est conçu pour établir une connexion entre deux zones ou des zones différentes à grande vitesse dans la ligne de visée LOS (Line-Of-Sight). Comme le montre la figure 2.2, une liaison FSO nécessite un émetteur, un canal de propagation et un récepteur.

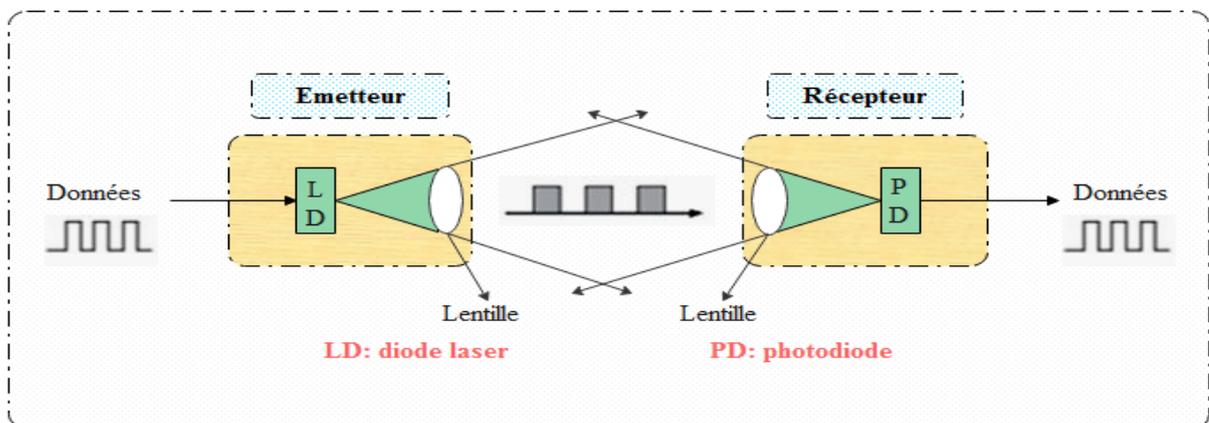


Figure 2-1 : Configuration de base d'une liaison optique en espace libre.

➤ On définit plusieurs bandes :

Le choix de la longueur d'onde dépend en grande partie des effets atmosphériques, atténuation et bruit de fond. De plus, la disponibilité des émetteurs et des composants du récepteur, les règles de sécurité de l'œil humain et les coûts ont un impact significatif sur la sélection de la longueur d'onde dans le processus de conception du FSO.

- Gamme proche infrarouge (NIR) de 750 à 1450 nm, correspondant à une fenêtre de Faible atténuation, principalement utilisé pour la fibre optique.
- La plage infrarouge courte (SIR) de 1400 à 3000 nm dont 1530–1560 nm est une plage spectrale principalement utilisé pour la communication longue distance.
- Gamme Infrarouge moyen (MIR) de 3000 à 8000 nm utilisée dans l'application armée pour guidage de missiles.
- Longue portée infrarouge(LIR) de 8000 nm à 15 m utilisé pour l'imagerie thermique.
- Infrarouge lointain (FIR) les longueurs d'onde NIR et SIR sont les plus utilisé par la plupart des systèmes FSO disponibles dans le commerce. Étant donné que ces longueurs d'onde sont également utilisées dans la communication par fibre optique, leurs composants sont facilement disponibles sur le marché. Le choix de la longueur d'onde de communication FSO doit être sans danger pour les yeux et la peau. Certaines longueurs d'onde comprises entre 400 et 1500 nm peuvent endommager les yeux ou endommager la rétine.

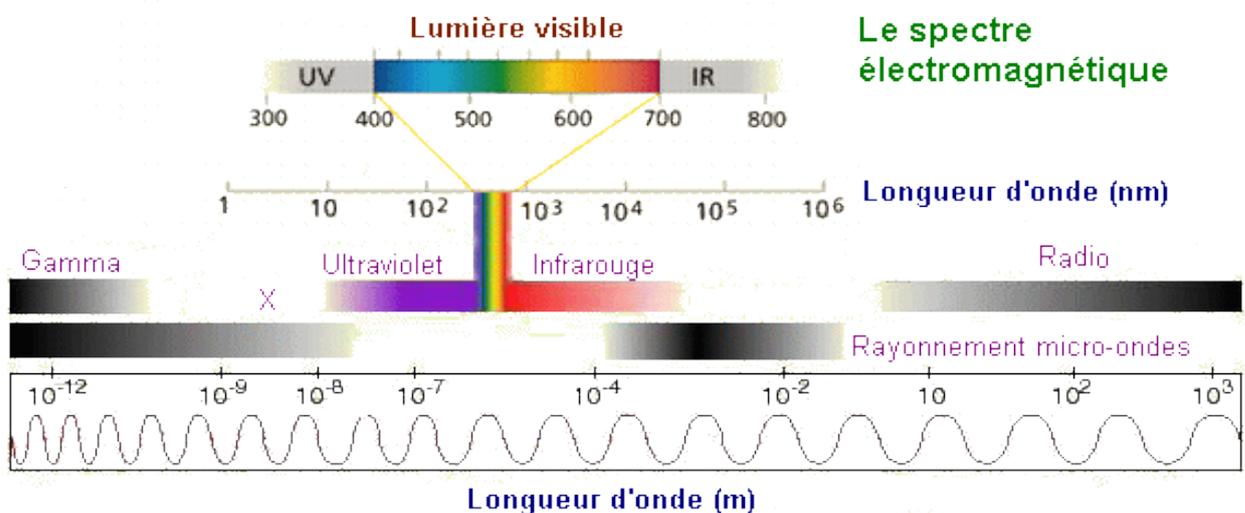


Figure 2-2 : Les différentes zones du spectre lumineux [11].

## 2.3 Caractéristique des dispositifs FSO

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

Les principales caractéristiques de la technologie FSO sont les suivantes:

- Énorme bande passante de modulation : dans tout système de communication, la quantité de données transmises est directement liée à la bande passante de la porteuse modulée. Par conséquent, par rapport à des systèmes basés sur les communications radio fréquence le système FSO garantit une grande capacité d'information.
- Faisceau de taille étroite : le rayonnement optique est connu par son faisceau très étroit, ce qui signifie que la puissance émise est concentrée seulement dans une zone très étroite, ce qui fournit une isolation spatiale suffisante pour la liaison FSO de ses brouilleurs potentiels. Le confinement spatial des rayons optiques rend l'interception des données transmis à travers ces rayons vraiment difficiles par d'autres utilisateurs.
- Performance liée aux conditions climatologiques : les performances des FSO terrestres sont liées aux conditions atmosphériques.
- Un spectre ne nécessitant pas de licence.
- La mise en place de la technologie FSO initiale de coûts est plus faible et le temps de déploiement est plus court

## 2.4 Les avantages et les limites de FSO[12]

1. Facilité de déploiement.
2. Transmission longue distance dispensée de licence, par opposition aux transmissions hertziennes.
3. Haut débit.
4. Faible taux d'erreur.
5. Immunité aux interférences électromagnétiques.
6. Communications full-duplex.

Certains défis environnementaux sont inévitables puisque le moyen de transmission est l'air pour FSO et que la lumière le traverse. La troposphère est la zone où se produisent la plupart des phénomènes atmosphériques. Certaines de ces limitations sont brièvement décrites ci-dessous :

1. Dispersion du faisceau.
2. Absorption atmosphérique.
3. Pluie.
4. Brouillard (10..~100 dB/km d'atténuation).
5. Neige.
6. Chaleur ambiante modifiant l'indice de réfraction du milieu (déformation-déviation du faisceau).
7. Scintillation.
8. Pollution lumineuse parasite.
9. Instabilité du pointage en période venteuse.
10. Pollution atmosphérique.
11. Rayonnement solaire axial gênant la réception.

Ces facteurs causent une atténuation du signal à la réception, conduisant ainsi à une augmentation du taux d'erreurs (bit error ratio (BER)). Pour contourner ces problèmes, des solutions alternatives consistant en des systèmes multi-faisceaux ou multi-trajets ont été développées. Certains appareillages présentent une tolérance supérieure au "fading" (puissance modulable, en cas de pluie, brouillard, fumée...). Pour des raisons de sécurité (risques oculaires), les bons systèmes de transmission optiques laser ont une densité de puissance limitée (lasers classe 1 ou 1M). ). L'atténuation atmosphérique et l'atténuation liée au brouillard sont de nature exponentielle, limitent en pratique les portées de tels systèmes à quelques kilomètres [12].

### **2.5 Les applications des FSO**

La technologie FSO peut facilement compléter d'autres technologies, telles que les communications radiofréquence filaires et sans fil, et la technologie Fibre To The-x (FTTx).

- Prise en charge de la liaison fibre optique: en cas de dommages ou d'indisponibilité de la liaison à fibre optique principal, les liaisons FSO peuvent être utilisées pour fournir des liaisons de secours.
- Liens temporaires : la technologie FSO peut trouver des applications qui nécessitent des liens temporaires, que ce soit pour une conférence ou connectivité ad-hoc dans le cas d'un effondrement d'un réseau de communication existant. Elle est également utilisée pour le remplacement temporaire de la fibre optique, les différentes applications où la fibre optique ne peut pas être utilisée pour une raison quelconque, et le déploiement dans le cas d'installation temporaire pour un chantier ou pour toute autre raison catastrophique.
- Terrain difficile: dans le cas d'une liaison entre deux points séparés par une rivière, une rue très fréquentée, une voie ferrée ou lorsque le droit de passage n'est pas disponible ou trop coûteux à poursuivre, les liaisons FSO présentent un pont de données attractif.
- Télévision haute définition: compte tenu de l'exigence spectrale énorme de caméras haute définition et des signaux de télévision, l'industrie de la radiodiffusion utilise de plus en plus FSO pour transmettre les signaux en direct des caméras haute définition à partir d'emplacements distants vers le bureau central.
- Les communications militaires : En raison de la sécurité, FSO est une méthode de communication intéressante pour les applications militaires. L'utilisation de la radiofréquence (RF) traditionnelle peut intercepter les communications, et ce n'est pas le même cas avec l'optique en espace libre, car les ondes RF sont transmises sur une large plage et qui permet de recevoir le signal dans le voisinage du système, bien que la démodulation et le décodage soient toujours nécessaires.
- liaison de raccordement "Backhaul" de la téléphonie mobile : les liaisons FSO permettent une transmission de donnée intensive pour les liaisons de raccordement entre les stations de base et l'infrastructure des réseaux. Cela permet d'améliorer le réseau sans fil mobile et d'étendre la bande passante du backhaul entre les stations de base.

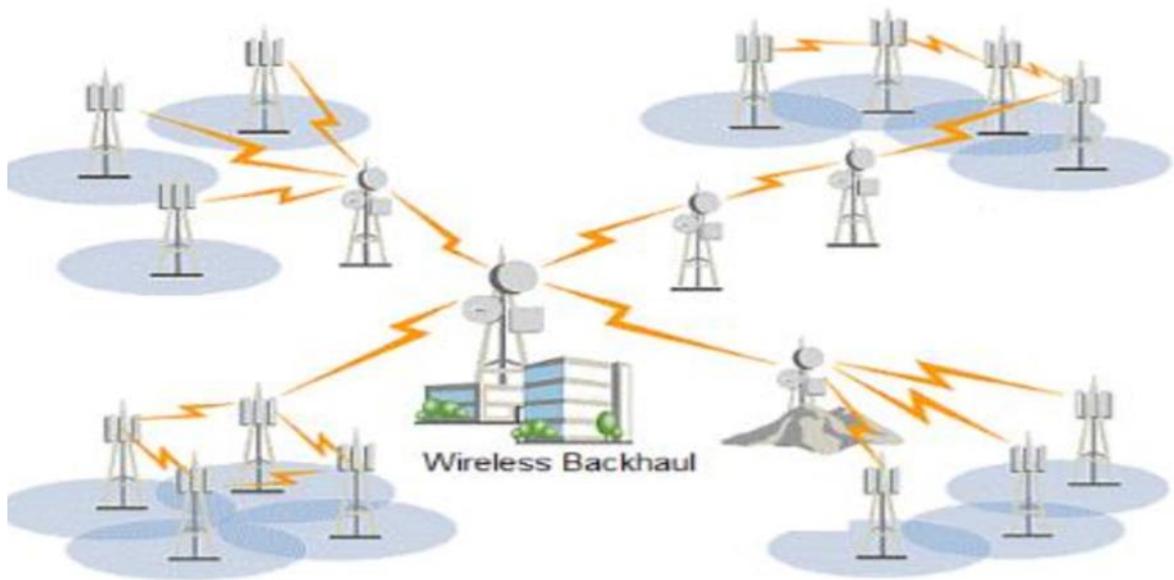


Figure 2-3 : Liaisons de raccordement sans fil "Backhaul" de la téléphonie mobile [13].

## 2.6 Caractéristiques de propagation en espace libre liées au modèle de liaison

### 2.6.1 Propagation par temps clair

Dans le processus de propagation des ondes optiques, il se produit un affaiblissement atmosphérique en plus de ce que l'on appelle l'affaiblissement en espace libre y compris par temps clair. Cet affaiblissement atmosphérique  $L_{\text{atm}}$  est causé par la diffusion Rayleigh et/ou par l'absorption moléculaire, et son influence dépend largement de la longueur d'onde. De plus, la puissance reçue fluctue en raison de la turbulence associée au gradient de température atmosphérique, ce qui entraîne une courbure du faisceau, une «danse» du faisceau ou une scintillation dans le chemin de propagation des ondes optiques [14].

### 2.6.2 Effet du brouillard

#### 2.6.2.1 Estimation de l'atténuation du brouillard en fonction de la visibilité

##### Atmosphérique

L'atténuation du brouillard est causée par la diffusion de Mie, qui dépend du nombre de particules (densité du brouillard). Il est souvent difficile de mesurer directement la densité du brouillard ou d'obtenir des données statistiques. L'effet de l'atténuation du brouillard  $Att_{\text{fog}}$  (dB/km) peut être lié à la visibilité atmosphérique  $V$  (km), définie comme étant la distance maximale à laquelle les objets noirs peuvent être identifiés depuis le ciel. Elle est mesurée à

l'aide d'un transmissomètre ou d'un diffusiomètre. Habituellement, la mesure de la visibilité ( $V$ ) est donnée par la distance à laquelle la puissance optique transmise n'est plus que de  $\varepsilon$  fois sa valeur initiale. Dans la littérature, nous avons trouvé les deux valeurs suivantes de  $\varepsilon$ : 0,02 et 0,05.

La relation entre  $Att_{fog}$  et  $V$  peut être exprimée par la formule suivante, qui s'applique à tout type de brouillard et à toute longueur d'onde optique, pour une visibilité  $V$  inférieure à 3 km.

$$Att_{fog} = 10 \log_{10} (\varepsilon) / V \quad 2-1$$

La figure 2.5 illustre la relation entre  $Att_{fog}$  et  $V$  pour les données mesurées.

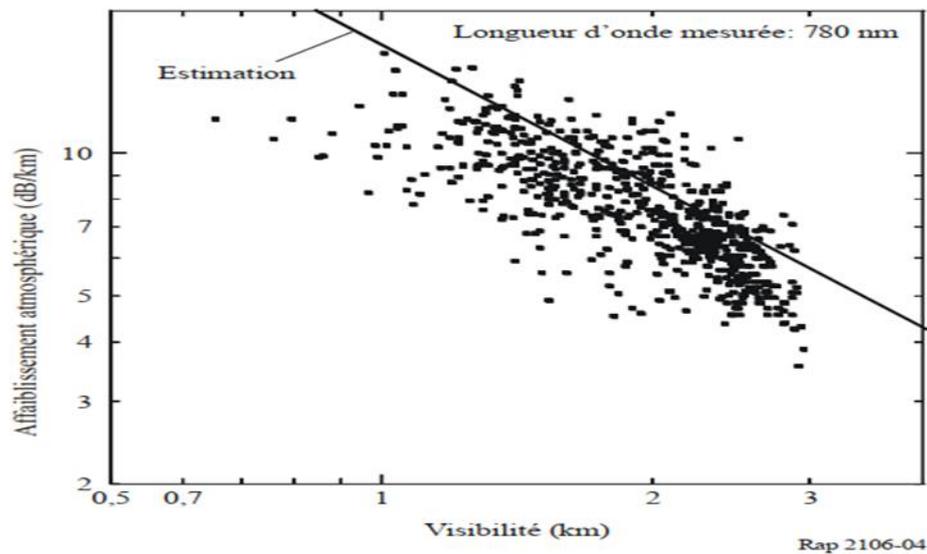


Figure 2-4 : L'atténuation atmosphérique due au brouillard [14].

### 2.6.3 Effet de la pluie

Dans le cas de la pluie, l'atténuation est causée par la diffusion géométrique due aux gouttes de pluie. Indépendant de la longueur d'onde, cette atténuation  $Att_{rain}$  (dB/km) est exprimée en fonction de la distribution de la taille des gouttes de pluie  $f(r)$  comme suit:

$$Att_{rain} = 27,29 \times 10^5 \cdot \int_0^{\infty} r^2 \cdot f(r) dr \quad 22-2$$

où:

$r$ : diamètre des gouttes de pluie (m)

Pour un emplacement et une longueur de lien donnés,  $fI$  peut être exprimé en fonction des données statistiques de l'intensité de pluie  $R$  (en mm/h) par la relation suivante:

$$fI = B \exp(CR^k r) \quad 2-3$$

Les paramètres utilisés dans la formule (2.3) sont par exemple les suivants, conformément aux statistiques recueillies au Japon :Exemple (basé sur le modèle de Marshall et Palmer);  $B = 0,16$ ,  $C = -82$  et  $k = -0,21$ .

Les formules (2.3) et (2.4) permettent alors de déterminer d'une manière générale l'effet d'Attrain en fonction de l'intensité de précipitation  $R$  (mm/h).

$$Attrain = \alpha * R^\beta \quad 2-4$$

L'intensité de pluie est le paramètre fondamental utilisé pour décrire localement la pluie. Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont donnés en fonction de l'emplacement (voir le Tableau 2.2). Les paramètres obtenus en France sont conformes à ceux qui sont donnés dans la Recommandation UIT-R P.1814.

**Tableau 2-1 :** Exemples de paramètres utilisés pour estimer l'affaiblissement dû à la pluie.

<i>Emplacement</i>	$\alpha$	$\beta$
<i>Japon</i>	1,58	0,63
<i>France</i>	1,076	0,67

L'intensité de pluie est mesurée directement au moyen de pluviomètres ou au moyen de radars météorologiques [14].

### 2.6.4 Affaiblissement dû à la neige

L'affaiblissement dû à la neige est fonction de la longueur d'onde  $\lambda_{nm}$  et de l'intensité de précipitation  $s$  (mm/h). Il est donné par :

– Neige humide (altitude < 500 m):

$$Attsnow = (0,0001023 * \lambda_{nm} + 3,7855466) * S 0,72 \frac{dB}{km} 2 \quad 2-5$$

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

$$Attsnow = (0,0000542 * \lambda_{nm} + 5,4958776) * S 1,38 \frac{dB}{km} 2 \quad 2-6$$

L'intensité des précipitations de neige  $S$  est le paramètre fondamental utilisé pour décrire localement la neige [14].

## 2.7 L'émission et la réception optique dans les systèmes FSO

- **L'émetteur FSO**

Le module d'émetteur, généralement noté Tx, constitué d'un driver et d'une source laser ou d'une DEL, module la source de données sur la porteuse optique. Il convertit le signal électrique modulé en un signal optique. Cependant, le signal se propage ensuite à travers l'atmosphère jusqu'au récepteur. Le récepteur détecte l'onde modulée et récupère les données émises. La plupart des systèmes FSO sont conçus pour fonctionner dans les fenêtres de 780 – 850 nm et 1520 - 1600 nm, ce qui correspond à des fréquences de transmission des données autour de 200 THz. Figure 2.5 illustre un schéma d'un module émetteur de transmission optique en espace libre.

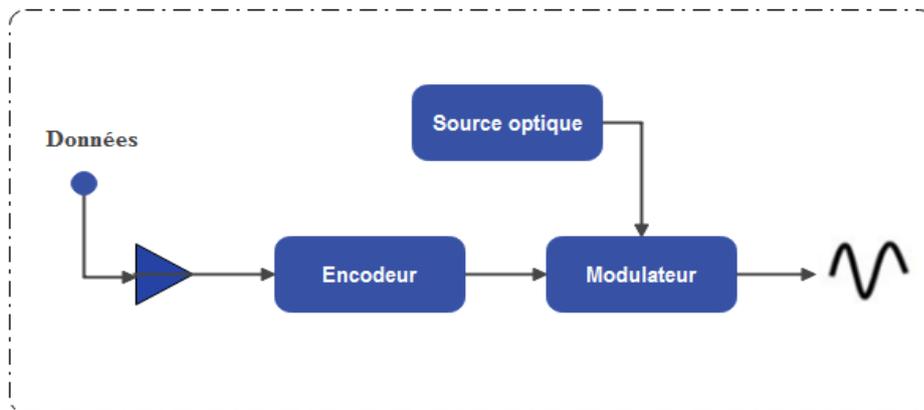


Figure 2-5 : Synoptique d'un module d'émetteur FSO.

- **La récepteur FSO**

Comme les modules d'émission, l'interface du module récepteur est chargée de convertir les signaux optiques en signaux électriques, en lui apportant le minimum de dégradation possible. Ce rôle est joué par le photodétecteur qui se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. Le premier attribut requis pour un photodétecteur est la sensibilité à la longueur d'onde utilisée, le second, la rapidité et le troisième est l'entrée de bruit minimale. Figure 2.6 présente le principe général de la réception optique.

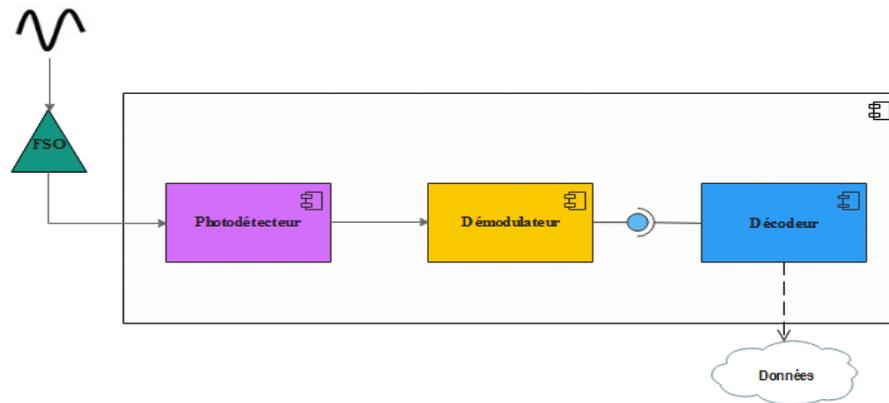


Figure 2-6 : Module de réception optique.

Le photodétecteur est un semi-conducteur à jonction PN polarisé en inverse, qui convertit le signal optique reçu (photon) en un signal électrique par effet photoélectrique.

Les photodiodes peuvent être divisées en deux catégories : l'une est sans gain interne PN et PIN (Positive Intrinsic Negative Photodiodes), et l'autre est avec gain interne à avalanche APD (Avalanche Photo Diode) qui émet un courant proportionnel à la puissance optique incidente. Ce sont des composants semi-conducteurs qui réagissent à l'intrusion de photons dans la zone de jonction PN en déclenchant une avalanche électronique. Ce phénomène génère un courant important à partir de quelques photons incidents.

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différentes caractéristiques qui font de la technologie FSO appropriée pour une utilisation dans des réseaux d'accès, les domaines d'utilisation des systèmes FSOs. En outre, les grands défis de la liaison FSO tels que la pluie, le brouillard, et etc., ont également été introduits dans ce chapitre. Dans le chapitre suivant, nous allons établir une chaîne de transmission à base de la technologie FSO.

## Conclusion Générale

---

Depuis plusieurs décennies, les techniques numériques sont à la base des systèmes de communications sans fil modernes. Aujourd'hui la technologie de la transmission ne cesse d'évoluer, et pour suivre la vitesse de son développement il faudrait d'abord comprendre les aspects et les concepts fondamentaux des systèmes des technologies qui y sont associées appréhendé et leur application.

L'étude de simulation abordée dans notre mémoire, nous a montré que pour tenir compte des nouveaux besoins en termes de connectivité, il serait primordial de mesurer la rapidité des techniques et technologies émergentes dans les réseaux sans fil de nouvelles générations, à savoir la 4G, afin de suivre son évolution. Et malgré les difficultés que nous avons rencontrées lors de l'observation et la reformulation des résultats de la simulation, nous avons pu déduire les seuils d'application des signaux pour une bonne transmission

## Références Bibliographiques

---

- [1] Boudinar, S.Essaadi, F, GSM-UMTS-LTE. H. Poor, An Introduction to Signal Detection and Estimation. Chapter book, New York: Springer-Verlag. 2011
- [2] Bouchentouf, H. Boudghene, S. R. Etude Des Performances Des Réseaux 4G (LTE) : Faculte de technologie, mémoire de master, (GEE), 2013.
- [3] Djellad, S. Optimisation du Handover dans le réseau 4G avec la logique flou. Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2019.
- [4] A. Lowery and J. Armstrong, "10 Gbit/s multimode fiber link using power- efficient orthogonal-frequency-division-multiplexing," *Optics Express*, vol. 13, no. 25, pp. 10003-10009, 2005.
- [5] B. J. C. Schmidt, A. J. Lowery and J. Armstrong, "Experimental demonstrations of electronic dispersion compensation for long-haul transmission using direct-detection optical OFDM," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 196-203,2008.
- [6] J. M. P. Rosas, «Optical orthogonal frequency division systems with direct detection receivers» Thèse de Doctorat, UniversitéPolytechnique de Catalogne, 2013.
- [7] A. S. Al Shantti, «Optical orthogonal frequency division multiplexing direct detection forimproving capacity of radio over fiber trasmission system» Thèse de Doctorat, Université Islamic de Gaza, 2012.
- [8] O. O. Omomukuyo, «Orthogonal frequency division multiplexing for optical access networks» Thèse de Doctorat, Université College de Londres, 2013.
- [9] Site web: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-6390-4\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-6390-4_1).
- [10] Mohammed O. Zaatari, “Wireless Optical Communications Systems in Enterprise Networks.
- [11] Site web: <http://www.cosmovisions.com/spectre.htm>.
- [12] Site web: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Communications\\_optiques\\_en\\_espace\\_libre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Communications_optiques_en_espace_libre).

- [13] Yassine H. et Ilyas B. Étude et évaluation des performances d'un système de communication sans fil optique en espace libre (FSO). CHLEF: Faculté de Technologie, Département d'Electronique.
- [14] UIT-R. (2007), RAPPORT UIT-R F.2106: Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre.
- [15] CASSAN E., «Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples, J3eA Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, EDP Sciences, 2002.
- [16] A. Bouarfa M. Kandouci A. Garadi and H. Djellab PIIN Cancellation Using a Novel Receiving Architecture for Spectral/Spatial SAC-OCDMA SystemJournal of Optical Communications, eISSN 2191-6322, ISSN 0173-4911,