

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 أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : (Réseaux et Systèmes de Télécommunications)

Par : **MELLOUK Abdellatif** et **ZIANI Oualid Farid**

Sujet

Analyse des performances d'un système de communication
optique en utilisant différents canaux : FSO, OWC et SMF

Soutenu publiquement, le **08 / 06 / 2017** , devant le jury composé de :

Mr A.R. BORSALI	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Président
Mr S.KAMECHE	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr H.E.ADARDOUR	Docteur	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
Mr S.H.IRID	Maître Assistant	Univ. Tlemcen	Examineur

A mes parents,

A toute la famille...

Remerciements

Ce travail de projet de fin d'études a été effectué au sein du laboratoire des Systèmes et Technologies de l'information et de la Communication (STIC) de la Faculté de Technologie à l'Université Abou-Bekr Belkaïd Tlemcen.

On voudrait tout d'abord remercier sincèrement notre Encadreur Monsieur Samir KAMECHE, Maître de Conférences classe A à l'Université de Tlemcen, non seulement pour son encadrement actif mais aussi pour sa grande disponibilité, sa patience, ainsi que pour la générosité avec laquelle il a su partager ses connaissances et conseils.

Au terme de ce projet, on tient à remercier Monsieur Haroun Errachid ADARDOUR, Docteur à l'Université de Tlemcen, pour la qualité de son Co-encadrement, son soutien et ses directives précieuses pendant toute la durée de ce travail.

Nos remerciements les plus respectueux s'adressent à Monsieur BORSALI Ahmed Riad, Maître de Conférences classe A à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de présider le jury de ce Mémoire.

Nous exprimons également notre reconnaissance à Monsieur Sidi Mohammed IRID, Maître Assistant classe A à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner et de juger les travaux de ce Mémoire.

Enfin, que nos parents, nos familles et nos amis trouvent à travers ces quelques lignes l'expression de notre profonde gratitude pour leur soutien et leurs encouragements de tous les instants. On vous en remercie chaleureusement.

Résumé

La turbulence atmosphérique (perturbation due à la pluie, le brouillard, etc.) est un problème majeur dans les systèmes de communications optiques. Dans ce travail, on va présenter une analyse précise des performances d'un système de communication optique via trois canaux différents, tel que : un canal FSO (communication optique en espace libre), un canal OWC (communication optique sans fil) et un canal SMF (fibre optique monomode). Une étude comparative des performances entre les trois systèmes sera établie.

La qualité de l'information d'un réseau optique sera évaluée par les indicateurs suivants : le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur de qualité Q.

Mots clés : Transmission optique, FSO, OWC, SMF, BER et facteur de Qualité.

Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Sigles et abréviation	vi
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xii

Introduction générale	2
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les composants optoélectroniques

I.1 Introduction.....	5
I.2 Guide d'onde optique	5
I.3 Systèmes de transmission optique.....	5
I.4 Emetteurs optoélectroniques	6
I.4.1 Principe d'un émetteur optique.....	6
I.4.2 Les sources optiques.....	7
I.4.2.1 Diode laser (DL)	7
I.4.2.2 Diode DEL (électroluminescentes)	7
I.4.3 Les fenêtres de transmission optique.....	8
I.4.4 Modulateurs optiques.....	8
I.5 Amplificateur optique	9
I.5.1 Les différentes configurations pour des amplificateurs optiques	10
I.5.2 Comparaison des amplificateurs optiques.....	11
I.6 Récepteurs optoélectroniques	12
I.6.1 Le module de réception	12
I.6.2 Photo-détecteur.....	13
I.6.1.2 Photodiode PIN.....	13
I.6.1.2 Photodiode APD.....	13
I.7 Conclusion	14

Chapitre II : Comparaison entre les trois canaux : FSO, OWC et SMF

II.1 Introduction.....	16
II.2 Technologie FSO (Free Space Optics)	16
II.2.1 Principe de fonctionnement de FSO	17
II.2.2 Caractéristique des dispositifs FSO	19
II.2.3 Les avantages et les limites de FSO	20
II.2.4 Les applications des FSOs	21
II.2.5 Canal de transmission FSO	21
II.2.6 Les paramètres d'une liaison FSO.....	22
II.3 Technologie FO (Fibre Optique).....	23
II.3.1 Caractéristiques de la fibre optique.....	24
II.3.2 Les avantages et inconvénients de FO	24
II.3.3 Notions importantes	25
II.3.3.1 Réflexion Totale.....	25
II.3.3.2 Ouverture Numérique (ON)	26
II.3.3.3 Les Modes de Propagation	26
II.3.3.4 La Bande Passante.....	27
II.3.3.5 Atténuation	27
II.3.4 Les Différentes Fibres Optiques (FO)	29
II.3.4.1 FO Multimode	29
II.3.4.2 FO Monomode.....	30
II.3.5 Types de fibres monomodes.....	31
II.3.5.1 Fibre standard.....	31
II.3.5.2 Fibre à dispersion décalée.....	32
II.3.5.3 Fibre à dispersion décalée non nulle	32
II.4 Technologie OWC (Optical Wireless Communication)	33
II.4.1 Domaines d'applications existantes	34
II.4.1.1 Fibre à dispersion décalée non nulle	34
II.4.2 Avantages.....	37
II.4.3 Inconvénients.....	37
II.5 Conclusion	38

Chapitre III : Résultats et Interprétations

III.1 Introduction	40
III.2 Performance d'une liaison optique à haute débit.....	40
III.3 Présentation du logiciel OptiSystem	41
III.3.1 Optiwave : un logiciel complet pour la simulation optique	41

III.3.2 Les principaux avantages	42
III.3.3 Edition et simulation	43
III.4 Résultats de simulation et interprétations	45
III.4.1 Étude et évaluation de la performance d'un système de communication optique en utilisant différents canaux	45
III.4.1.1 Premier scénario	45
III.4.1.2 Résultats et discussions de premier scénario.....	48
III.4.1.2.1 Variation de puissance d'émission OLT.....	48
III.4.1.2.2 Variation de débit d'une liaison optique.....	54
III.4.2 Étude et évaluation de la performance d'un système de communication optique P2P en utilisant un canal SMF-FSO-SMF.....	57
III.4.2.1 Deuxième scénario	57
III.4.2.2 Résultats et discussions de deuxième scénario	59
III.5 Conclusion.....	63
Conclusion Générale.....	65
Références Bibliographiques.....	68

Sigle & abréviation

A

APD **Avalanche Photo Diode**

B

BER **Bit Error Ratio**

D

DCF **Dispersion Compensating Fiber**

DEL **Diode Electro Luminescente**

DL **Diode Laser**

DSF **Dispersion Shifted Fiber**

E

EAM **Electro-Absorption Modulator**

EDFA **Erbium-Doped Fiber Amplifiers**

F

FO **Fibre Optique**

FSO **Free Space Optics**

G

GSM **Global System Mobile**

L

LAN **Local Area Network**

LOS **Line-Of-Sight**

M

MZM Mach-Zehnder Modulator

N

NZ-DSFN Non Zero-Dispersion Shifted Fiber

NRZ No Return to Zero

O

OLT Optical Line Terminal

ON Ouverture Numérique

ONU Optical Network Unit

OWC Optical Wireless Communication

P

PIN Positive Intrinsic Negative

PoC Post-Compensation

PRBS Pseudo-Random Binary Sequence

R

RF Radio Fréquence

RZ Return to Zero

S

SMF Simple Mode Fiber

SOA Semi-conducteur Optical Amplifiers

T

TEB Taux Erreur Binaire

U

UIT	Union International de Télécommunication
UV	Ultra Violet
UVC	Ultra Violet Communications

V

VLC	Visible Light Communications
------------	-------------------------------------

W

WDM	Wavelength Division Multiplexing
------------	---

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1. Schéma de principe d'un système de transmission optique	6
Figure I.2. Structure d'un émetteur optique.....	6
Figure I.3. Spectre d'émission d'une diode laser	7
Figure I.4. Spectre d'émission d'une diode DEL.....	8
Figure I.5. Types de configuration d'un amplificateur optique.	10
Figure I.6. Schéma d'un récepteur de données à détection directe.....	12

Chapitre II

Figure II.1. Structure d'une liaison FSO utilisée pour raccorder deux réseaux locaux	16
Figure II.2. Configuration de base d'une liaison optique en espace libre	17
Figure II.3. Exemple de terminal de transmission optique en espace libre.	17
Figure II.4. Communication FSO	18
Figure II.5. Topologies de réseaux optiques en espace libre.....	19
Figure II.6. Structure d'une fibre optique	23
Figure II.7. Réflexion Totale.....	25
Figure II.8. Ouverture Numérique.....	26
Figure II.9. Types de Modes.....	26
Figure II.10. L'atténuation spectrale d'une fibre optique	28
Figure II.11. Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à saut d'indice.	29
Figure II.12. Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à gradient.....	30
Figure II.13. Propagation des ondes dans une fibre optique monomode.	31
Figure II.14. Dispersion chromatique des fibres monomodes	32
Figure II.15. Les applications OWC en fonction de la portée de transmission.....	34

Figure II.16. Liaisons LAN-OWC : réseau véhiculaire utilisant la technologie VLC où les véhicules communiquent entre eux à base des LEDs (applications moyennes portées OWC)	35
Figure II.17. Liaisons LAN-OWC, un point d'accès VLC où le récepteur VLC sous la forme d'un dongle USB communique avec la lampe de bureau agissant comme émetteur VLC (applications moyennes portées OWC).....	35
Figure II.18. WBAN optique en espace libre : application biomédicale mesure le cardio-stress (applications courtes portées OWC).....	36
Figure II.19. Liaison OWC : l'application peut être déployée pour prendre en charge les communications aéronautiques, avion-à-HAP, aéronautique / satellite / station de base (applications longues portées OWC).....	36
Figure II.20. L'interconnexion optique en espace libre entre les circuits intégrée (applications ultra-courtes portées OWC).....	37

Chapitre III

Figure III.1. Diagramme de l'œil d'une transmission par fibre optique.....	41
Figure III.2. Optiwave : l'interface graphique de l'utilisateur, la bibliothèque des composants, l'éditeur de disposition et les outils de la visualisation.....	41
Figure III.3. Les sous fenêtres d'OptiSystem.	42
Figure III.4. Le paramétrage d'un composant.....	43
Figure III.5. Modification des paramètres globale du layout.....	43
Figure III.6. Démarrage de la simulation.	44
Figure III.7. Affichage des résultats de la simulation.....	44
Figure III.8. Conception du système proposé pour le premier scénario	45
Figure III.9. Schéma du bloc d'un émetteur optique OLT	46
Figure III.10. Schéma du bloc d'un récepteur optique ONU.	47
Figure III.11. BER vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-FSO..	48
Figure III.12. Facteur-Q vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-FSO.	49

Figure III.13. BER vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-OWC.....	50
Figure III.14. Facteur-Q vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-OWC.....	51
Figure III.15. BER vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ.....	52
Figure III.16. Facteur-Q vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-SMF.....	53
Figure III.17. BER vs débit pour un format de modulation NRZ.....	55
Figure III.18. Facteur-Q vs débit pour un format de modulation NRZ.....	55
Figure III.19. Diagramme de l'œil : FSO, SMF et OWC.	56
Figure III.20. Conception du système proposée de deuxième scénario.	57
Figure III.21. Liaison de transmission sans compensation.....	58
Figure III.22. BER vs débit sans compensation	59
Figure III.23. Facteur-Q vs débit sans compensation.	60
Figure III.24. Liaison de transmission avec compensation en utilisant DCF.....	61
Figure III.25. La qualité de transmission avec la compensation de la dispersion chromatique.	62

Liste des Tableaux

Tableau I.1. Performances des trois configurations d'amplificateurs.....	11
Tableau I.2. Caractéristiques comparées des amplificateurs optiques	11
Tableau II.1. Caractéristiques de base pour des Systèmes FSOs	20
Tableau III.1. Paramètres de simulation pour le premier scénario.	47
Tableau III.2. Valeurs de BER et de puissance optique à 2.75 dB/Km pour # canaux avec une modulation NRZ.....	54
Tableau III.3. Paramètres de simulation pour deuxième scénario.	58
Tableau III.4. Les résultats obtenus sans et avec la compensation.....	61

Introduction générale

Il n'y a pas si longtemps, lorsque les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à un débit de 270Mbits/s, le câble coaxial était parfait pour remplir son rôle de support de transmission. Mais avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, et une alternative au câble coaxial était à trouver : pertes trop élevées, courtes distances de propagation, performances limitées. La fibre optique remplit très bien ce rôle de support de transmission. Son utilisation est désormais courante dans les réseaux de télécommunications.

Mais aujourd'hui, l'essor de l'Internet est tel que l'évolution des systèmes de télécommunications tend toujours vers une augmentation des capacités de transmission. La difficulté majeure ne réside plus vraiment sur le support, possédant une large bande passante et de faibles atténuations, mais sur les modules d'émission et de réception, regroupant l'électronique rapide et les fonctions optoélectroniques.

Historiquement, les technologies de télécommunications optiques visent donc en premier lieu à transmettre des données et de l'information avec des débits très élevés. Le développement des télécommunications s'est caractérisé par l'utilisation d'un domaine de fréquences de plus en plus vaste, depuis les quelques kilohertz des premières lignes téléphoniques jusqu'aux quelques dizaines de gigahertz des liaisons radio. Il était donc, a priori, logique que la lumière puisse être utilisée afin de prolonger le spectre. Elle ne pouvait cependant devenir un moyen de télécommunication que dans la mesure où il était possible de moduler une source optique à des fréquences élevées et de transmettre les signaux sur un support stable et peu atténuant. Le premier problème a été résolu par la mise en point des dispositifs à semi-conducteurs comme les lasers et le second pour les fibres optiques.

L'objectif de notre travail est d'étudier et évaluer les performances d'un système de communication optique en utilisant différents canaux : FSO, OWC et SMF sous le logiciel OPTISYSTEM. Toute cette étude est organisée dans un document comportant trois chapitres, en plus d'une introduction générale, d'une conclusion générale, des perspectives et une bibliographie récente.

Dans le premier chapitre, nous allons décrire les différents composants qui entrent dans le cadre de la réalisation des liaisons de transmission par fibre optique et un rappel sur les différents types de sources optiques.

Le deuxième chapitre a pour objectif de présenter une comparaison entre les trois différentes technologies FSO, SMF et OWC.

Le troisième chapitre présentera le logiciel de simulation OptiSystem qu'on a utilisé pour les mesures de notre liaison sur les différents canaux et l'étude détaillée des composants qui nous, on permet d'avoir une connaissance sur la transmission du signal dans chaque partie de notre liaison optique.

Enfin, une conclusion qui permettra de tirer le bilan des travaux effectués avec une synthèse des résultats des choix effectués pour la conception d'un système optique à très haut débit et une ouverture vers des travaux futurs.

CHAPITRE I

Généralités sur les composants
optoélectroniques

I.1 Introduction

La transmission optique est devenue une technique courante et éprouvée dans les domaines de télécommunications. L'utilisation des guides d'ondes optiques représente le mode de transmission le plus fiable et le plus économique lorsqu'il s'agit d'acheminer des débits élevés sur des liaisons longues distances (par exemple, une fibre optique). Ce chapitre sera consacré à décrire des différents composants optoélectroniques qui constituent une liaison optique.

I.2 Guide d'onde optique

L'idée de la transmission d'informations via une guide d'onde optique est d'utiliser la lumière pour transporter des informations numériques. Ces informations sont codées initialement sous la forme d'un signal électrique binaire qui évolue temporellement à une certaine cadence, appelée fréquence d'information. La fréquence d'information d'un signal numérique binaire caractérise le nombre maximal de transitions entre ses deux états que peut observer le signal en une seconde. Elle est égale au débit binaire B , qui caractérise le nombre de bits transmis par ce signal en une seconde. Pour effectuer la conversion du signal électrique en signal optique, il suffit de moduler une onde porteuse optique à partir du signal électrique binaire comportant l'information numérique à transmettre. Cette modulation s'effectue selon un format de modulation choisi [1].

I.3 Systèmes de transmission optique

La figure I.1 illustre le schéma de principe d'un système de transmission via un canal optique, ou système de transmission optique. Tous les systèmes se composent d'un bloc émetteur, un canal optique, et d'un bloc récepteur. Le rôle d'un tel système est tout d'abord, au niveau de l'émetteur, d'émettre un signal optique continu et de le moduler en fonction des données binaires et du format choisi. Ensuite, il a bien sûr pour autre objectif de faire propager ce signal optique sur une distance donnée, par le biais d'un canal optique formé d'une fibre optique ou un espace libre. Enfin, au niveau du récepteur, ce signal optique est détecté après la transmission pour être reconverti en signal binaire électrique [1].

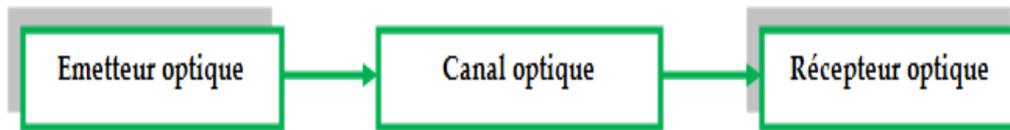


Figure I.1. Schéma de principe d'un système de transmission optique [1].

Nous allons décrire ici les deux parties essentielles d'un système de transmission optique, à savoir : l'émetteur et le récepteur optique. Par contre, le canal optique sera décrit selon leurs types au chapitre suivant. Vous pouvez trouver aussi d'autres composants optoélectroniques.

I.4 Emetteurs optoélectroniques

I.4.1 Principe d'un émetteur optique

Le choix d'un émetteur optique (voir figure I.2) s'est porté principalement sur les semi-conducteurs vus de leurs faibles dimensions et leurs grandes fiabilités de transmissions.

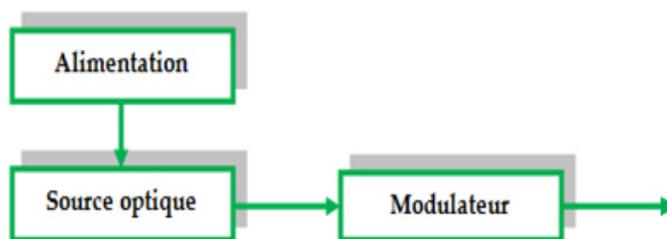


Figure I.2. Structure d'un émetteur optique [2].

Dans les systèmes de transmission optique, l'émetteur est tout d'abord constitué d'un laser (souvent, on trouve une diode laser) émettant en continu à une certaine longueur d'onde (λ) et à une certaine puissance (P). La puissance d'un signal lumineux s'exprime en mW, mais dans l'usage, elle sera la plupart du temps exprimée en décibels-milliwatts (dBm), échelle en décibels dotée d'une référence absolue à 1 mW (voir l'équation I.1) [1,2].

$$P_{[\text{dBm}]} = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_{[\text{mW}]}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (\text{I.1})$$

I.4.2 Les sources optiques

Les sources optoélectroniques sont des composants actifs dans le domaine de télécommunication optique. La conversion du signal électrique en signal optique (conversion électro-photon) est effectuée via des sources optiques telles que les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL), ces deux sources sont réalisées à partir de jonction PN polarisée en direct, le principe d'émission est dû à la recombinaison des paires électron-trou. En télécommunication optique, la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix des sources à spectres réduits [2].

I.4.2.1 Diode laser (DL)

Une diode laser est une source cohérente, et monochromatique. Elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance, elle présente une faible largeur spectrale et une bande passante importante. La cohérence exprime l'étroitesse du spectre de fréquence (voir figure I.3) [2].



Figure I.3. Spectre d'émission d'une diode laser [2].

I.4.2.2 Diode DEL (électroluminescentes)

Une diode DEL (Light Emitting Diode) est une source incohérente, et polychromatique. Elle présente contrairement au laser un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grande bande passante (voir figure I.4) [2].

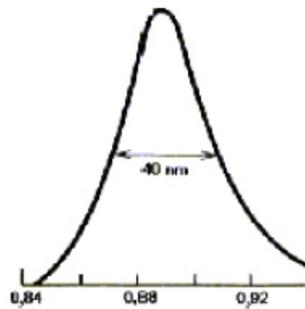


Figure I.4. Spectre d'émission d'une diode DEL.

I.4.3 Les fenêtres de transmission optique

Compte tenu de l'atténuation et de la dispersion d'un signal optique, mais aussi des caractéristiques des composants optoélectroniques disponibles, on définit des fenêtres de transmission, bandes longueur d'onde de propriétés spécifiques [3].

Les bandes de fréquences optiques (et donc les longueurs d'ondes) qui sont utilisées dans les systèmes de transmission optique ont été normalisées par l'UIT selon le plan suivant [4]:

- bande O (Original) : 1260 à 1360 nm (220.435 à 237.930 THz) ;
- bande E (Extended) : 1360 à 1460 nm (205.337 à 220.435 THz) ;
- bande S (Short wavelength) : 1460 à 1530 nm (195.942 à 205.337 THz) ;
- bande C (Conventional) : 1530 à 1565 nm (191.560 à 195.942 THz) ;
- bande L (Long wavelength) : 1565 à 1625 nm (184.487 à 191.560 THz) ;
- bande U (Ultra-long wavelength) : 1625 à 1675 nm (178.980 à 184.487 THz).

I.4.4 Modulateurs optiques

Dans la plupart des systèmes de transmission optique, le signal optique émis en continu est ensuite modulé en fonction des données à transmettre, du débit et du format de modulation choisis. Mais il est aussi possible de moduler directement le signal optique au niveau de sa source, en agissant sur le courant de pompe de la diode laser. Nous allons décrire deux méthodes de modulation d'un signal optique.

Cependant, un modulateur est un dispositif capable de modifier les paramètres d'onde optique (Amplitude, phase). Les deux méthodes pour moduler les ondes optiques sont comme suit : la modulation directe et la modulation externe.

Dans la modulation directe, on modifie le courant injecté de polarisation dans la source optique. Cette technique est simple et peu coûteuse.

Dans la modulation externe, le signal optique provenant de la source est mélangé avec un autre signal optique issu d'un oscillateur local, à travers un modulateur optique. Il en existe principalement de deux sortes : les modulateurs à électro-absorption (EAM pour Electro-Absorption Modulator) et les modulateurs Mach-Zehnder (MZM pour Mach-Zehnder Modulator) [1,2].

I.5 Amplificateur optique

La distance de propagation d'un signal optique sur une fibre optique est limitée par l'atténuation. Bien que l'atténuation des fibres optiques soit très faible, un signal qui s'y propage ne peut pas être détecté après, au grand maximum, quelques centaines de kilomètres de propagation. Pour pallier cela des répéteurs, essentiellement formés d'amplificateurs, doivent être placés périodiquement tout au long de la chaîne de transmission optique pour rétablir de l'énergie au signal optique pour qu'il puisse être détecté de manière optimale [1].

Les premiers systèmes de transmission par fibre optique étaient constitués, nous l'avons vu, de répéteurs électroniques. Le signal optique y était alors converti en signal électrique au moyen d'un détecteur, puis amplifié électriquement et reconverti en signal optique, pour se propager à nouveau sur une distance donnée. Ce schéma était assez complexe et limitait considérablement les performances d'une ligne de transmission optique. Sont alors apparus les amplificateurs optiques, dans lesquels le signal optique est amplifié directement grâce à des effets physiques dépendants de la nature de l'amplificateur. Nous distinguons principalement trois types d'amplificateurs optiques à savoir : les amplificateurs à fibre dopée, Erbium (EDFA pour Erbium-Doped Fiber Amplifiers), les amplificateurs Raman, et les amplificateurs à semi-conducteurs (SOA pour Semi-conducteur Optical Amplifiers) [1].

I.5.1 Les différentes configurations pour des amplificateurs optiques

Tout d'abord, on distingue tout au long de la chaîne de transmission optique trois configurations pour amplifier un signal optique (voir figure I.5) :

- Les boosters (amplification de puissance) : utilisés uniquement dans les systèmes comportant un seul canal, ils se situent au début de la chaîne, directement après l'émetteur. Ils se caractérisent par des puissances en sortie très élevées, ce qui permet de débiter la transmission avec un signal de fort niveau ;
- Les amplificateurs en ligne : ils se situent sur la ligne de transmission et ont pour fonction de rattraper les pertes induites par la fibre de ligne. Généralement situés, tous les 80 km environ, ils ont un gain élevé et un niveau de bruit faible ;
- Les préamplificateurs : situés à la fin de la chaîne de transmission, ils ont pour fonction de rehausser le niveau de signal avant le récepteur. Ils se caractérisent par un gain élevé et un niveau de bruit très faible [5].

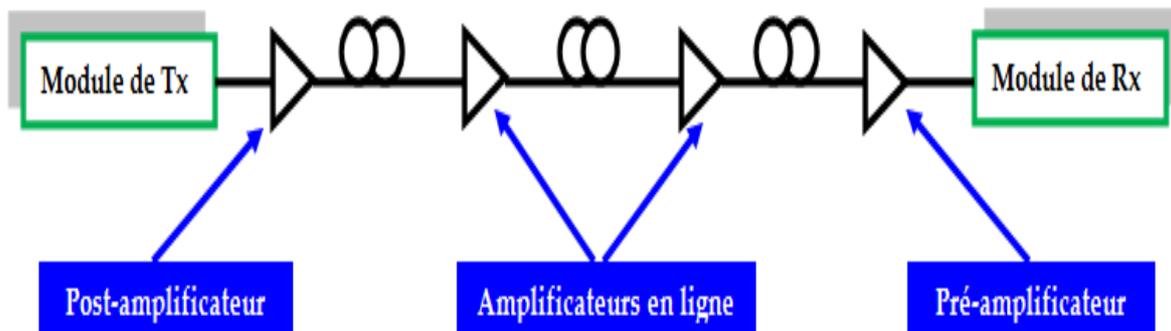


Figure I.5. Types de configuration d'un amplificateur optique [5].

Le tableau I.1 récapitule les performances typiques de ces amplificateurs dans le cas d'un EDFA en bande C [5].

Type d'amplificateur	Gain	Figure de bruit	Puissance de sortie
Booster	>15 dB	6 dB	> 20 dBm
Amplificateur en ligne	25 dB	5,5 dB	17-20 dBm
Préamplificateur	>30 dB	4,5 dB	10-15 dBm

Tableau I.1. Performances des trois configurations d'amplificateurs (cas de l'EDFA en bande C).

I.5.2 Comparaison des amplificateurs optiques

Le tableau I.2 présente une comparaison entre les amplificateurs qui sont généralement utilisés pour amplifier l'énergie du signal optique dans un système de transmission, à savoir EDFA (fibres dopées erbium) et SCOA (semi-conducteurs) [3].

Amplificateurs	EDFA-silice	EDFA-silice	EDFA-Verres fluorés	SCOA
Pompage à	980 nm	1480 nm	1480 nm	
Gain	30 à 40 dB	20 à 30 dB	40 dB	20 à 30 dB
Rapport gain à puissance de pompe	10 dB/mW	4 dB/mW	6dB/mW	
Puissance de saturation	20 à 30 dBm	10 à 15 dBm	17 à 20 dBm	10 dBm
Rendement quantique	80%			
Largueur de bande amplifiée	20 à 30 nm	10 à 20 nm	30 nm	30 à 40 nm
Facteur de bruit	3 dB	6 à 9 dB	6 dB	12 dB

Tableau I.2. Caractéristiques comparées des amplificateurs optiques [3].

I.6 Récepteurs optoélectroniques

I.6.1 Le module de réception

Après propagation d'un signal optique tout au long d'une chaîne de transmission, le signal arrive au niveau du récepteur. Le rôle de celui-ci est de récupérer la séquence binaire sous forme électrique. Le module de récepteur est équipé notamment d'un détecteur constitué d'une photodiode permettant la conversion du signal optique en signal électrique. Pour plus de détail, ce module est composé de plusieurs blocs fonctionnels [1]. On y retrouve trois parties (voir figure I.6) :

- le bloc de "premier étage" composé du photo-détecteur. Il peut être accompagné d'un pré-amplificateur, qui a pour but de rendre le photo-courant généré suffisamment fort malgré le faible signal optique reçu ou la faible sensibilité du photo-détecteur.
- le bloc "linéaire", composé d'un amplificateur électrique à gain élevé et d'un filtre, réducteur de bruit.
- le bloc "récupération des données", correspondant au dernier étage du récepteur. On y trouve un circuit de décision et un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation [6].

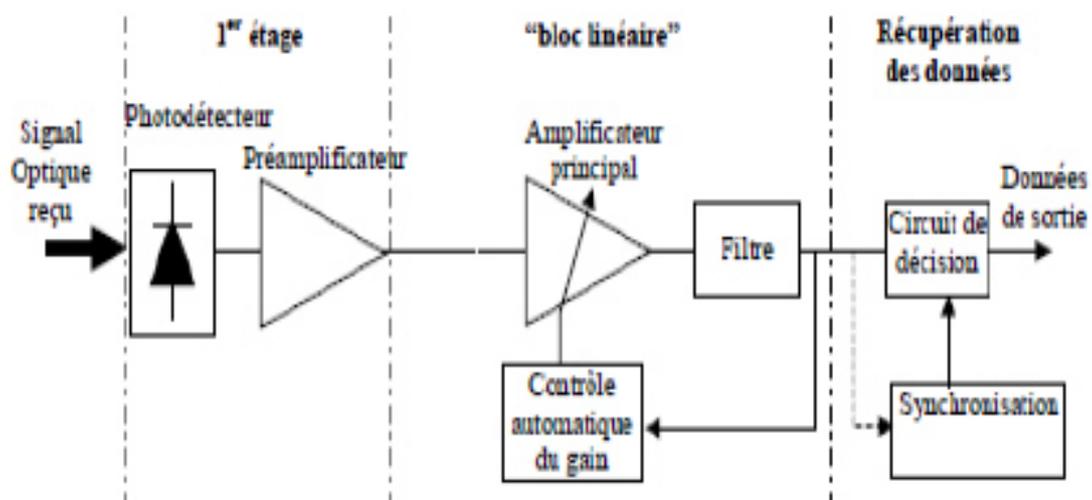


Figure I.6. Schéma d'un récepteur de données à détection directe [6].

I.6.2 Photo-détecteur

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 [7,8]. 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 AVALANCHE (APD).

I.6.2.1 Photodiode PIN

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

I.6.2.2 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, des prototypes de photodiodes de type PIN surpassent les types APD. Les types PIN pourraient alors reprendre du terrain à ces fréquences sur le type APD [1,7,8]. En système de transmission optique, les modules de récepteurs doivent :

- Offrir un bon couplage avec la fibre ;
- Avoir une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement ;
- Avoir une bande passante convenable ;
- Avoir une faible exigence du point de vue tension de source ;
- Pas d'influence des conditions extérieures sur les caractéristiques ;
- Avoir une grande fiabilité et un faible cout ;

- Avoir un temps de réponse très court et un faible bruit additionnel [8].

I.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les composants optoélectroniques de base pour constituer un système de transmission optique à haut débit. Au cours de chapitre suivant nous allons présenter une comparaison entre trois canaux fondamentaux de transmissions optiques telles que FSO, SMF et OWC.

CHAPITRE II

Comparaison entre les trois canaux : FSO,
OWC et SMF

II.1 Introduction

La transmission d'un signal sur support nécessite des précautions. Les caractéristiques du canal vont en effet modifier les propriétés du signal lors de cette transmission. On appelle canal de transmission tout milieu physique servant du support au transfert de l'information entre deux points distants, une source et une cible. Dans ce chapitre, nous allons évoquer la comparaison entre les trois différents canaux, à savoir : FSO, OWC et SMF.

II.2 Technologie FSO (Free Space Optics)

Ces dernières années, les réseaux optiques sans fils utilisant la technologie FSO sont apparus d'une manière significative. Par opposition, cette technologie FSO, permet de répondre aux besoins des opérateurs de télécommunications. Les liaisons optiques en espace libre (FSOLs) constituent une technologie optique de communications qui fait appel à la propagation de la lumière en espace libre, à savoir de transmettre des données entre deux points distants (voir la figure II.1). En outre, elle présente un intérêt lorsqu'une connexion physique par le biais de câble ou de fibre optique est inadaptée, en particulier pour des raisons de coûts [17-19].

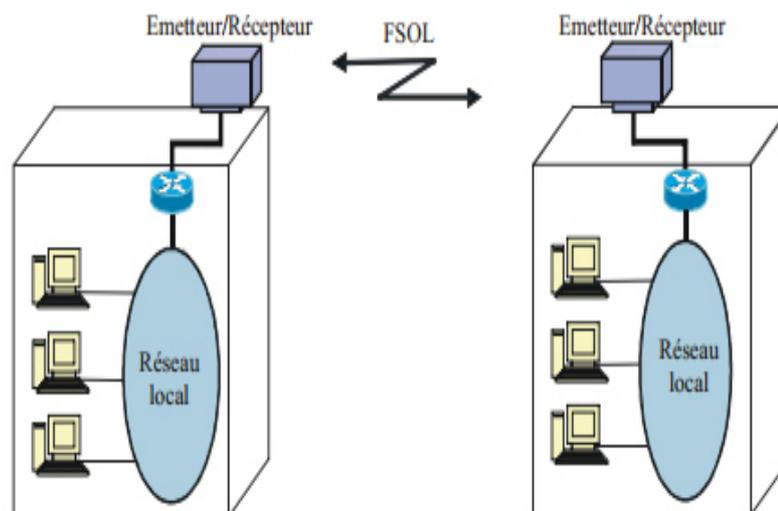


Figure II.1. Structure d'une liaison FSO utilisée pour raccorder deux réseaux locaux [19].

II.2.1 Principe de fonctionnement de FSO

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. En théorie, une liaison FSO nécessite un émetteur, un canal de propagation et un récepteur, comme il est illustré sur la figure II. 2 [18,19].

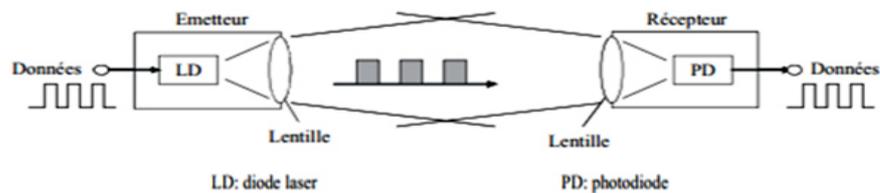


Figure II.2. Configuration de base d'une liaison optique en espace libre [19].

Une liaison FSO exploite en général une paire de dispositifs **émetteurs-récepteurs optiques** (la figure II.3 présente un émetteur-récepteur FSO de la société *LightPointe*), montés sur des toits, derrière des fenêtres ou bien encore fixés sur des poteaux chacun orienté vers l'autre [19].

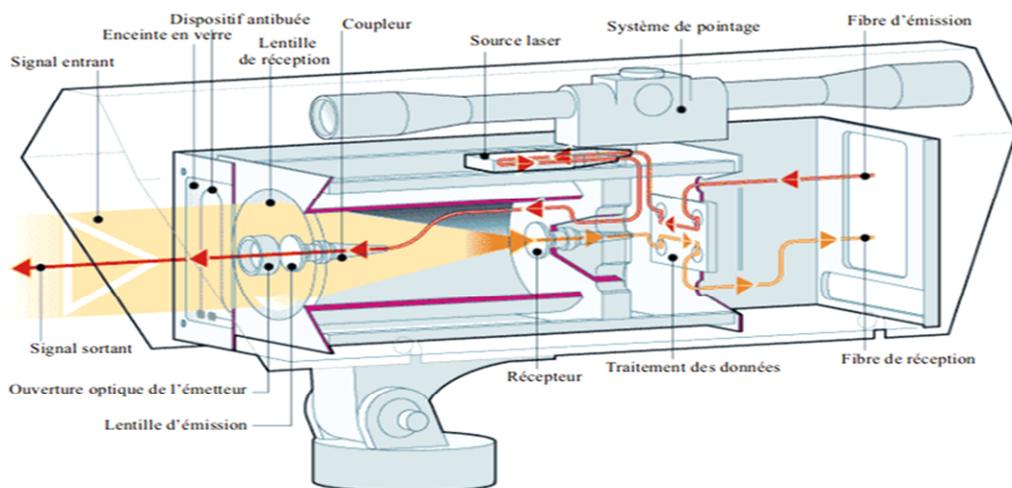


Figure II.3. Exemple de terminal de transmission optique en espace libre [19].

C'est une interconnexion sans fil de type point à point (un seul émetteur vers un seul récepteur) qui permet de faire communiquer entre eux des réseaux numériques, téléphoniques, informatiques ou vidéo (voir la figure II. 4). Chaque élément est constitué d'un émetteur et d'un récepteur qui communiquent généralement en « *Full-Duplex* », la communication est bidirectionnelle et simultanée [17]. Chaque équipement comporte plusieurs modules:

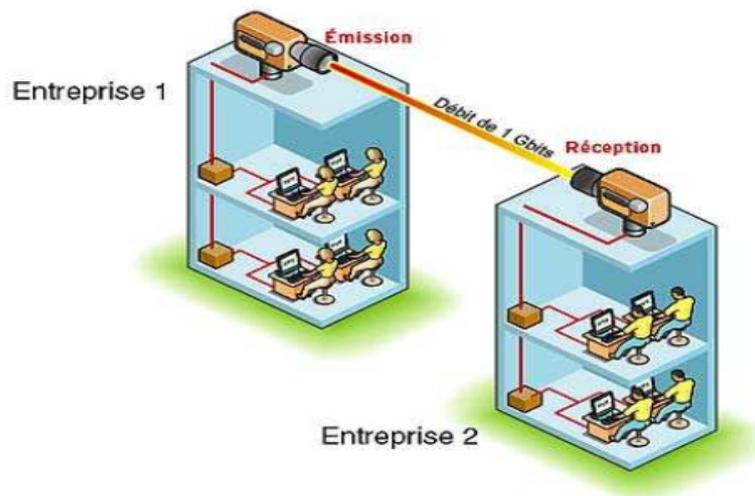


Figure II.4.Communication FSO [17].

Éléments d'émission:

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

Éléments de réception:

- le module de réception optique contenant une photodiode;
- le filtrage et l'amplification du signal numérique électrique ;
- le module de conversion électrique/optique (E/O), en cas d'interface optique;

- l'interface d'affluent: électrique ou optique pour transmettre les données numériques [17-19].

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

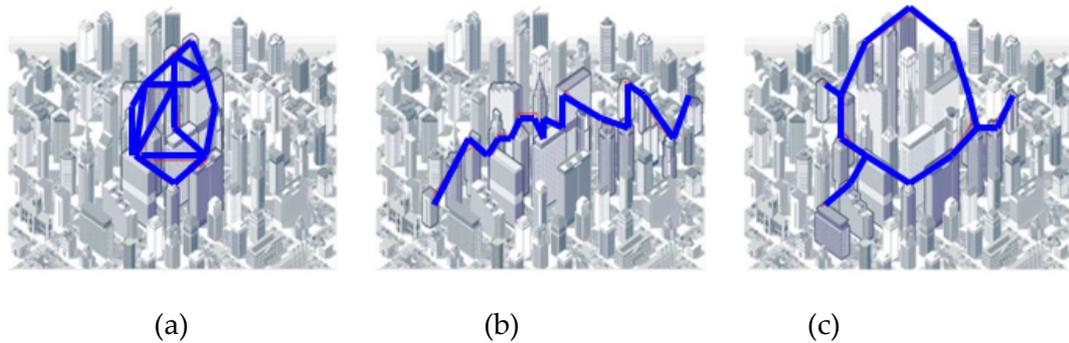


Figure II.5. Topologies de réseaux optiques en espace libre [17]:

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

II.2.2 Caractéristique des dispositifs FSO

La longueur d'onde à laquelle fonctionne un dispositif FSO est le premier paramètre à considérer. En pratique, les lasers utilisés émettent des rayonnements infrarouges situés le plus souvent dans une gamme de longueur d'onde autour de 1550 nm, car la sensibilité des photodiodes utilisées en réception est bien meilleure à 1550 nm que dans le visible ou le proche infrarouge. De plus, les faisceaux laser présentent davantage de risques pour la sécurité oculaire dans le domaine visible que pour des longueurs d'onde de l'ordre de 1550 nm. En effet, la lumière à 1550 nm est absorbée par la cornée et le cristallin et ne focalise pas sur la rétine contrairement aux faisceaux laser dans le visible et le proche infrarouge qui peuvent engendrer des dommages irréversibles sur la rétine. C'est un facteur à ne pas négliger pour une transmission optique en espace libre où la puissance optique est élevée et où le faisceau est accessible à l'utilisateur. Le simple fait de choisir des lasers à 1550 nm permet d'assurer que le système est sans danger même si la puissance du faisceau laser est importante [17]. Le tableau II.1 ci-dessous qui présente les caractéristiques de base pour des systèmes FSOs commercialisés [17].

	Min	Max	Remarques
Débit	1.5 Mbps	1.6 Gbps	Jusqu'à 10 Gbps avec correction des turbulences atmosphériques
Portée	10 m	7700 m	Temps clair
Longueur d'onde	780 nm	1550 nm	
Puissance optique émise	4 mW	650 mW	

Tableau II.1.Caractéristiques de base pour des Systèmes FSOs [17].

II.2.3 Les avantages et les limites de FSO

Cette section présente les avantages et les limites d'une liaison optique en espace libre :

Les avantages des FSOs :

Les FSOs ont leurs propres avantages, sont comme suit :

- large bande ou débit de données élevé ;
- équipements petits et simples ;
- fonctionnement sans licence ;
- coût avantageux ;
- facilité et rapidité de déploiement ;
- rapidité de déplacement et de réutilisation des liaisons ;
- protocole de communication transparent ;
- la sécurité intrinsèque des dispositifs FSO, plus élevée que celle des liaisons radioélectriques.

Les limites des FSOs :

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

- disponibilité par rapport à la distance ;

- condition de visibilité directe.

En outre, pour la transmission des ondes optiques en espace libre, il faut surmonter certains problèmes liés à la propagation, comme l'atténuation du signal à la réception, conduisant ainsi à une augmentation du taux d'erreurs [17-19].

II.2.4 Les applications des FSO

Pour certaines applications, les FSOs offrent plusieurs avantages supplémentaires par rapport à ceux offerts par les liaisons fixes traditionnelles ou à ceux offerts par les liaisons à fibres optiques. Ces applications peuvent par exemple être les suivantes:

- interconnecter des réseaux LANs dans des villes ou des campus universitaires en économisant le coût très élevé de l'installation des fibres optiques ;
- liaison pour une manifestation particulière ;
- liaison temporaire: installation rapide pour une durée limitée dans l'attente d'une liaison traditionnelle définitive ;
- liaison d'urgence: installation d'une liaison d'urgence en cas de panne d'une liaison ;
- liaison entre sites, réseau indépendant (PDH, SDH, ATM, Ethernet 10/100/1000) ;
- fermeture d'anneau optique ;
- liaison de secours ;
- réseau dense ;
- infrastructure mobile, par exemple liaison pour des nano-cellules ou des pico-cellules GSM ou IMT-2000 [17,19].

II.2.5 Canal de transmission FSO

Le canal de propagation constitue le milieu atmosphérique. C'est un milieu très complexe et dynamique pouvant affecter les caractéristiques du faisceau laser émis. En plus, les systèmes FSO sont soumis à un certain nombre de défis liés pour la plupart aux facteurs environnementaux et plus particulièrement aux effets de l'atmosphère sur la

propagation du faisceau émis. La propagation d'une onde lumineuse dans l'atmosphère est affectée principalement par la diffusion et l'absorption du rayonnement des particules et les molécules composant le milieu. Les liaisons FSO sont ainsi soumises à des contraintes pénalisantes imposées par le milieu de propagation atmosphérique qui ne constitue pas un milieu idéal de propagation en raison de la variation spatio-temporelle de ses caractéristiques physiques et de la diversité de ses constituants. Ces contraintes entraînent une extinction du signal optique au cours de sa propagation et donc une limitation de la portée. L'extinction atmosphérique est causée par un certain nombre de phénomènes sélectifs en longueurs d'onde : l'absorption moléculaire caractérisée par une forte dépendance spectrale, la diffusion moléculaire (diffusion Rayleigh), l'extinction (absorption et diffusion) par les particules en suspension (aérosols), en précipitation (pluie, neige, etc.), et la turbulence atmosphérique due aux variations spatio-temporelles de l'indice de l'air (scintillations, fluctuation spatiale du faisceau...) [20].

II.2.6. Les paramètres d'une liaison FSO

Avant de déployer des liaisons optiques atmosphériques, il est important de savoir leur disponibilité et leur fiabilité [17] :

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

À l'instar des équipements pour une liaison FSO, il est primordial de savoir le bilan de liaison et la marge brute de la liaison donnée. La connaissance de ces paramètres permet de connaître la capacité du lien laser à transmettre des données numériques malgré les variations des conditions climatiques. Les principaux paramètres à prendre en considération pour la définition des liaisons optiques atmosphériques sont les suivants : la puissance émise, la sensibilité du récepteur, la surface de détection optique du récepteur et la divergence du faisceau émis. A partir de ces données techniques, on pourra connaître la valeur de l'affaiblissement géométrique de la liaison et sa marge brute [21].

II.3 Technologie FO (Fibre Optique)

Les supports de transmission sont nombreux. Parmi ceux-ci, on distingue : les supports métalliques, non-métalliques et immatériels. Les supports métalliques, comme les paires torsadées et les câbles coaxiaux, sont les plus anciens et les plus largement utilisés ; ils transportent des courants électriques. Les supports de verre ou de plastique, comme les fibres optiques, transmettent la lumière, tandis que les supports immatériels des communications sans fil propagent des ondes électromagnétiques et sont en plein essor.

Une fibre optique est constituée d'un fil de verre très fin. Elle comprend un cœur, dans lequel se propage la lumière émise par une diode électroluminescente ou une source laser et une gaine optique dont l'indice de réfraction garantit que le signal lumineux reste dans la fibre (voir la figure II.6) [22].

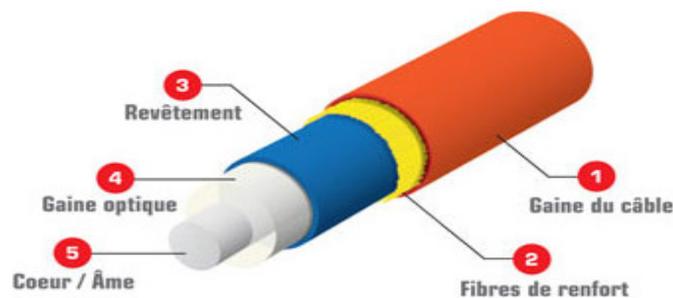


Figure II.6. Structure d'une fibre optique [23].

Les premières fibres optiques employées dans les télécommunications, apparues sur le marché à partir des années 1970, étaient multi-modes (à saut d'indice ou à gradient d'indice, selon que l'indice de réfraction de la lumière varie de manière brutale ou progressive entre le cœur et la gaine de la fibre). Ces fibres étaient réservées (et le sont encore) aux débits inférieurs au gigabit par seconde, sur des distances de l'ordre du kilomètre. Plusieurs longueurs d'onde bien choisies se propagent simultanément en de multiples trajets dans le cœur de la fibre. Pour des débits plus élevés et des distances plus longues, la fibre monomode, de fabrication plus récente, plus fine, assure la propagation

d'une seule longueur d'onde dans son cœur (quelques micromètres de diamètre) et offre donc de meilleures performances.

Les avantages de la fibre optique sont nombreux : diamètre extérieur de l'ordre de 0,1 mm, poids de quelques grammes au kilomètre. Cette réduction de taille et de poids la rend facile à utiliser. En outre, sa très grande capacité permet la transmission simultanée de nombreux canaux de télévision, de téléphone... Les points de régénération des signaux sont plus éloignés (jusqu'à 200 km), du fait de l'atténuation moindre de la lumière. Enfin, l'insensibilité des fibres aux parasites électromagnétiques est un avantage très apprécié, puisqu'une fibre supporte sans difficulté la proximité d'émetteurs radioélectriques. On peut l'utiliser dans des environnements perturbés (avec de puissants champs électromagnétiques, par exemple). Par ailleurs, elle résiste bien aux écarts de température. La fibre optique constitue la plupart des artères des réseaux de télécommunications et des réseaux locaux à très haut débit [22].

II.3.1 Caractéristiques de la fibre optique

- débit : quelque Gbit/s par km ;
- encombrement d'une fibre : $<100 \mu\text{m}$, $<5 \text{ g/km}$;
- les fibres sont rassemblées au sein d'un câble ;
- trois types de fibres (bande passante):
 - Multimode à saut d'indice ;
 - Multimode à gradient d'indice ;
 - Monomode.
- dispersion : défaut d'alignement + émission non-monochromatique [24].

II.3.2 Les avantages et inconvénients de FO

Avantage :

- intégrité de la transmission électrique ;
- faible point, faible encombrement ;
- énormes possibilités de transmission ;

- fiabilité et longévité des installations ;
- abondance de la matière première la silice ;
- insensibilité aux perturbations électromagnétiques.

Inconvénients :

- sensibilité à l'eau ;
- manques d'information sur cette technologie ;
- les idées reçus en termes du prix, la connectique et la pose [23].

II.3.3 Notions importantes

II.3.3.1 Réflexion totale

La propagation de la lumière s'effectue dans le cœur de la fibre par le phénomène de réflexion totale illustré par des lois de Descartes (voir la figure II.7).

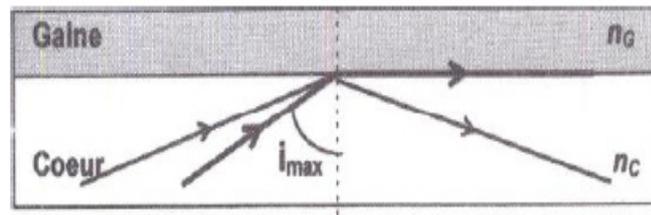


Figure II.7. Réflexion totale.

Un rayon est réfléchi à la frontière entre deux milieux d'indice de réfraction différents lorsque son angle d'incidence i est supérieur à la valeur i_{max} telle que :

$$\sin(i_{max}) = \frac{n_G}{n_c} \quad (\text{II.1})$$

Où n_G et n_c sont les indices de réfraction qui caractérisent les milieux de gaine et de cœur, respectivement.

Les dimensions des fibres s'expriment en micromètre $n_c > n_G$.

À partir de cette loi optique, on peut d'ores et déjà définir une première caractéristique fondamentale de la fibre : l'ouverture numérique [25].

II.3.3.2 Ouverture Numérique (ON)

Ce chiffre, compris entre 0 et 1, représente la capacité de la fibre à collecter la lumière qu'elle pourra propager (angle d'acceptance).

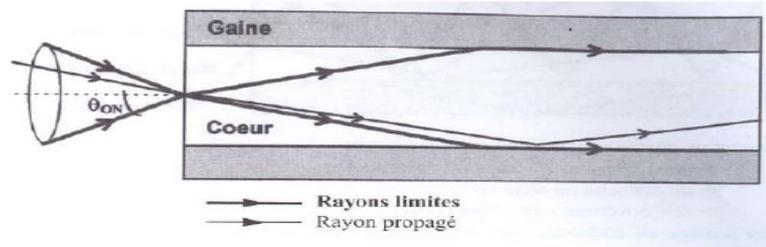


Figure II.8. Ouverture Numérique.

$$ON = \sin \theta_{ON} = \sqrt{(n_c^2 - n_g^2)} \quad (\text{II.2})$$

θ_{ON} permet de définir un cône d'acceptance pour lequel tout rayon entrant est guidé dans la fibre grâce à la réflexion totale.

Si ON est faible, la bande passante sera améliorée, mais l'injection de la lumière sera plus délicate (voir figure II.8) [25].

II.3.3.3 Les Modes de Propagation

Nous pouvons représenter ces différents modes (voir la figure II.9) comme étant les possibilités de chemins des rayons lumineux dans le cœur :

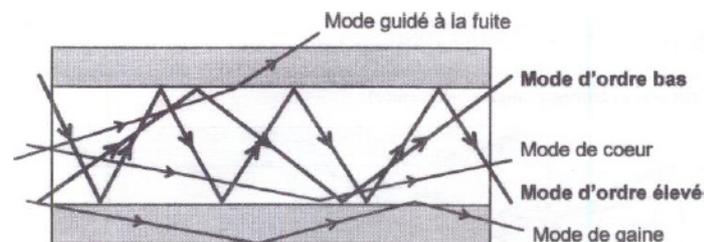


Figure II.9. Types de Modes.

Le nombre de modes possible dans une fibre dépend de :

- la longueur d'onde de la source ;
- diamètre de cœur ;
- l'ouverture numérique [25].

II.3.3.4 La Bande passante

Elle symbolise le débit de transmission dans une fibre. Elle s'exprime en MHz*km. Plus la fibre courte, plus sa bande passante est élevée.

Deux phénomènes limitent la bande passante :

- en multimode, il s'agit de la dispersion modale : les différents modes ne se propagent pas à la même vitesse, le signal de sortie est déformé.
- en monomode, la dispersion modale n'a pas lieu d'être puisqu'un seul mode se propage. Mais la limitation est due à la dispersion chromatique (mesuré en ps/nm/km) : une source n'est jamais monochromatique, elle diffuse un spectre de longueurs d'onde plus ou moins large. Or comme chaque longueur d'onde a sa vitesse propre dans un milieu donné, le signal de sortie s'étale dans le temps (la bande passante peut être de l'ordre de 25 THz (sur des fibres optimisées) là où la fibre a une atténuation très faible) [25].

II.3.3.5 Atténuation

L'atténuation (voir la figure II.10) correspond à la perte de puissance du signal lumineux le long de la fibre optique. Cette perte est due à des impuretés résiduelles et à des phénomènes de dispersion. L'atténuation est mesurée en (dB/km). Contrairement à la mesure en dB (affaiblissement relatif), la mesure en dBm (décibel par milliwatt) est une mesure absolue [25].

Soit $0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$, $-10 \text{ dBm} = 0.1 \text{ mW}$.

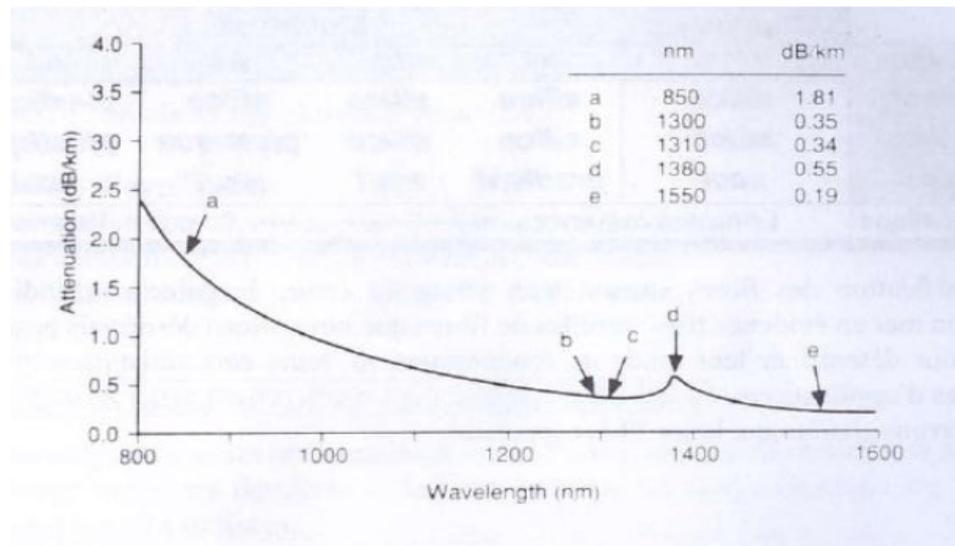


Figure II.10. L'atténuation spectrale d'une fibre optique [25].

Cette courbe met en évidence les 2 fenêtres des 3 longueurs d'ondes les plus utilisées, centrées autour de 850, 1310 et 1550 nm. Il est intéressant de noter qu'une onde lumineuse est une onde électromagnétique avec une fréquence propre. Ainsi, il est possible d'obtenir une conversion fréquence / longueur d'onde par la formule suivant : $c = \lambda * f$, la vitesse de la lumière dans le vide. Les fibres optiques peuvent être utilisées pour la transmission essentiellement dans deux fenêtres en longueur d'onde, qui correspond à la fenêtre du minimum d'atténuation :

- la fenêtre à 1300 nm qui a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,4 dB/km.
- la fenêtre à 1550 nm qui a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,2 dB/km.

Les composants optoélectroniques lasers et récepteurs sont peu coûteux à cette gamme des longueurs d'onde 1300 nm et qui présente une atténuation importante. Cette fenêtre est utilisée pour les systèmes de télécommunications de courte portée quelques dizaines de kilomètres ou de faible capacité : boucles locales à fibres optiques, réseaux urbains, LANs [26].

II.3.4 Les Différentes Fibres Optiques (FO)

La fibre optique, fabriquée en silice, se caractérise par un cœur, une gaine et un revêtement plastique en $250\mu\text{m}$. Il existe deux types de fibres optiques : les fibres multimodes dites multimodales et les fibres monomodes dites unimodales.

II.3.4.1 FO Multimode

La fibre optique caractérisée par un cœur dans lequel plusieurs modes peuvent se propager. Le type principale est la fibre à gradient d'indice (ex. fibre $50/125\mu\text{m}$ et $62.5/125\mu\text{m}$). La fibre multimode est aussi nommée fibre MM.

Les fibres multimodes à saut d'indice (voir la figure II.11), ce sont les plus nombreuses grâce à leurs multiples combinaisons cœur-gaine, leur champ d'application est vaste. Le principe de fonctionnement suit exactement la loi de la réflexion totale. Le schéma suivant illustre le retard des modes d'ordre élevé par rapport aux modes d'ordre bas, à l'origine de la dispersion modale.

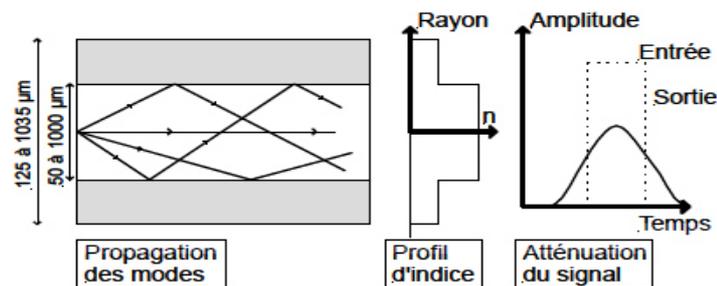


Figure II.11. Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à saut d'indice.

Les caractéristiques de fibres multimodes à saut d'indice dépendantes de :

- bande passante : de 9 à 25 MHz.km
- atténuation : de 6 à 150 dB/km
- ON : de 0.37 à 0.5
- source : Diode Electro-Luminescente (DEL)

Ce type de fibre est appliqué dans les domaines suivants :

- télécommunications pour réseaux locaux et industriels
- transmission courte distance (avionique, automobile)
- transport de lumière visible (imagerie, décoration)

Les fibres multimodes à gradient d'indice (voir la figure II.12), sont moins nombreuses que les multimodes à saut d'indice, leurs performances se situent à mi-chemin entre ces dernières et les monomodes. Ce sont cependant les fibres multimodes les plus utilisées. Le gradient d'indice permet aux modes d'ordre élevé de se déplacer plus rapidement, donc d'atténuer l'effet de la dispersion modale.

Les caractéristiques de fibres multimodes à gradient d'indice dépendantes de :

- bande passante : de 200 à 1500 MHz.km ;
- atténuation : de 1.5 à 4.5 dB/km ;
- ON : de 0.2 à 0.29 ;
- source : DEL ou LSAER faible et moyenne puissance.

Ce type de fibre est appliqué dans les domaines suivants :

- transmission moyenne distance (informatique, industrie) ;
- vidéocommunications.

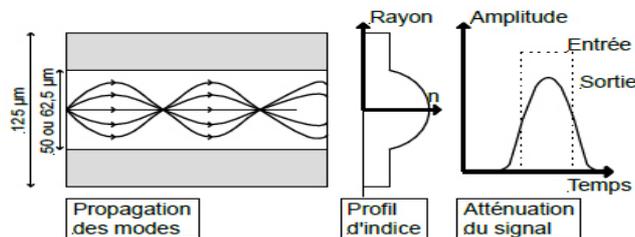


Figure II.12. Propagation des ondes dans une fibre optique multimode à gradient d'indice.

II.3.4.2 FO Monomode

Fibre optique dont le diamètre du cœur est faible par rapport à la longueur d'onde guidée (voir la figure II.13). Le cœur a un diamètre d'environ $9 \mu\text{m}$. Elle est fabriquée à base de silice. Elle est aussi nommée fibre SM. Leurs performances exceptionnelles les dédient tout naturellement aux communications très longues distances. Quant à le principe de fonctionnement, un seul mode se propage, plus de problème de dispersion modale, mais l'injection de lumière est plus délicate.

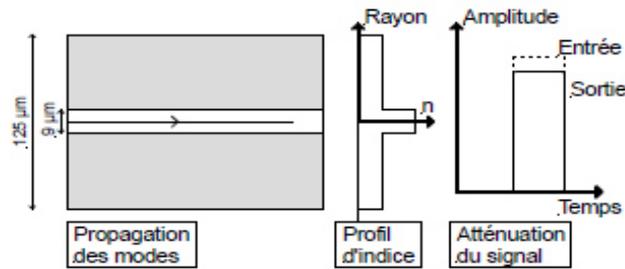


Figure II.13. Propagation des ondes dans une fibre optique monomode.

Les caractéristiques de fibres monomodes dépendantes de :

- bande passante : de 10 GHz.km et même plus ;
- atténuation : de 0.2 à 0.4 dB/km ;
- ON : de 0.1 à 0.12 ;
- diamètre de champ de mode : selon spécifications ;
- longueur d'onde de coupure: selon spécifications.

Ce type de fibre est appliqué dans les domaines suivants :

- télécommunications très grandes distances (câbles sous-marins) ;
- télécommunications et vidéocommunications très hauts débits (base des systèmes de communication terrestre) [25-27].

II.3.5 Types de fibres monomodes

L'Union Internationale des Télécommunications (UIT-T) a normalisé plusieurs types de fibres monomodes pour les télécommunications (voir la figure II.14) [3].

II.3.5.1 Fibre standard

Sous le standard G 652 de l'UIT, la fibre standard est la plus ancienne, de diamètre de cœur de 9 μm ; sa dispersion s'annule vers 1,3 μm , qui est sa longueur d'onde d'utilisation optimale, notamment dans les réseaux locaux et métropolitains à très haut débit. Mais on peut aussi l'utiliser à 1,55 μm avec des diodes laser monochromatiques ($\Delta\lambda = 0.1\text{nm}$) ; en l'absence d'amplificateurs optiques, la distance est limitée par l'atténuation et cette solution est satisfaisante, au moins jusqu'à des débits de 2,5 Gbit/s [3].

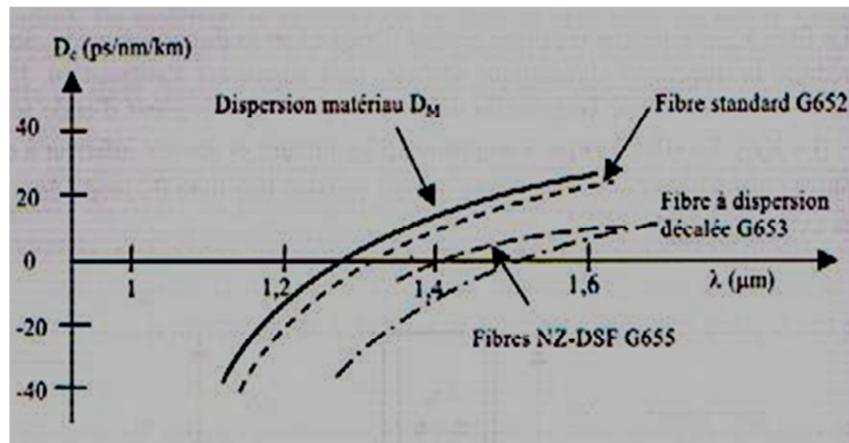


Figure II.14. Dispersion chromatique des fibres monomodes [3].

II.3.5.2 Fibre à dispersion décalée

La fibre à dispersion décalée ou DSF (Dispersion Shifted Fiber) de standard G 653, a un diamètre de cœur de $7 \mu\text{m}$ et un profil d'indice souvent plus complexe, en triangle ou trapèze. Sa dispersion s'annule vers $1,55 \mu\text{m}$; mais son atténuation est un peu plus élevée. Elle a été utilisée surtout pour les liaisons à très longue distance à amplificateurs optiques, dont le paramètre critique est la dispersion et pas l'atténuation ; mais elle est peu compatible avec le WDM, car la dispersion ne peut pas être annulée à toutes les longueurs d'onde, et la dispersion nulle favorise l'accumulation des effets non linéaires. Elle recule au profit de la fibre G 655 [3].

II.3.5.3 Fibre à dispersion décalée non nulle

La NZ-DSF (Non Zero-Dispersion Shifted Fiber) de standard G 655, (1995) a sa dispersion chromatique réduite à une valeur faible, mais non nulle (de 3 à 6 ps/km/nm dans la 3^{ème} fenêtre) ; c'est en fait une famille de fibres avec des paramètres (et des noms commerciaux) variant d'un fabricant à un autre. Grâce à un diamètre de cœur plus grand, elle a de pertes plus faibles que la précédente, et est de plus moins sensible aux effets non linéaires. Elle est donc bien adaptée au multiplexage en longueur d'onde. La pente (slope) de sa dispersion ($d * D_c / d\lambda$) est plus faible que pour les fibres précédentes (de 0,05 à 0,1 ps/km/nm).

En 2004 la fibre G 656 a été normalisée, qui en est une variante présentant une dispersion plus élevée sur une bande plus large (2 à 14 ps/km/nm de 1500 à 1610 nm) adaptée au multiplexage peu dense en longueur d'onde [3].

II.4 Technologie OWC (Optical Wireless Communication)

Le besoin important de transmettre des informations entre différents terminaux mobiles a conduit au développement d'une large gamme de solutions sans fils. Ces systèmes sont en grande majorité basés sur la technologie Radio-Fréquence (RF). On peut citer, par domaine de couverture croissant, les normes Zigbee, Bluetooth, Wifi, WiMax et 3G/4G.

Les communications optiques sans fil offrent à la fois une alternative et une solution complémentaire aux communications radiofréquences [28, 29, 30]. Les systèmes optiques et RF utilisent tous les deux des ondes électromagnétiques pour transmettre l'information. Cependant, les bandes de fréquences utilisées sont très différentes, les systèmes RF exploitent des fréquences comprises entre quelques kilo Hertz et quelques dizaines de Giga Hertz alors que les systèmes optiques sans fils utilisent des fréquences beaucoup plus élevées situées généralement dans le domaine Infrarouge (IR).

Par rapport aux radios fréquences (RF), les communications optiques sans fil (OWC) [31] offrent des avantages techniques et opérationnels indéniables tels que : très forte bande-passante, robustesse aux interférences électromagnétiques, très grande confinement spatial permettant une réutilisation illimitée du spectre, sécurité inhérente, efficacité énergétique, absence de réglementation sur l'utilisation du spectre ou encore disponibilité et coût de composants largement utilisés dans les technologies de communications optique.

Le terme OWC se réfère à tout ce qui est en relation avec la transmission optique dans un support non guidé. Bien que ses variations basées sur la fréquence de fonctionnement, mais elle pourrait avoir une utilisation différente, selon les éléments suivants. Les communications optiques sans fil se sont récemment élargies au domaine visible avec les communications optiques dans le visible, VLC (Visible Light Communications) i.e., entre 390-750 nm. VLC peut être utilisé dans divers applications, y compris les réseaux locaux sans fil, les réseaux personnelles sans fil et les réseaux

véhiculaires... D'autre part, les systèmes OWC terrestre point-à-point, également appelés des systèmes optiques en espace libres (FSO), fonctionnent aux fréquences d'infrarouges proches (750-1600 nm). Ces systèmes utilisent généralement des émetteurs lasers et offrent un protocole de liaison transparente rentable avec des débits de données élevés, c'est-à-dire 10 Gbps par longueur d'onde. Ainsi qu'au domaine Ultraviolet (UV) i.e., en dessous de 400 nm. UVC (ultra-violet communication) peut être utilisé dans divers applications, y compris les capteurs sans fil et les réseaux ad hoc [32-35].

II.4.1 Domaines d'application existants

Les technologies OWC peuvent être potentiellement utilisées dans une large gamme d'applications de communication, allant des interconnexions optiques dans les circuits intégrés à travers des liaisons optiques terrestres vers des communications optiques par satellite.

La figure II.15 illustre une diversité d'applications OWC en fonction de leur portée de transmission. Certaines de ces applications existent et sont déjà disponibles dans le commerce, alors que certaines sont envisagées pour une utilisation future.

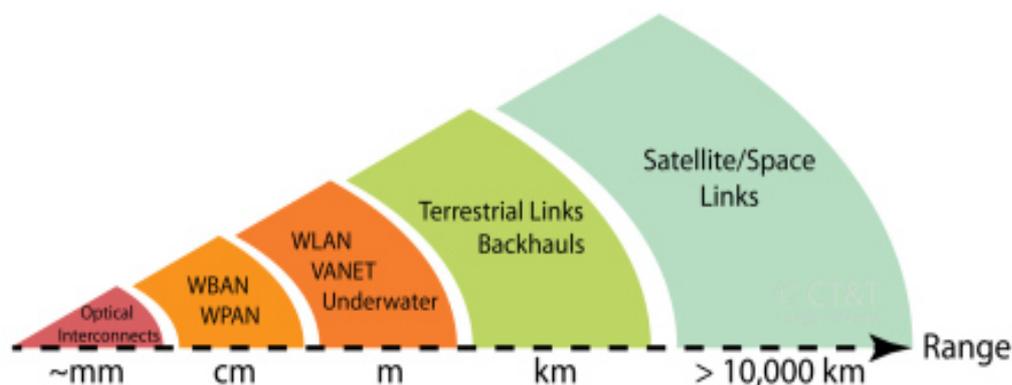


Figure II.15. Les applications OWC en fonction de la portée de transmission.

II.4.1.1 Les applications de OWC

Les systèmes OWC peuvent être appliqués à une large gamme d'applications parmi lesquelles [36-44] :

- liaisons LAN « outdoor » (voir la figure II.16),
- liaisons domestiques « indoor » (voir la figure II.17),

- télésurveillance « indoor »,
- réseaux de capteurs (voir la figure II.18),
- éclairage intelligent (VLC),
- liaisons satellites, plates-formes d'altitude et communications sous-marines (voir la figure II.19),
- liaisons sans-fil entre puces, cartes et calculateurs (voir la figure II.20).

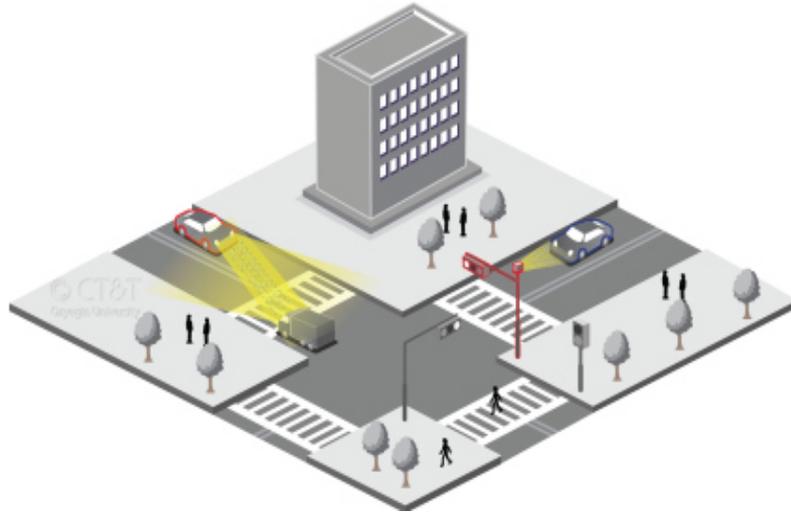


Figure II.16. Liaisons LAN-OWC : réseau véhiculaire utilisant la technologie VLC où les véhicules communiquent entre eux à base des LEDs (applications moyennes portées OWC)

[36].



Figure II.17. Liaisons LAN-OWC, un point d'accès VLC où le récepteur VLC sous la forme d'un dongle USB communique avec la lampe de bureau agissant comme émetteur VLC (applications moyennes portées OWC) [37-39].

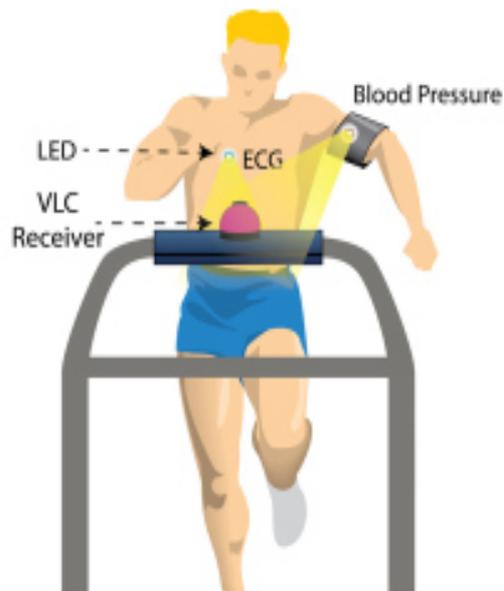


Figure II.18. WBAN optique en espace libre : application biomédicale mesure le cardio-stress (applications courtes portées OWC) [40].

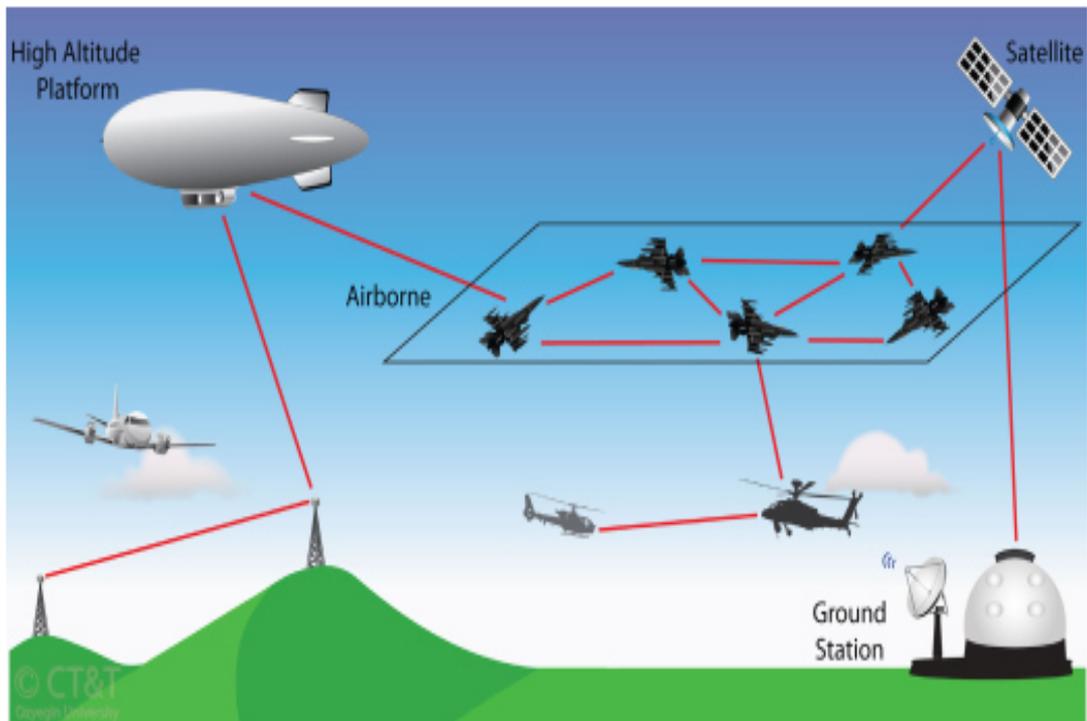


Figure II.19. Liaison OWC : l'application peut être déployée pour prendre en charge les communications aéronautiques, avion-à-HAP, aéronautique / satellite / station de base (applications longues portées OWC) [41].

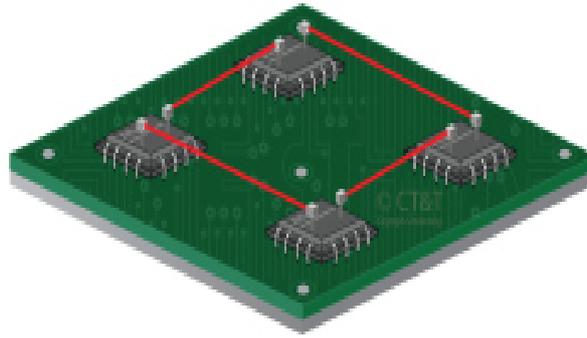


Figure II.20. L'interconnexion optique en espace libre entre les circuits intégrés (applications ultra-courtes portées OWC) [42-44].

II.4.2 Avantages

Les communications optiques sans fil bénéficient d'une bande passante quasiment infinie et non régulée [45]. En effet, à la différence des systèmes RF dont le spectre est surchargé, la bande optique s'étale sur plusieurs centaines de Giga Hertz et peut être utilisée librement (sans licence). Cette propriété permet le développement d'applications hautes débits.

De plus, les ondes IR ont un comportement proche des ondes lumineuses, elles ne peuvent pas traverser une paroi opaque (mur) et sont rarement diffractées par une ouverture. En configuration indoor, les ondes IR restent donc confinées dans la pièce où se trouve l'émetteur. Ce confinement augmente la sécurité de la liaison optique. Cette même propriété implique aussi qu'il est possible d'utiliser des systèmes optiques identiques (utilisant les mêmes longueurs d'onde aux mêmes instants) dans différentes pièces contiguës sans aucun risque de perturbation. Enfin, les systèmes optiques sans fil peuvent être déployés sans créer d'interférences électromagnétiques avec les systèmes RF préexistants [46].

II.4.3 Inconvénients

Les communications optiques sans fil sont cependant pénalisées par un plus faible budget optique lié au fort niveau de bruit comparé aux communications RF. Ce bruit peut

être issu du canal optique (lumière du soleil, éclairage) ou être généré au niveau du récepteur (bruit thermique).

De plus, le fait que l'onde IR ne traverse pas les murs impose, pour la conception d'une liaison reliant plusieurs pièces, l'installation d'un point d'accès par pièce (ces points d'accès étant interconnectés par une liaison filaire). Ceci est très différent en radio où un seul émetteur peut couvrir l'équivalent d'une habitation entière (comme c'est le cas en wifi). Enfin, les systèmes optiques sont extrêmement sensibles aux phénomènes de blocages (shadowing). Ces phénomènes de blocages sont provoqués par la rupture du lien entre l'émetteur et le récepteur ou par un obstacle présent dans l'environnement [47].

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a détaillé la différence entre les technologies optiques FSO, SMF et OWC et nous avons exposé chaque canal et son domaine d'utilisation. 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. De plus, nous avons présenté quelques applications sur les communications optiques sans fil, et on a vu leurs avantages et inconvénients. Les résultats et les interprétations de la conception et l'évaluation des performances d'un système optique pour les télécommunications à haut débit en utilisant ces trois technologies seront présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

Résultats et Interprétations

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'étude et la conception d'un système de transmission optique à très haut débit en utilisant trois canaux différents, à savoir FSO, SMF et OWC. La théorie précédente nous a permis de développer une simulation introduite sous le logiciel industriel OptiSystem. Tout d'abord, nous commençons par une description sur la performance d'une liaison optique à haut débit et une présentation de logiciel OptiSystem, suivie d'une configuration des différentes simulations effectuées sur des liaisons optiques nécessaires pour étudier la variation des critères de qualité en modifiant les paramètres essentiels de simulation.

III.2 Performances d'une liaison optique à haute débit

La qualité des transmissions numériques est évaluée en mesurant le taux d'erreur binaire, le TEB. Des appareils spécialisés engendrent des séquences aléatoires et comparent le signal en sortie de la liaison optique avec le signal d'entrée. Le TEB est obtenu en divisant le nombre d'erreurs par le nombre total de bits. Compte tenu de la haute qualité des transmissions optiques, on spécifie des TEB jusqu'à 10^{-12} ce qui correspond à un bit erroné pour mille milliards de bits transmis, il faut donc effectuer les mesures pendant un intervalle de temps suffisamment long afin d'obtenir une mesure fiable. Par exemple, on emploie presque deux minutes pour des mesures à un débit de 10 Gb/s. On utilise souvent en télécommunications la méthode dite du diagramme de l'œil pour décrire la dégradation par le bruit et la dispersion d'un signal numérique. Une séquence aléatoire de bits est visualisée sur un oscilloscope en mode d'accumulation en fonction du temps, la somme de tous ces signaux aboutissent à une forme de signal appelé l'œil.

Sans bruit, les traces se superposent exactement. Quand le bruit augmente les signaux variant et la trace s'épaissit, les transitions dans le temps deviennent aussi moins définies à cause de la gigue qui augmente, on dit que « l'œil se ferme » (voir la figure III.1) [48].

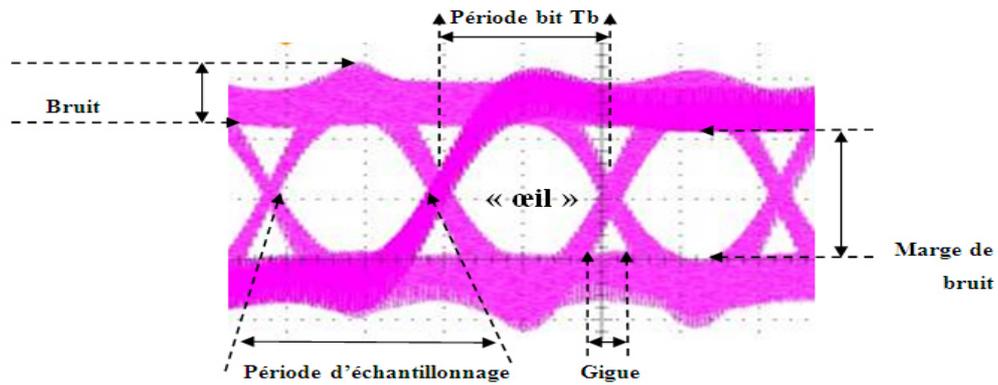


Figure III.1. Diagramme de l'œil d'une transmission par fibre optique [48].

III.3 Présentation du logiciel OptiSystem

III.3.1 Optiwave : un logiciel complet pour la simulation optique

Les systèmes des télécommunications optiques présentent une complexité dans leur modélisation et leur simulation. Le dessin et l'analyse des systèmes incluent des composants non-linéaires et des sources non gaussiennes du bruit, ce qui ne facilite pas la tâche du concepteur [49]. OptiSystem vient résoudre ces problèmes tant par la simplicité de son utilisation que par la grande variété de sa bibliothèque de composants. OptiSystem Design est un paquet destiné à la simulation des communications optiques en mode simulation, ce logiciel innovateur permet la conception, le test et l'optimisation virtuelle des liaisons optiques de tous types [49].

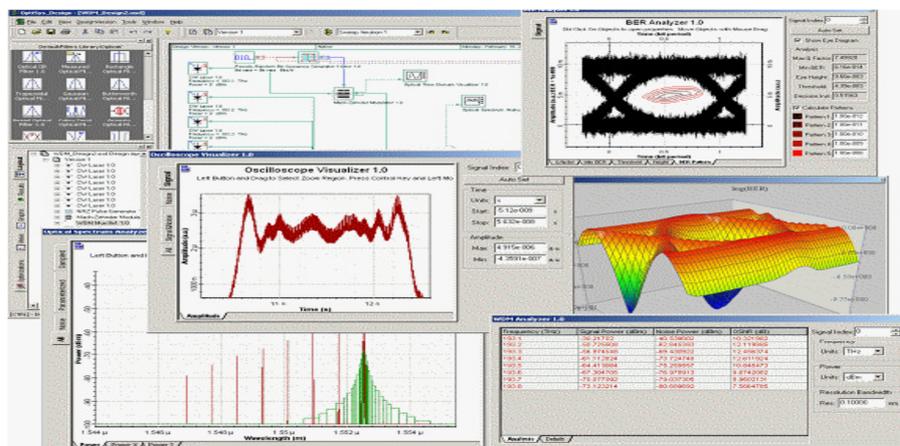


Figure III.2. Optiwave : l'interface graphique de l'utilisateur, la bibliothèque des composants, l'éditeur de disposition et les outils de la visualisation.

Optiwave permet un contrôle de l'interface de l'utilisateur graphique indépendamment de la disposition des composants optiques et du net-list. Optiwave comprend aussi une bibliothèque étendue de composants actifs et passifs dont on peut facilement faire varier leurs paramètres physiques.

III.3.2 Les principaux avantages

Optiwave est une application complète pour établir des simulations et des tests de montages optiques, en effet Optiwave comprend une bibliothèque riche de composants, tels que les fibres et des appareillages de mesures paramétrables.

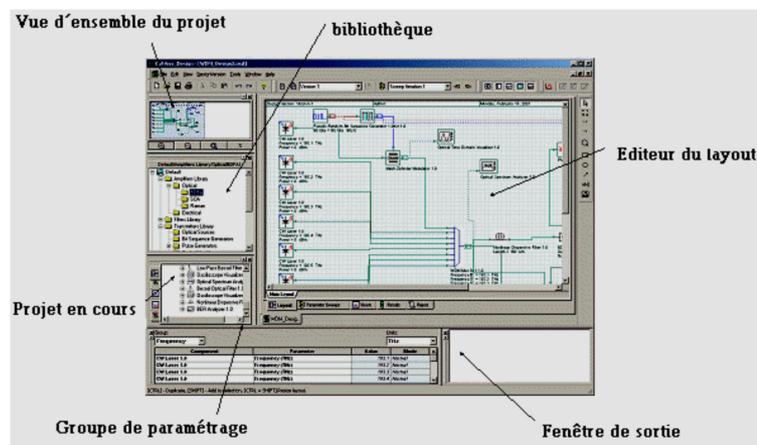


Figure III.3. Les sous fenêtres d'OptiSystem.

Optiwave est une application Xwindows, elle comprend essentiellement une fenêtre principale répartie en plusieurs parties :

- Vue d'ensemble du projet : permet la visualisation miniature du layout en cours d'édition ;
- Bibliothèque : une base de données de divers composants existants ;
- Editeur du layout : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception ;
- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composant correspondant au projet en cours ;
- Groupe de paramétrage : permet le paramétrage global du projet en cours et la simulation ;

- Fenêtre de sortie : lors de la simulation, cette fenêtre permet la visualisation des diverses phases de la simulation ou des messages d'erreurs.

III.3.3 Edition et simulation

Lors de la conception d'un layout, il suffit de glisser le composant de la bibliothèque vers le layout pour le placer. OptiSystem permet aussi le paramétrage pour chaque composant défini dans le layout. En effet, un double-clic sur le composant permet l'affichage de ses paramètres.

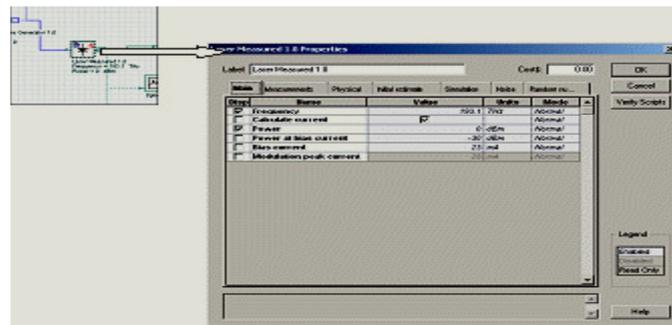


Figure III.4. Le paramétrage d'un composant.

Par contre, avant de lancer la simulation, le layout présente aussi des paramètres qu'on peut contrôler par un simple double-clic dans le layout [49].

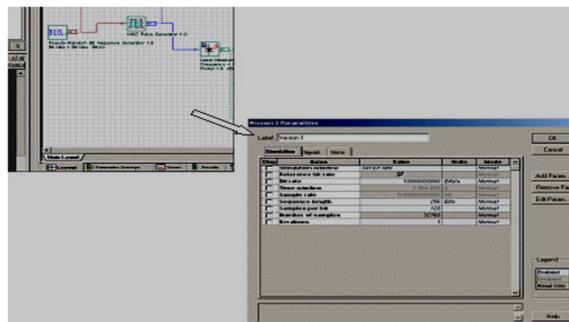


Figure III.5. Modification des paramètres globale du layout.

Pour lancer la simulation, il suffit de saisir ou bien en tapant simultanément Ctrl+F5 ou bien en accédant directement par le menu Fichier puis Calculate...

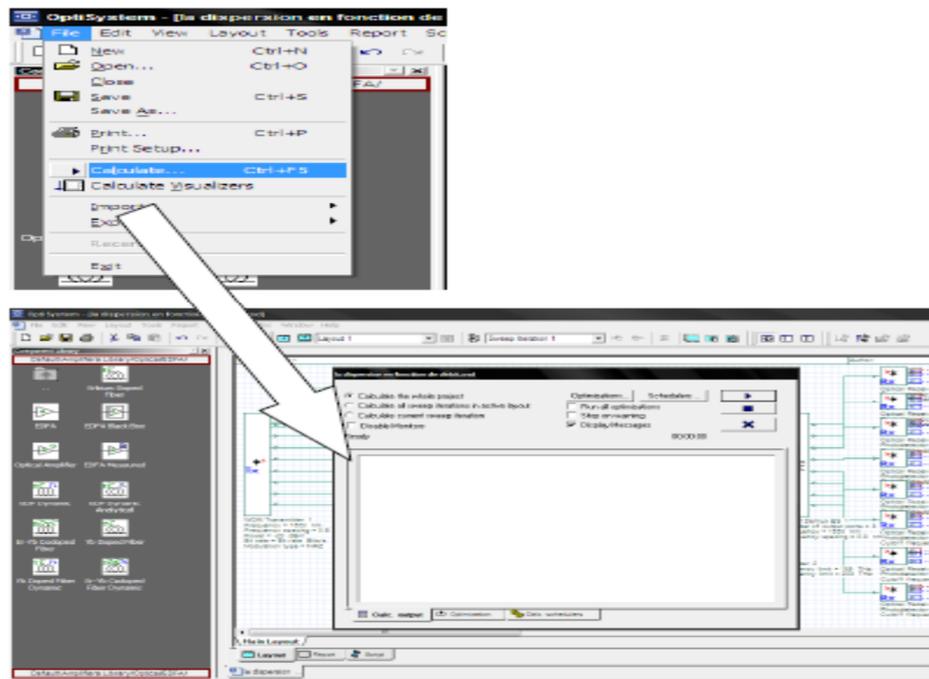


Figure III.6. Démarrage de la simulation.

Enfin, pour visualiser les diverses analyses, un double-clic sur l'appareil de mesure pour afficher la simulation en 2D ou en 3D.

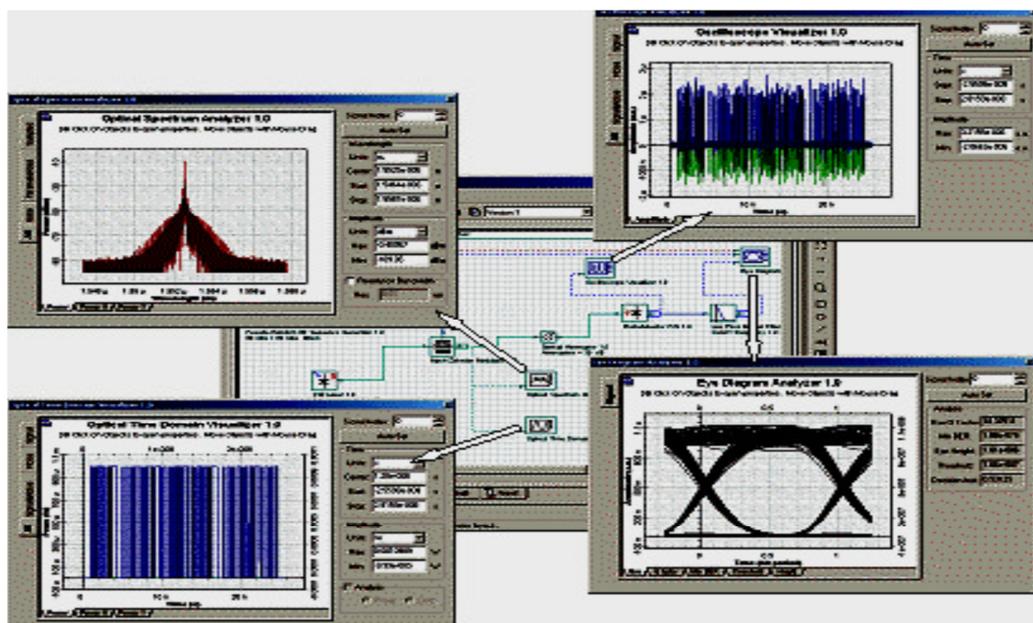


Figure III.7. Affichage des résultats de la simulation

III.4 Résultats de simulation et interprétations

III.4.1 Étude et évaluation de la performance d'un système de communication optique en utilisant différents canaux

III.4.1.1 Premier scénario

Le système de communication optique que nous allons étudier ici, se compose de trois sections, à savoir l'émetteur optique, le canal de propagation et le récepteur optique, comme il est indiqué sur la figure III.8. Cependant, ce système possède le même émetteur optique OLT avec différents canaux pour différents récepteurs optiques ONUs.

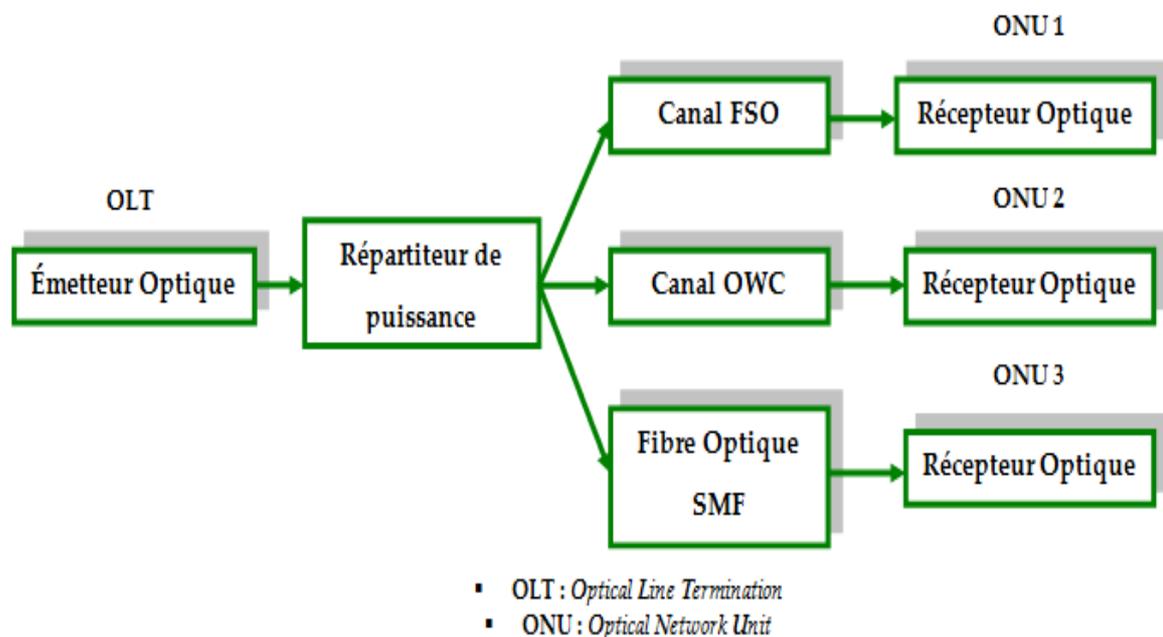


Figure III.8. Conception du système proposé pour le premier scénario.

La figure III.9 illustre les composants d'un émetteur optique OLT. OLT se compose de : générateur de données (PRBS), générateur d'impulsions électriques (NRZ), source optique (DL) et un modulateur Match-Zehnder. La puissance optique de l'émetteur est de 30 mW et en plus, la source DL s'exécute sur une longueur d'onde de 1552.52 nm. Cependant, nous avons utilisé un générateur d'impulsions électriques Non-Return-to-Zero (NRZ) pour fournir un format de modulation sur des données numériques qui sont distribuées à travers un générateur binaire pseudo-aléatoire PRBS (Pseudo-Random

Binary Sequence). Le débit de données entier est transmis sous forme des données numérique 0 et 1.

Ensuite, le signal passe à travers le répartiteur de puissance qui permet de distribuer la puissance émise par l'émetteur optique OLT dans trois canaux différents, à savoir FSO, OWC et SMF (voir la figure III.1). À la fin de chaque canal (FSO, OWC, SMF), nous trouvons des récepteurs optiques appellent des ONUs. Chaque ONU convertit les données optiques sous forme des données électriques.

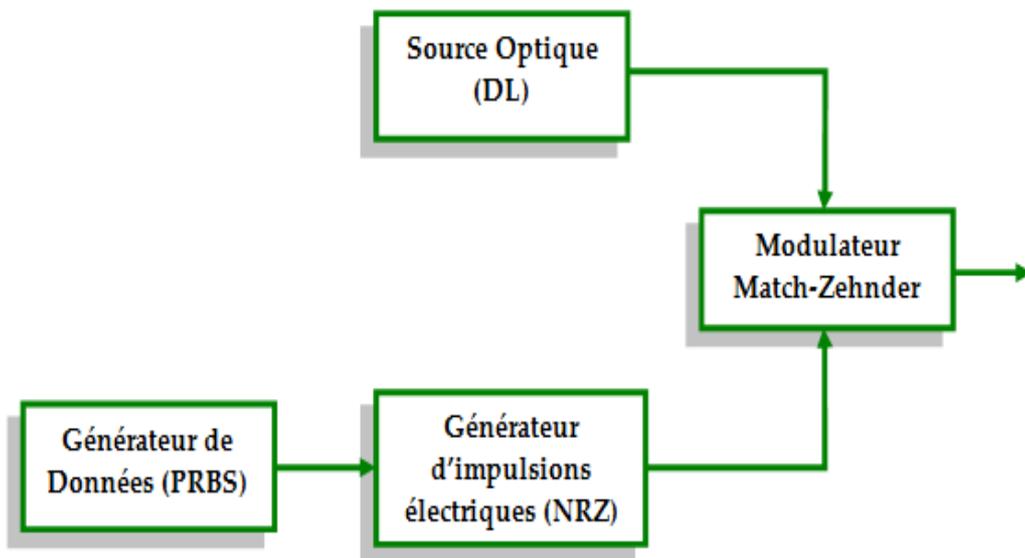


Figure III.9. Schéma du bloc d'un émetteur optique OLT.

Le récepteur optique ONU se compose d'un photo-détecteur d'avalanche (APD) qui sert à démoduler le signal optique à haute sensibilité, puis passe au filtre de Bessel passe-bas avec une fréquence de coupure 0.75 fois la fréquence de rythme (la fréquence de rythme représente le débit binaire sélectionné). Le filtre de Bessel passe-bas permet d'éliminer les composants de fréquence plus élevée. Les données originales sont obtenues et observées à l'aide d'un analyseur de BER (voir la figure III.10).



Figure III.10. Schéma du bloc d'un récepteur optique ONU.

Pour simuler notre premier scénario, nous nous basons sur les paramètres de simulation suivants (voir le tableau III.1) :

	Paramètres	Descriptions
	Débit de transmission	5 Gbps
	longueur des séquences	128 Bits
	Nombre d'échantillons par bit	64 échantillons
Canal FSO	Distance de la liaison FSO	4000 m
	Diamètre d'ouverture d'émetteur FSO	5 cm
	Diamètre d'ouverture de récepteur FSO	7.5 cm
	Angle de divergence	0.25 mrad
	Atténuation	2.5, 2.75 et 3 dB/km
Canal OWC	Distance de la liaison OWC	10000 m
	Diamètre d'ouverture d'émetteur OWC	10 cm
	Diamètre d'ouverture de récepteur OWC	20 cm
	Atténuation	2.5, 2.75 et 3 dB/km
Canal SMF	Distance de la liaison SMF	12000 m
	Dispersion chromatique	17 ps/nm/km
	Atténuation	2.5, 2.75 et 3 dB/km

Tableau III.1. Paramètres de simulation pour le premier scénario.

D'après la recommandation G.692 de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), la valeur de 193.1 THz a été prise comme fréquence de référence, car elle est proche de plusieurs raies de transition laser correspondant à des références de fréquences absolues et correspond à une longueur d'onde de 1552.524 nm. Cette recommandation a été établie sur la base de l'expérience acquise avec des amplificateurs à fibre de silice dopée à l'erbium EDFA, fonctionnant au voisinage de 1550 nm [2]. Pour cette longueur d'onde de 1552.524 nm, on a étudié et évalué les scénarios proposés dans ce mémoire.

III.4.1.2 Résultats et discussions du premier scénario

Dans ce scénario, nous allons présenter les résultats obtenus d'une analyse de trois canaux différents, à savoir FSO, OWC et SMF pour un système de communication optique à haut débit. Les effets de turbulence dans l'atmosphère pour les scénarios proposés ont été étudiés et évalués en termes de facteur Q et de BER.

III.4.1.2.1 Variation de puissance d'émission OLT

A) Canal FSO

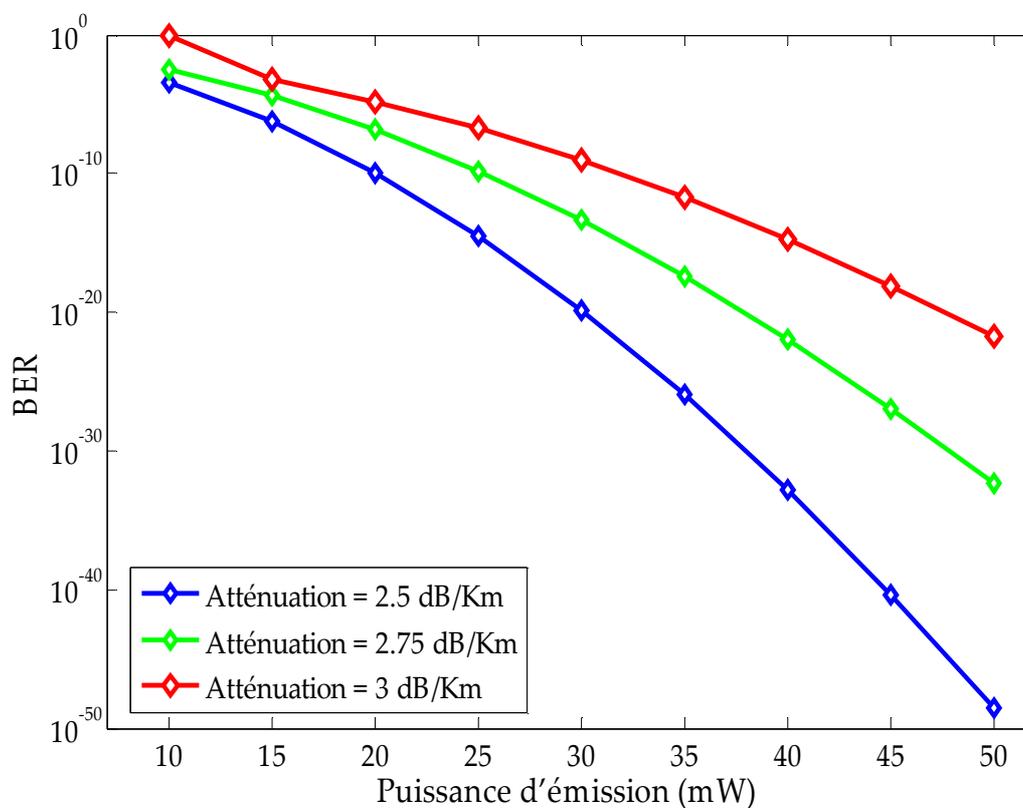


Figure III.11. BER vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-FSO.

La figure III.11 illustre la variation de BER en fonction de puissance optique d'un émetteur OLT pour une liaison FSO à 4 km avec un format de modulation NRZ. On a considéré que le canal d'émetteur OLT transmet 5 Gbps de données au récepteur optique ONU. Pour différentes atténuations sélectionnées, à savoir 2.5 dB/km, 2.75 dB/km et 3 dB/km. Nous avons constaté que pour une telle valeur de puissance optique d'un

émetteur OLT utilisé, l'augmentation d'atténuation affecte d'une façon significative la performance de la liaison FSO et cela est confirmé via les résultats obtenus de BER. Par exemple, pour une puissance optique d'un émetteur OLT 10 mW, on a obtenu les valeurs de BER suivante : 3.93×10^{-4} (2.5 dB/km), 3.16×10^{-3} (2.75 dB/km), 1×10^0 (3 dB/km), respectivement. Donc, nous avons conclu que l'augmentation d'atténuation subit une augmentation de BER, c'est-à-dire que la performance de la liaison FSO est dégradée.

En outre, la valeur de facteur de qualité est proportionnelle à la valeur de BER (voir la figure III.12). Dans ce cas, on a observé la même remarque concernant l'augmentation d'atténuation. Par exemple, pour une puissance optique d'un émetteur OLT de 10 mW, on a obtenu les valeurs de facteurs de qualité suivantes : 3.36 (2.5 dB/km), 2.73 (2.75 dB/km), 0 (3 dB/km), respectivement. Donc, nous avons conclu que l'augmentation d'atténuation subit une diminution du facteur de qualité.

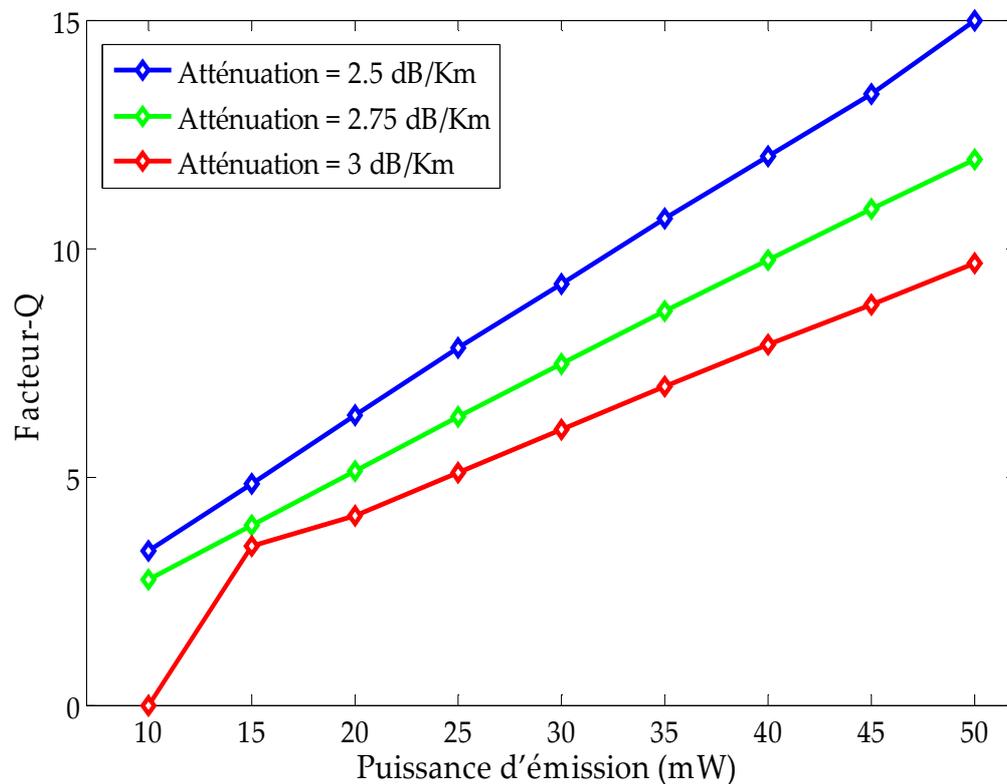


Figure III.12. Facteur-Q vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-FSO.

B) Canal OWC

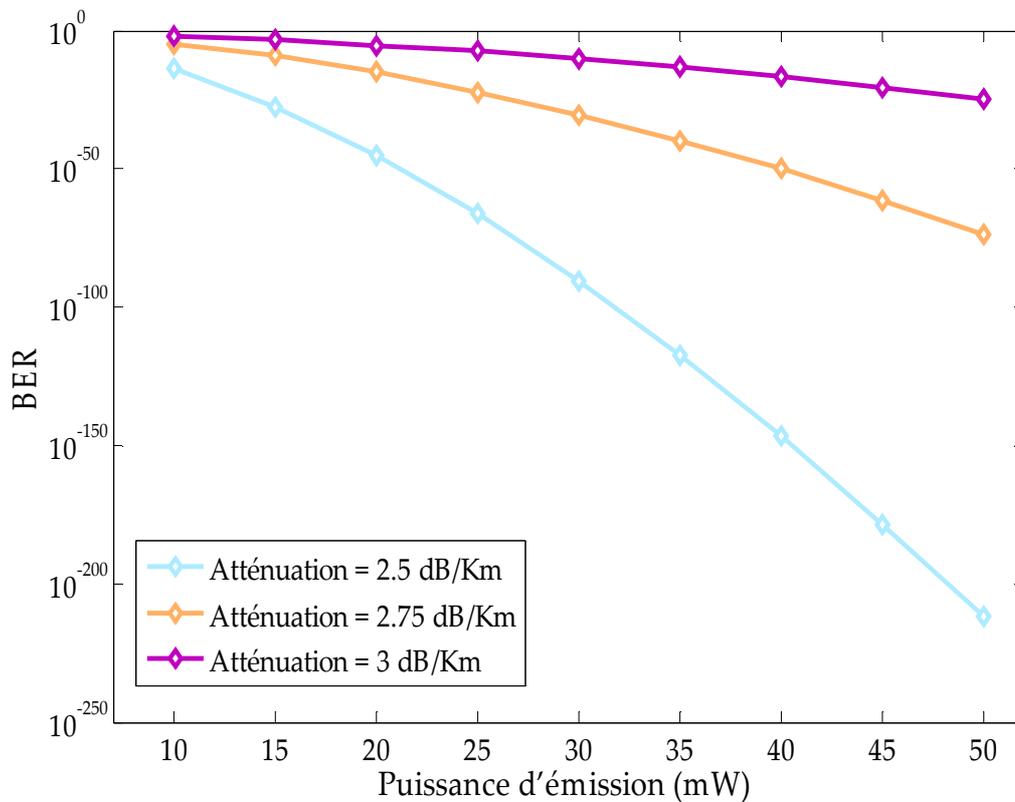


Figure III.13. BER vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-OWC.

La figure III.13 illustre la variation de BER en fonction de la puissance optique d'un émetteur OLT pour une liaison OWC à 10 km avec un format de modulation NRZ. Le canal OWC véhiculé 5 Gbps de données entre l'émetteur optique OLT et le récepteur optique ONU. Pour différentes atténuations sélectionnées, à savoir 2.5 dB/km, 2.75 dB/km et 3 dB/km. Nous avons constaté que pour une telle valeur de puissance optique d'un émetteur optique OLT fixée, l'augmentation d'atténuation est à l'origine d'accroît de BER. Par exemple, pour une puissance optique d'un émetteur optique OLT 10 mW, on a obtenu les valeurs de BER suivante : 2.43×10^{-14} (2.5 dB/km), 1.59×10^{-5} (2.75 dB/km), 1.08×10^{-2} (3 dB/km), respectivement. Donc, nous avons conclu que l'augmentation d'atténuation subit une augmentation de BER, c'est-à-dire que la performance de la liaison OWC est dégradée.

La figure III.14 montre la variation de facteur de qualité en fonction de puissance optique d'un émetteur OLT pour une liaison OWC à 10 km avec un format de modulation NRZ. On a enregistré que l'augmentation d'atténuation a une nette influence sur la qualité de performance de la liaison OWC, plus l'atténuation augmente plus on a une dégradation du facteur de qualité. Par exemple, pour une puissance optique d'un émetteur OLT 10 mW, on a obtenu les valeurs de facteurs de qualité suivante : 7.53 (2.5 dB/km) ,4.17 (2.75 dB/km), 2.29 (3 dB/km), respectivement.

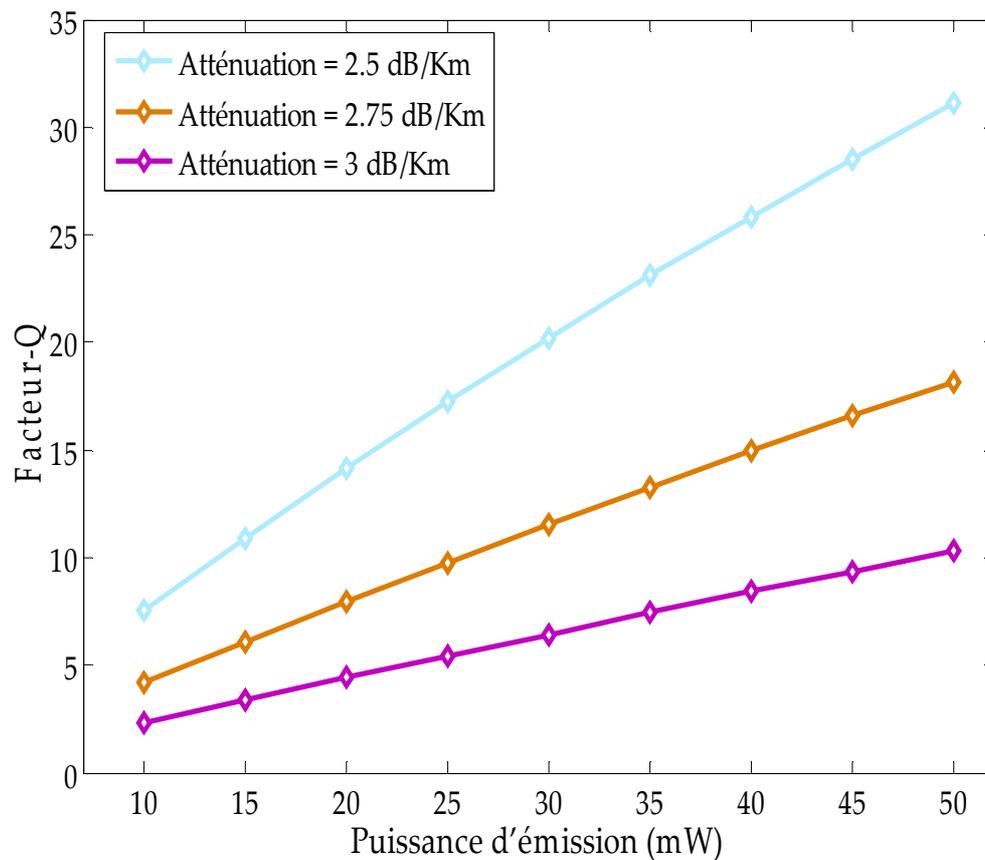


Figure III.14. Facteur-Q vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-OWC.

C) Canal SMF

La figure III.15 présente la variation de BER en fonction de puissance optique d'un émetteur OLT pour un tronçon de fibre de 12 km, type de SMF avec un format de modulation NRZ. Ce tronçon de fibre véhicule 5 Gbps de données entre l'émetteur

optique OLT et le récepteur optique ONU. Pour différentes atténuations sélectionnées, à savoir 2.5 dB/km, 2.75 dB/km et 3 dB/km, nous avons enregistré que pour une telle valeur de puissance optique d'un émetteur optique OLT sélectionné, l'augmentation d'atténuation munie une dégradation de performance d'une liaison SMF et cela est confirmé via les résultats obtenus de BER. Par exemple, pour une puissance optique d'un émetteur optique OLT 10 mW, on a obtenu les valeurs de BER suivantes : $2.11 * 10^{-8}$ (2.5 dB/km), $2.95 * 10^{-3}$ (2.75 dB/km), $1 * 10^0$ (3 dB/km), respectivement. Donc, nous avons conclu que la variation d'atténuation a une nette influence sur le BER.

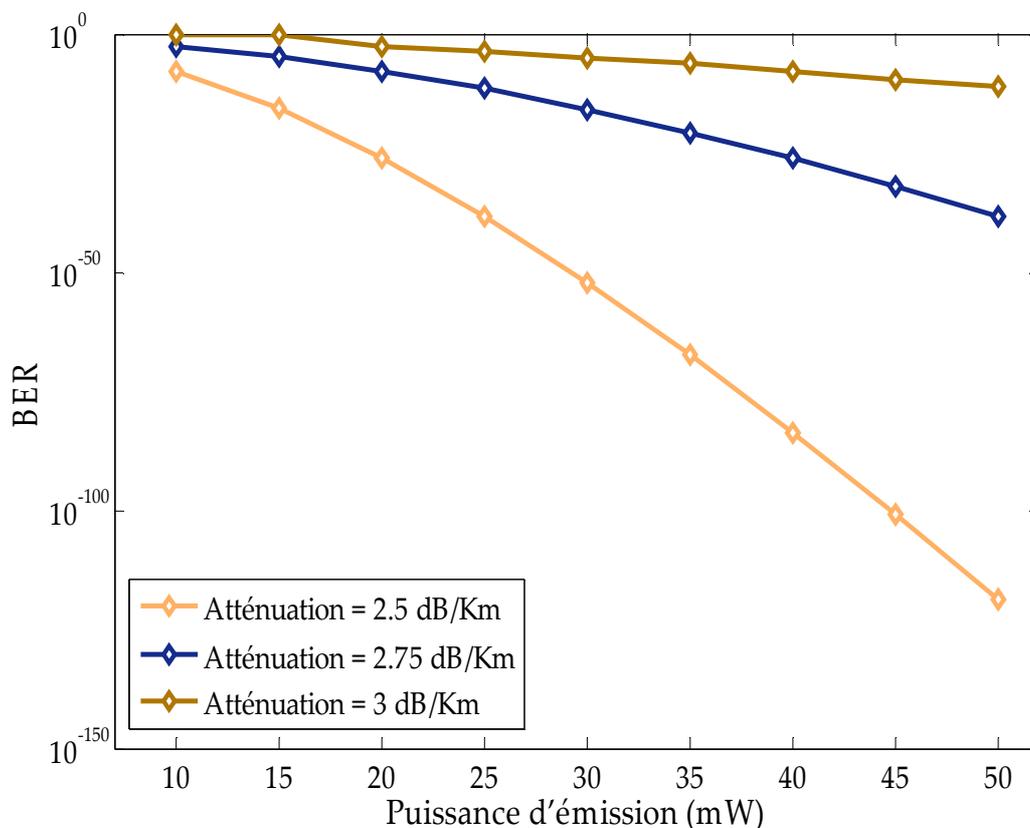


Figure III.15. BER vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-SMF.

La figure III.16 montre la variation de facteur de qualité en fonction de puissance optique d'un émetteur OLT pour un tronçon de fibre de 12 km, type de SMF avec un format de modulation NRZ. Comme nous avons indiqué auparavant, la valeur de facteur de qualité est proportionnelle à la valeur de BER. Pour cela, nous avons constaté que plus l'atténuation augmente, plus on a une dégradation du facteur de qualité, et le BER

augmente. Par exemple, pour une puissance optique d'un émetteur OLT 10 mW, on a obtenu les valeurs de facteurs de qualité suivante : 5.48 (2.5 dB/km) , 2.75 (2.75 dB/km), 0 (3 dB/km), respectivement.

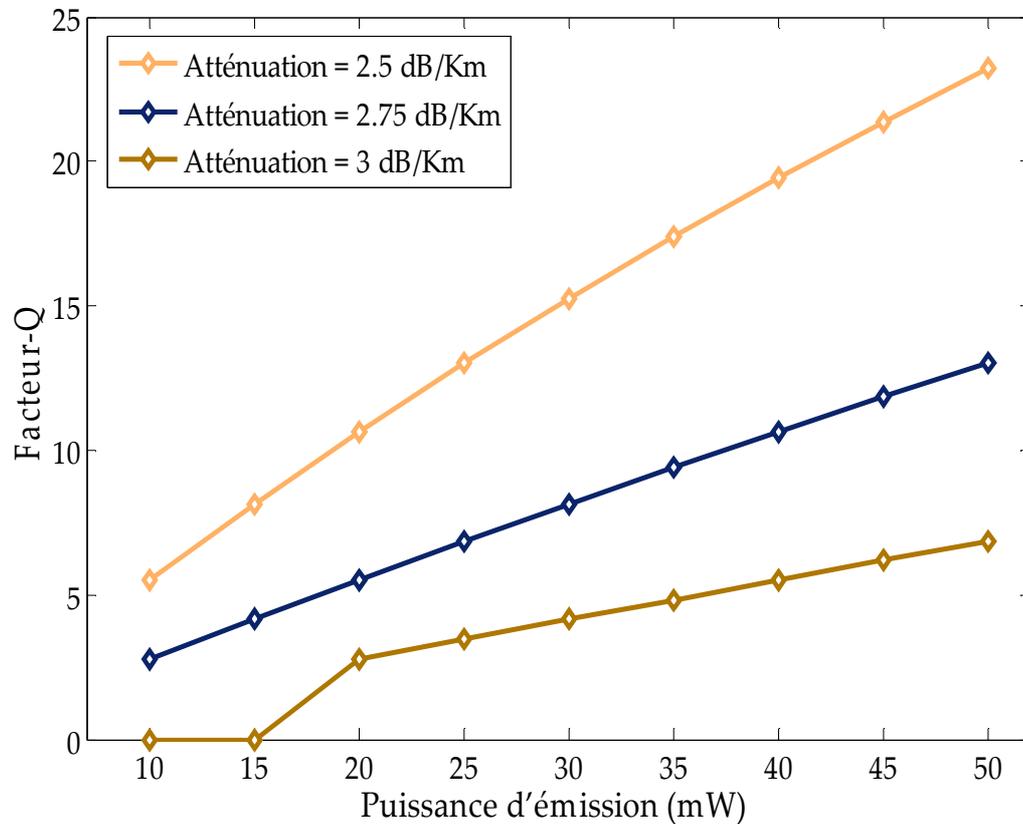


Figure III.16. Facteur-Q vs puissance d'émission OLT pour un format de modulation NRZ-SMF.

D) Synthèse des résultats

Dans ce scénario, nous avons étudié et évalué la performance d'une liaison optique pour trois types de canaux, à savoir FSO, OWC et SMF selon la variation de la puissance optique d'un émetteur OLT, pour différentes valeurs d'atténuation.

On a enregistré les points suivants :

- L'augmentation de paramètre d'atténuation cause une perte d'énergie du signal reçu au niveau de chaque récepteur ONU, ce qui résulte une forte augmentation du taux d'erreur de bit (BER) et une forte diminution de

facteur-Q de transmission, et cela quel que soit le type du canal (FSO, OWC et SMF).

- La valeur d'atténuation 2.75 dB/km présente de bons résultats lorsque nous voulons réaliser une liaison optique qui s'approche du cas réel.

On note généralement qu'un système d'une liaison optique doit avoir un BER compris entre 10^{-9} et 10^{-12} . En effet, nous avons trouvé les plages de puissances optiques d'un émetteur OTL pour les deux valeurs de BER que nous avons cité précédemment (voir le tableau III.2).

Canal	TEB (BER) à 2.75 dB/km	Puissance optique à 2.75 dB/km
FSO	$9.97 * 10^{-9}$ à $1.008 * 10^{-12}$	21.94 à 28.05 (mW)
OWC	$9.975 * 10^{-9}$ à $1.009 * 10^{-12}$	13.58 à 17.35(mW)
SMF	$8.872 * 10^{-9}$ à $1.024 * 10^{-12}$	20.47 à 25.74 (mW)

Tableau III.2. Valeurs de BER et de puissance optique à 2.75 dB/km pour différents canaux avec une modulation NRZ.

III.4.1.2.2 Variation de débit d'une liaison optique

A) Impact de débit

Les deux figures III.17 et III.18 illustrent respectivement, la variation de BER et le facteur de qualité en fonction de débit. Pour différentes liaisons optiques, à savoir FSO à 4 km, OWC à 10 km et SMF à 12 km, avec un format de modulation NRZ. On a considéré que l'émetteur OLT émet une puissance optique de 30 mW avec une atténuation de signal optique 2.75 dB/km.

A partir de deux figures III.17 et III.18, nous avons observé que l'augmentation de débit a une nette influence sur le BER et le facteur de qualité, les deux performances ont eu un changement considérable et nous avons enregistré une augmentation de BER et une dégradation de facteur de qualité pour les trois canaux de transmission, à savoir FSO, OWC et SMF. En outre, on remarque que l'évolution de BER et facteur de qualité pour le

canal OWC est beaucoup plus importante par rapport à celle des deux autres canaux FSO et SMF. En plus, les résultats obtenus pour ces deux derniers canaux sont presque identiques.

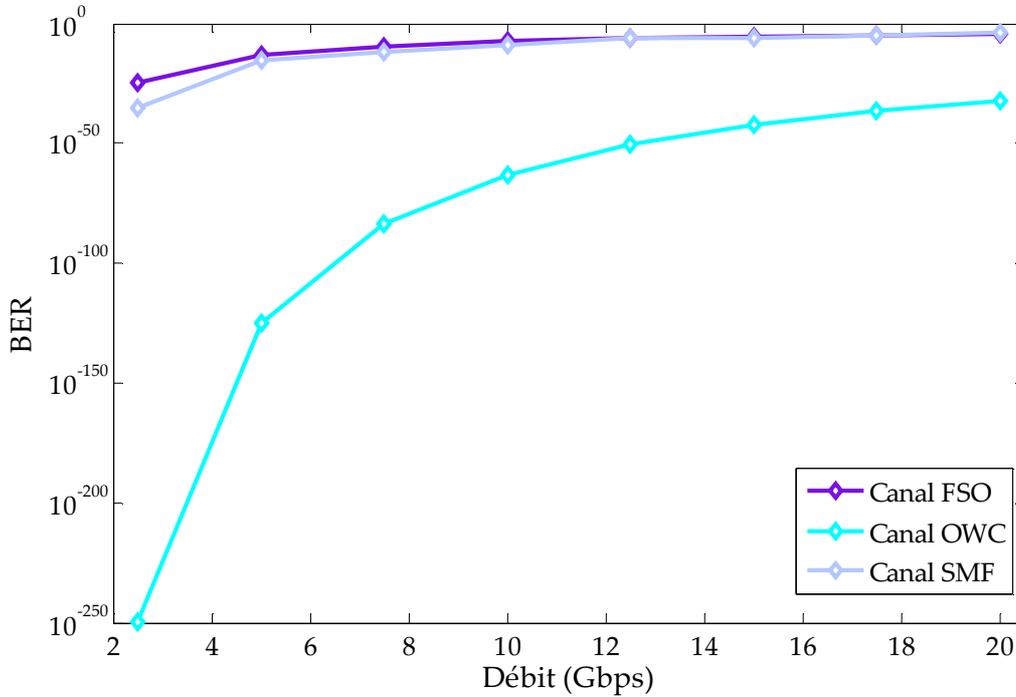


Figure III.17. BER vs débit pour un format de modulation NRZ.

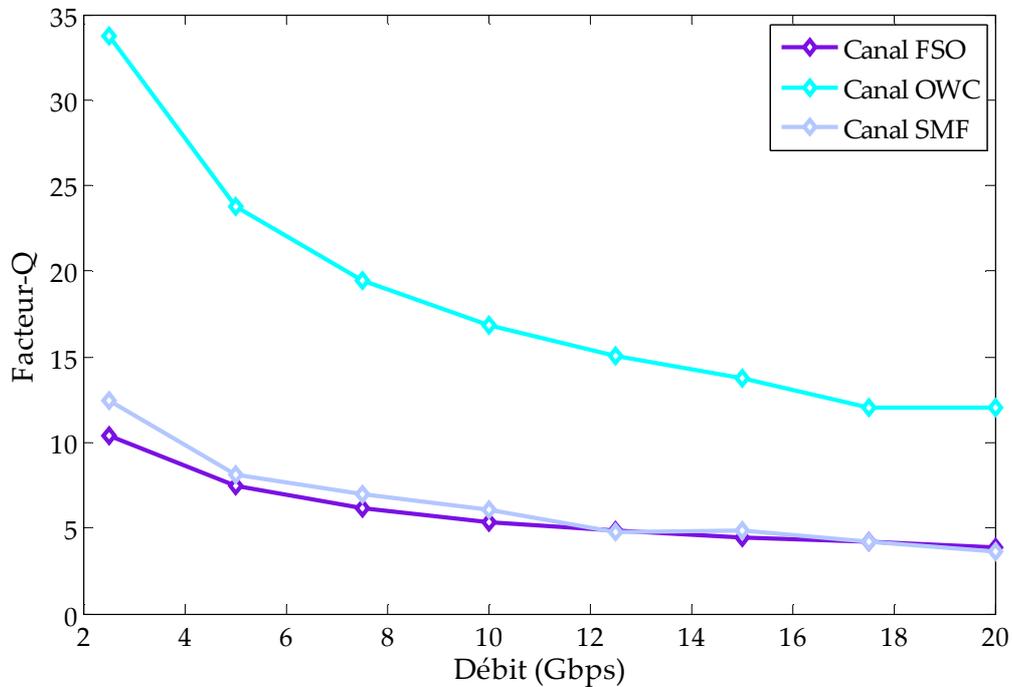
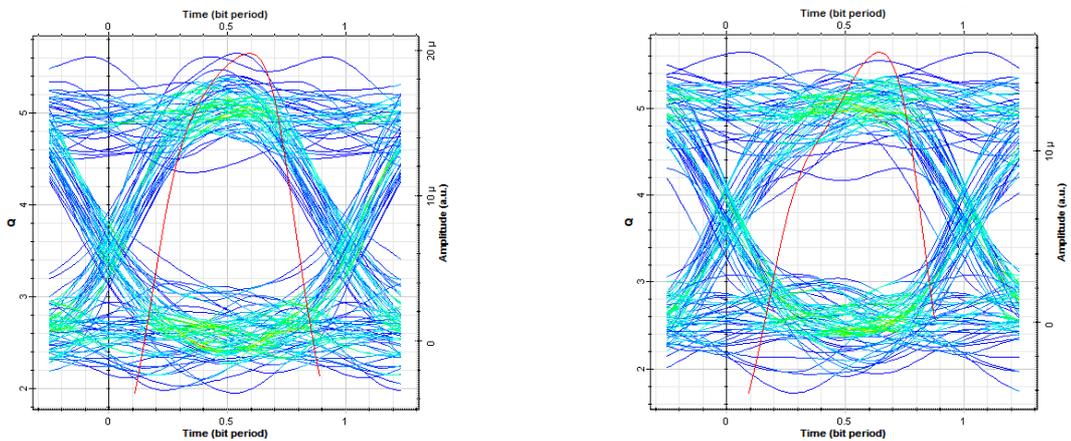


Figure III.18. Facteur-Q vs débit pour un format de modulation NRZ.

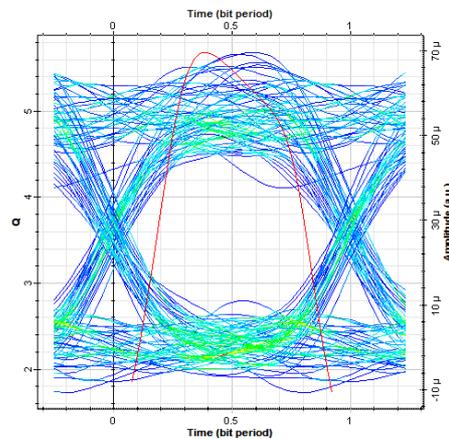
B) Synthèse des résultats

Puisque, on a noté que la performance d'une liaison optique dégradée quand le BER devenu supérieur à 10^{-9} , pour cela nous avons constaté les points suivants :

- canal SMF, avec les paramètres sélectionnés, nous pouvons transmettre des données avec un débit de 11 Gbps (voir la figure III.19) ;
- canal FSO, avec les paramètres sélectionnés, nous pouvons transmettre des données avec un débit de 9 Gbps (voir la figure III.19) ;
- canal OWC, avec les paramètres sélectionnés, nous pouvons transmettre des données avec un débit de 90 Gbps (voir la figure III.19).



SMF : Facteur-Q =5.65 et BER = $7.85 \cdot 10^{-09}$ FSO : Facteur-Q =5.64 et BER = $8.37 \cdot 10^{-09}$



OWC : Facteur-Q =5.68 et BER = $6.49 \cdot 10^{-09}$

Figure III.19. Diagramme de l'œil : FSO, SMF et OWC.

La figure III.19 montre les diagrammes de l'œil pour les trois canaux (FSO, SMF et OWC) pour un format de modulation NRZ. Chaque canal illustre leur performance selon les deux métriques : facteur de qualité et BER.

III.4.2 Étude et évaluation de la performance d'un système de communication optique P2P en utilisant un canal SMF-FSO-SMF

III.4.2.1 Deuxième scénario

Dans ce scénario, nous allons étudier et évaluer un problème majeur dans le cas où le débit de transmission d'une liaison optique augmente, ce problème est lié à la dispersion chromatique. La figure III. 20 illustre l'architecture du système de transmission proposé. Cependant, ce système est composé d'un module émetteur OLT, voir la figure III.9 (dans cette partie, nous avons considéré que le signal optique de l'émetteur OLT correspond aux deux formats de modulation NRZ et RZ), juste après, nous trouvons la liaison de transmission (voir la figure III.21). Le signal accumulé va attaquer le même récepteur optique utilisé auparavant (voir la figure III.10). Afin d'observer la variation des valeurs du taux d'erreur binaire BER, du facteur de qualité Q du système, on utilise un analyseur de BER. Les paramètres de scénario proposé sont motionnés dans le tableau III.3.

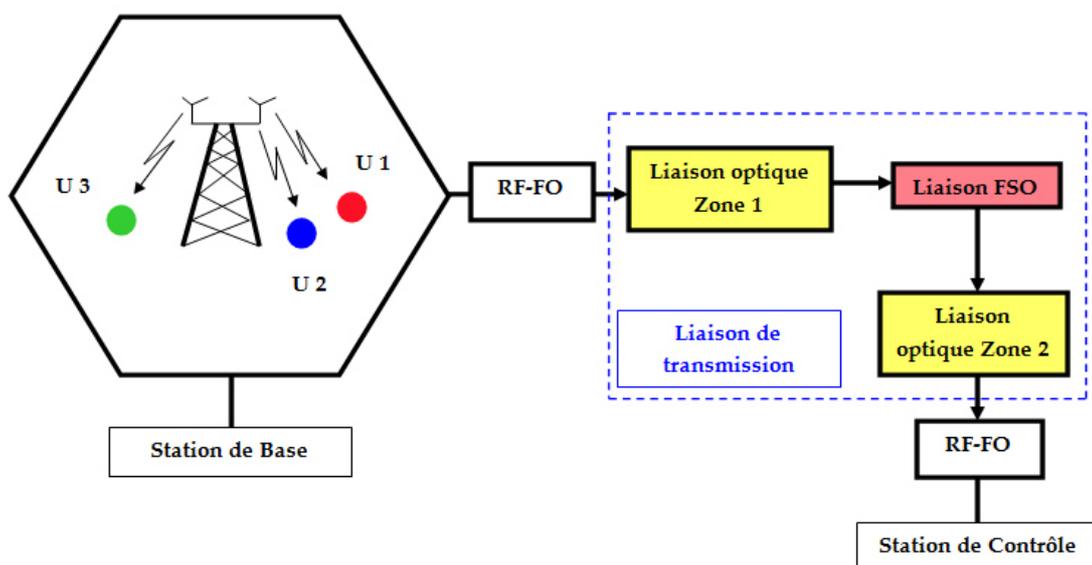


Figure III.20. Conception du système proposée de deuxième scénario.

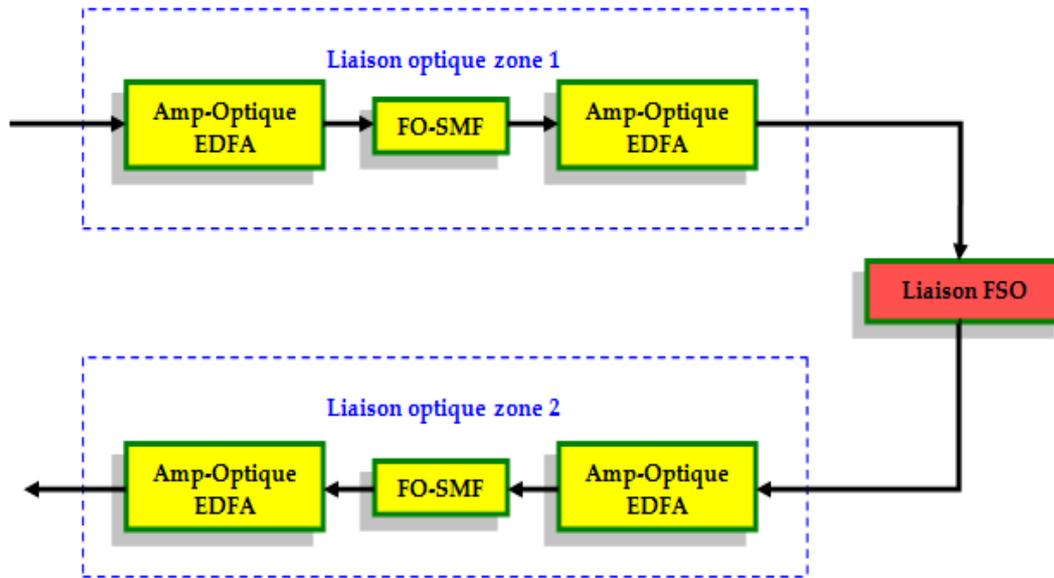


Figure III.21. Liaison de transmission sans compensation.

	Paramètres	Descriptions
	Puissance optique Tx	30 mW
	Longueur d'onde	1552.52 nm
	longueur des séquences	128 Bits
	Nombre d'échantillons par bit	64 échantillons
Canal FSO	Distance de la liaison FSO	4000 m
	Diamètre d'ouverture d'émetteur FSO	5 cm
	Diamètre d'ouverture de récepteur FSO	7.5 cm
	Angle de divergence	0.25 mrad
	Atténuation	2.75 dB/km
Canal SMF	Distance de la liaison SMF	12000 m
	Dispersion chromatique	17 ps/nm/km
	Atténuation	2.75 dB/km
Amplificateur Optique EDFA	Booster : gain et facteur de bruit	20 dB et 6 dB
	Ligne : gain et facteur de bruit	25 dB et 5.5 dB
	Préamplificateur : gain et facteur de bruit	35 dB et 4.5 dB

Tableau III.3. Paramètres de simulation pour le deuxième scénario.

III.4.2.2 Résultats et discussions de deuxième scénario

La figure III.22 ci-après illustre le taux d'erreur binaire en fonction de débit de transmission sans compensation pour un train pseudo-aléatoire de 128 bits, en utilisant des impulsions RZ et NRZ. Dans cette figure, nous pouvons constater clairement que la performance de cette liaison optique est dégradée au fur et à mesure que le débit augmente. En plus, nous avons observé que la liaison optique est plus performante dans le cas où nous utilisons des impulsions RZ par rapport NRZ. Par exemple, lorsque nous avons utilisé un débit de 7.5 Gbps, on a obtenu un taux d'erreur binaire de 9.83×10^{-10} avec un facteur de qualité 5.9994 (des impulsions RZ), par contre, avec le même débit de transmission, on a obtenu un taux d'erreur binaire de 9.075×10^{-08} avec un facteur de qualité 5.21268 (des impulsions NRZ).

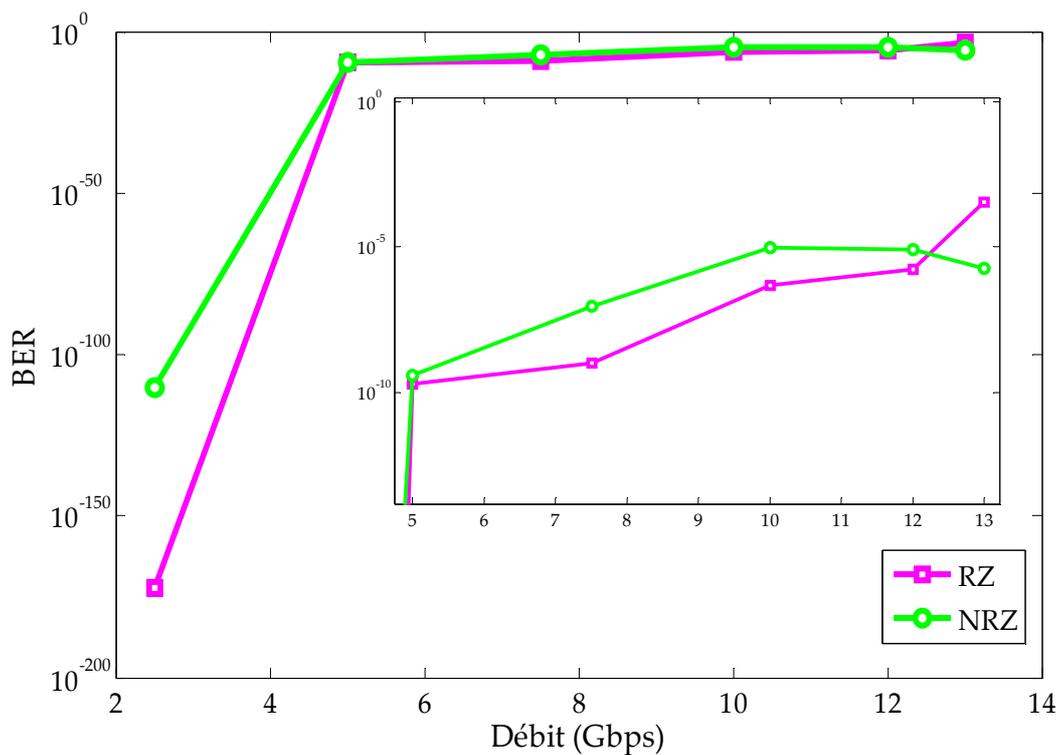


Figure III.22. BER vs débit sans compensation.

La figure III.23 représente le facteur de qualité (Facteur-Q) en fonction de débit de transmission sans compensation pour un train pseudo-aléatoire de 128 bits, en utilisant des impulsions RZ et NRZ. Les résultats obtenus confirment que la performance de la liaison optique proposée est dégradée et cela due à l'augmentation de débit de

transmission. Typiquement, des mesures de BER et de Facteur-Q à des débits de 10 Gbps jusqu'à 13 Gbps rapportent une mauvaise qualité du signal reçu au niveau de récepteur ONU. Pour cela, nous avons préconisé comme solution pour améliorer la qualité du signal du système présenté précédemment, l'insertion d'une fibre optique à dispersion compensatrice DCF (Dispersion Compensating Fiber) juste après un amplificateur optique. Cette fibre permet de compenser la dispersion chromatique introduite par la fibre de ligne grâce à une forte dispersion négative [3]. La fibre DCF est configurée en post-compensation (PoC) (voir la figure III.24). La fibre DCF est caractérisée par une dispersion chromatique de -80 ps/nm/km et d'une longueur de 2.55 km.

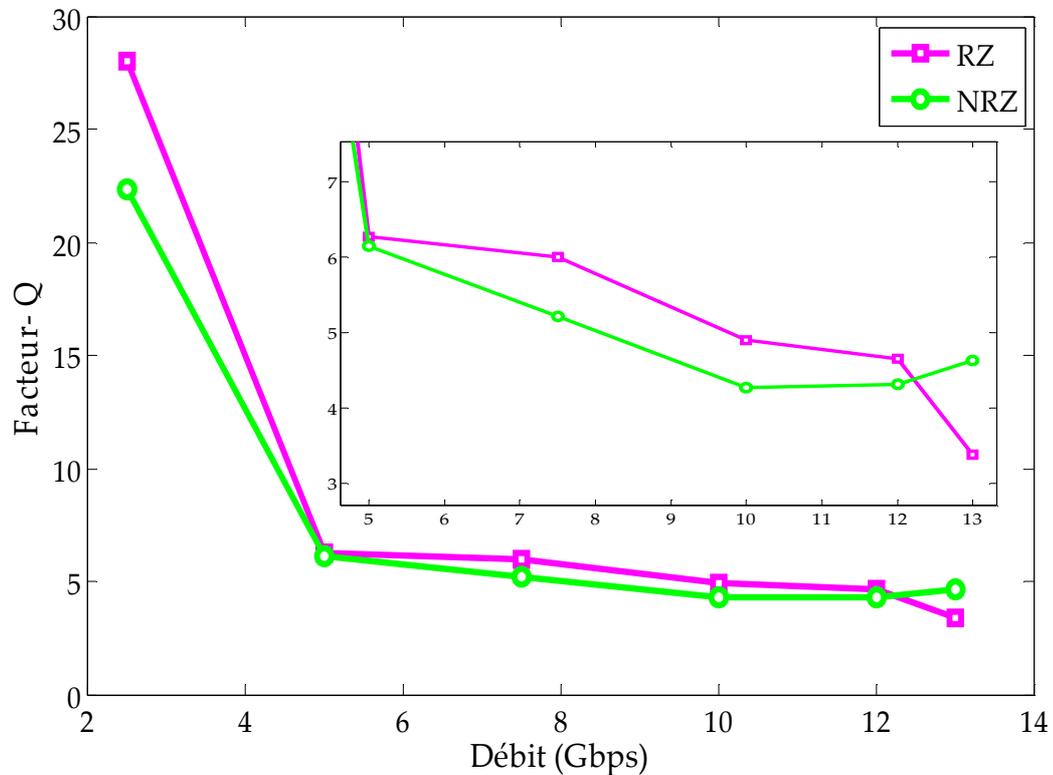


Figure III.23. Facteur-Q vs débit sans compensation.

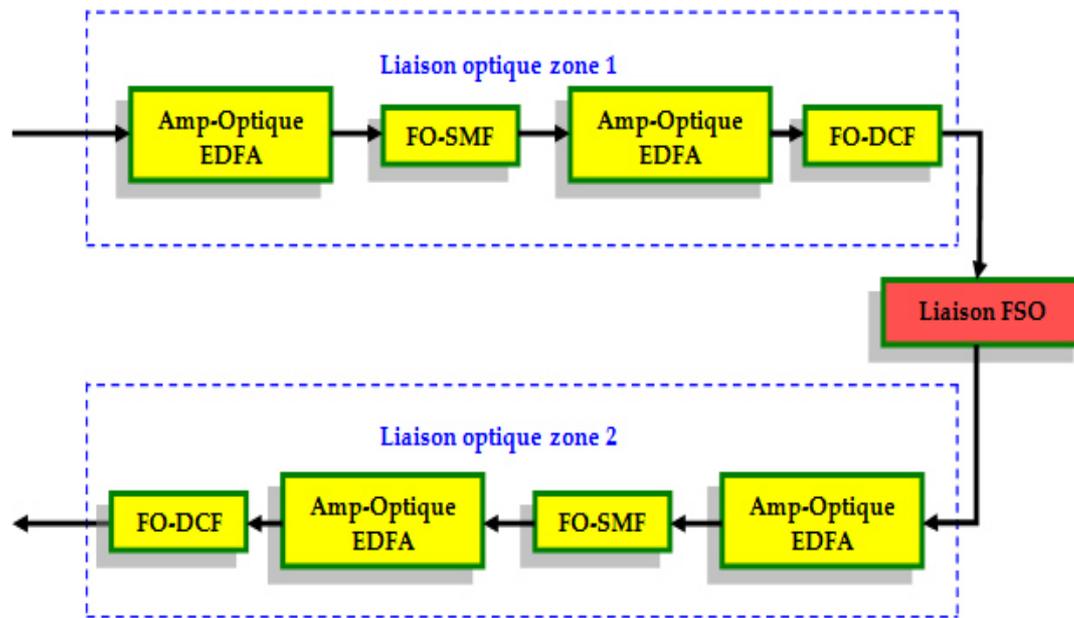
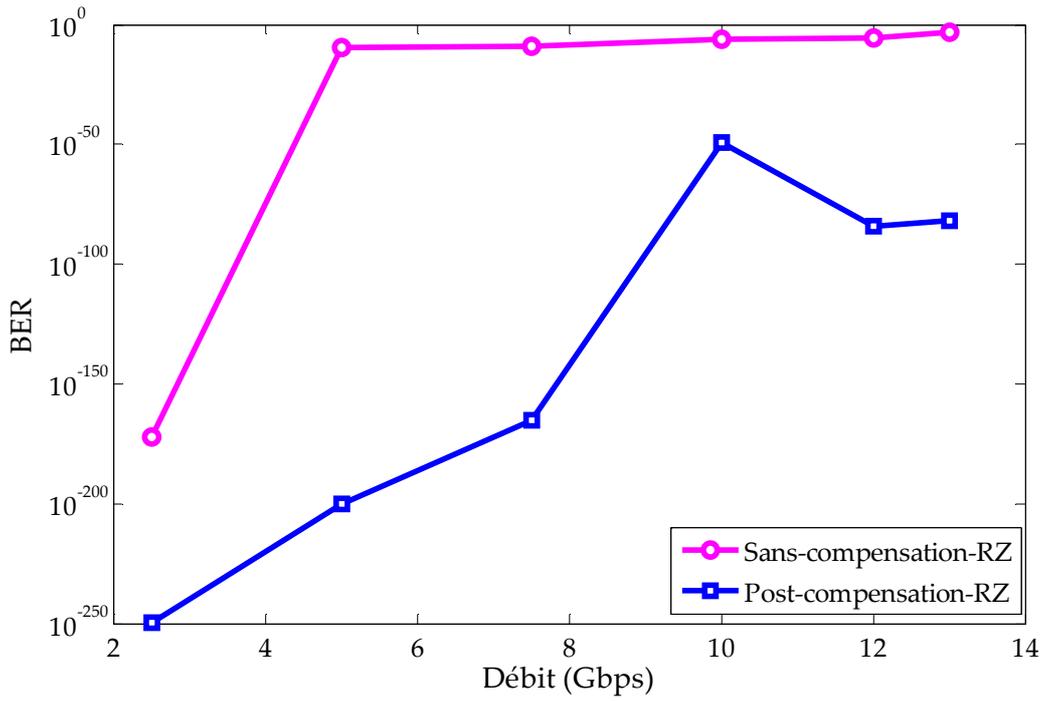


Figure III.24. Liaison de transmission avec compensation en utilisant DCF.

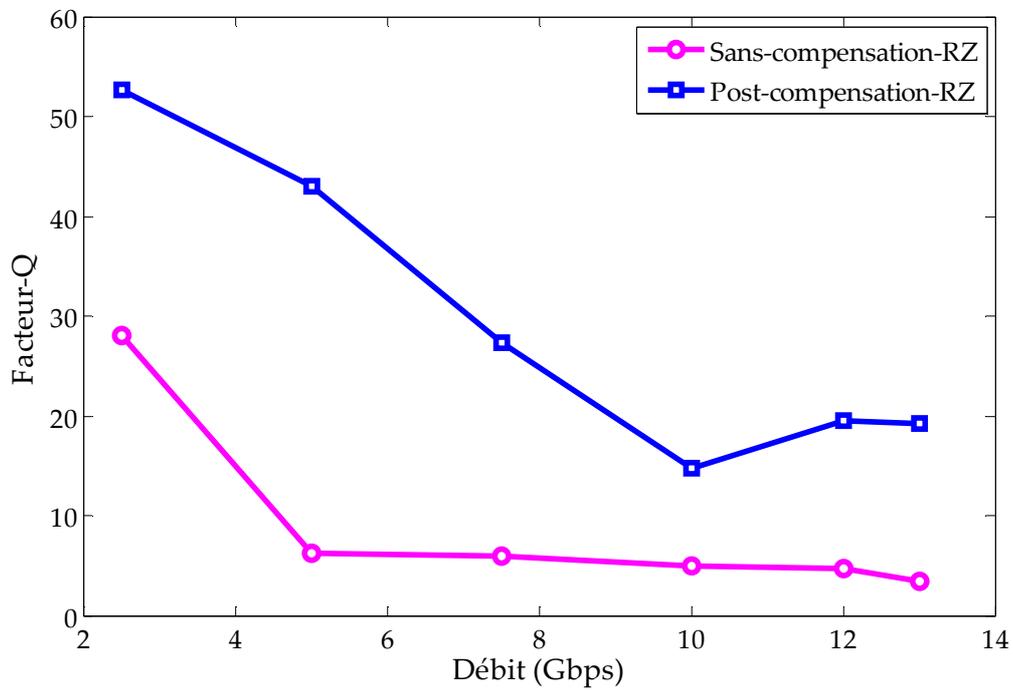
La figure III.25 et le tableau III.4 montrent la qualité du système de transmission présenté précédemment sans et avec la compensation de la dispersion chromatique utilisant des impulsions RZ. À partir de ces résultats (voir la figure III.25 et le tableau III.4), il est tout à fait clair que l'amélioration de qualité de transmission est obtenue avec la configuration post-compensation qui donne le meilleur taux d'erreur binaire ainsi que le meilleur facteur de qualité.

débit	BER sans compensation	Facteur-Q	BER avec compensation	Facteur-Q
2.5 Gbps	$4.23 * 10^{-173}$	28.01	$1.5 * 10^{-350}$	52.72
7.5 Gbps	$9.83 * 10^{-10}$	5.99	$1.02 * 10^{-165}$	27.39
13 Gbps	$3.49 * 10^{-04}$	3.38	$1.77 * 10^{-082}$	19.19

Tableau III.4. Les résultats obtenus sans et avec la compensation.



(A) BER vs débit.



(B) Facteur-Q vs débit.

Figure III.25. Qualité de transmission avec la compensation de la dispersion chromatique.

III.5 Conclusion

Dans cette investigation, la performance du système de communication optique est comparée via trois canaux à savoir FSO, OWC et SMF en termes de facteur Q et BER. En outre, nous avons constaté que lorsque l'atténuation augmente, la performance d'une liaison optique est dégradée. Par conséquent, il est conclu que OWC offre de meilleure performance par rapport à FSO, SMF dans l'existence de la turbulence atmosphérique. Nous avons confirmé que l'augmentation de débit crée un problème majeur dans une liaison optique. Ce phénomène est connu sous le nom « la dispersion chromatique ». On a utilisé une fibre DCF pour résoudre ce type de problème.

Conclusion Générale

En un peu plus d'une décennie, l'optique s'est affirmée comme la technique clé des réseaux de transport à grande capacité, supplantant toutes celles qui existaient auparavant, en termes de capacité comme de qualité de transmission. La transmission d'un signal sur support nécessite des précautions. Les caractéristiques du canal vont en effet modifier les propriétés du signal lors de cette transmission.

Trois canaux de transmission pour faire la liaison optique sont proposés dans ce jeu qui sont : FSO pour la communication en espace libre, OWC pour la communication optique sans fil et SMF pour la communication en utilisant la fibre optique. Notre travail a pour but d'analyser les performances de ces trois canaux.

L'étude de ce projet a comporté trois chapitres qui nous ont amenés aux conclusions suivantes :

Au cours du premier chapitre, nous avons brièvement décrit les composantes optoélectroniques de base constituant une liaison optique à haut débit.

Dans le deuxième chapitre, nous avons fait une comparaison entre les trois canaux FSO, OWC et SMF, où on a exposé chaque canal et son domaine d'utilisation.

Le dernier chapitre de ce projet est consacré à la conception et la simulation des différents canaux de transmission optique à haut débit, en utilisant le logiciel OptiSystem. Ces simulations nous ont montrées que pour les trois canaux, lorsque l'atténuation augmente, cela cause une dégradation de performance de la liaison optique. Toutefois, OWC offre des meilleures performances par rapport aux autres canaux, à savoir FSO et SMF qui ont plus en moins des valeurs proches ; dans l'existence de la turbulence atmosphérique. Après simulation et comparaison entre les deux techniques de codage, on a constaté que le codage RZ donne une performance meilleure par rapport au codage NRZ, aussi pour la technologie d'amplification de ligne alors avec compensation est plus performant que sans compensation.

L'augmentation de puissance augmente le facteur de qualité ce qui diminue le BER, c'est une bonne performance, mais on cherche à exploiter moins de puissance. Et de même pour la notion de débit, l'utilisation d'un débit très élevé donne chevauchement entre les impulsions.

En résumé, pour accroître la performance d'une ligne de transmission optique (avoir un facteur de qualité maximum et un BER minimum), notre étude a montré qu'il est

primordial d'utiliser la technique de codage RZ avec une technologie d'amplification avec compensation pour les trois canaux en prenant en considération aussi une atténuation basse de 2.75 dB/km et les paramètres : puissance, débit et distance ; où par exemple pour le paramètre puissance : pour le canal FSO, la puissance est de 28.05 mW, 17.35 mW pour OWC et 20.47 mW pour SMF donnent des bonnes performances, c'est-à-dire des valeurs de BER comprises dans l'intervalle 10^{-9} - 10^{-12} en utilisant l'atténuation déjà mentionnée (2.75 dB/km).

Références Bibliographiques

- [1] Mathieu LE FRANÇOIS, " étude et technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s ". Thèse de doctorat de l'université PARIS-SUD, France, 2007.
- [2] A. Belkhira et S .Mokrani, « L'amplification optique et son intérêt majeur dans les réseaux de télécommunications », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, Promotion juin 2010.
- [3] Pierre Lecoy," Télécoms sur fibres optiques ", © LAVOISIER, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, Vol.366, 2008, ISBN 3e édition 978-7462-1844-4.
- [4] Frédéric Gerome, " Conception et caractérisation de fibres compensatrices de dispersion chromatique pour application aux liaisons optiques WDM ", Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, Le 04 Novembre 2005.
- [5] Jean-Pierre Meunier, " Télécoms optiques, composants à fibres, systèmes de transmission ", © LAVOISIER, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, Vol.239, 2003, ISBN 2-7462-0721-4.
- [6] Jean-Louis VERNEUIL, " Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbit/s ", Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, Novembre 2003.
- [7] Halim Houari et Khatir Benmehemda Omar, " Routage optique dans les liaisons optique à haut débit WDM \ DWDM ", Mémoire d'ingénieur d'état en Télécommunications, Institut des Télécommunications Abdelhafid boussouf, 2003.
- [8] A. Dellal et E. Essafi, « Etude de l'amplification dans les systèmes de transmission par fibre optique », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en télécommunication, Institut National des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication, Promotion juin 2010.
- [9] Y. Cojan et J. C. Fontanella, " Propagation du rayonnement dans l'atmosphère ", Techniques de l'ingénieur, Traité Electronique, Paris, Dec., 1995.
- [10] <http://www.lasercomponents.com/fr/>.
- [11] Y. S. S. Torkestani, " Contribution à l'étude d'un réseau de communications optiques sans fils indoor-application à la télésurveillance en milieu hospitalier ", Thèse de l'université de Limoges, France, 2012.

- [12] A. K. Majumdar, " Free space laser communication performance in the atmospheric channel ", Science Business Media LLC, pp. 61, Springer, 2008.
- [13] Md. D. A and al., " Comparative Study of Path Loss Models of WiMAX at 2.5 GHz Frequency Band ", International Journal of Future Generation Communication and Networking Vol. 6, No. 2, Apr. 2013.
- [14] H. Henniger, O.Wilfert, " An Introduction to Free-space Optical Communications ", Radioengineering, Vol. 19, no. 2, Jun., 2010.
- [15] B. R. Mahafza " Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB ", ChapmanandHall-CRC, 2000.
- [16] T. Lambard, " Contribution à l'étude et la conception d'une antenne réseau à balayage électronique pour liaisons de données haut-débit entre un drone et un satellite en bande Ka", Thèse de l'université de Toulouse, France, 2010.
- [17] Vincent Foucal, " Conception d'interconnexions optiques haut débit courte distance en espace libre. Prototypage de modules de communication pour applications embarquées ".FOUCAL_Vincent_2010.
- [18] M. Al Naboulsi, " Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques : propagation, disponibilité et fiabilité ", Thèse de l'université de Bourgogne, France, 2005.
- [19] Rapport UIT-R F.2106, " Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre ".
- [20] Y. Cojan et J. C. Fontanella, " Propagation du rayonnement dans l'atmosphère ", Techniques de l'ingénieur, Traité Electronique, Paris, Dec., 1995.
- [21] O. RINGAR, " Utilisation des techniques avancées d'Emission/Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande ", Thèse de l'université de LIMOGES, France, 2015.
- [22] Danièle Dromard et Dominique Seret, " Architecture des réseaux (les transmissions et les supports) ", 2010. Pearson France, <http://www.pearson.fr/chap01.pdf>.
- [23] <http://www.cuc.eu/guide-fibre-optique>.
- [24] B. Cousin et C. Viho, " Introduction aux réseaux informatiques ", 19 janvier 2008. Université Rennes I, www.irisa.fr/prive/bcousin/Cours/TEL2007-08/01.Intro.2P.pdf.

- [25] Experide, " Guide de la fibre optique-2001 ", édition 2008, 32 rue de l'Avenir 69740 Genas - FRANCE, Vol.45. <http://www.experide-consulting.com>.
- [26] Ghomazi mehdi, " optimisation des performances d'une fibre optique dopée à l'erbium ", Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [27] Experide," Tout savoir sur la fibre optique", édition 2010, 32 rue de l'Avenir 69740 Genas - FRANCE, Vol.8. <http://www.experide-consulting.com>.
- [28] J. Barry, *Wireless optical communication systems*. Springer, 1994.
- [29] J. Kahn and J. Barry, "Wireless infrared communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, 1997.
- [30] S. Hranilovic, *Wireless Infrared Communications*. Springer, 2005.
- [31] S. Arnon, J.R. Barry, G.K. Karagiannidis, R. Schober, and M. Uysal (Eds.): *Advanced Optical Wireless*.
- [32] F. R. Gfeller and U. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuseinfrared radiation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1474– 1486, 1979
- [33] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB*. CRC Press, 2012.
- [34] R. Ramirez-Iniguez and R. Green, "Indoor optical wireless communications," in *Optical Wireless Communications (Ref. No. 1999/128)*, IEE Colloquium on. IET, 1999, pp. 14–1.
- [35] M. Paksuniemi, H. Sorvoja, E. Alasaarela, and R. Myllyla, "Wireless sensor and data transmission needs and technologies for patient monitoring in the operating room and intensive care unit," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005.27th Annual International Conference of the. IEEE*, 2006, pp. 5182–5185.
- [36] S.-H. Yu, O. Shih, H.-M. Tsai, and R. Roberts: *Smart automotive lighting for vehicle safety*, *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 50-59, Dec. 2013.
- [37] I. Stefan and H. Haas: *Area spectral efficiency performance comparison between VLC and RF femtocell networks*, in *Proc. IEEE International Communications Conference (ICC'13)*, 2013.

- [38] G. Cossu, A. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella: 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED, *Opt. Express* 20, B501-B506 (2012).
- [39] D. Tsonev, C. Hyunchae, S. Rajbhandari, J.J.D. McKendry, S. Videv, E. Gu, M. Haji, S. Watson, A.E. Kelly, G. Faulkner, M.D. Dawson, H. Haas, and D. O'Brien: A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 7, pp. 637-640, Apr. 2014.
- [40] C. Danakis, M. Afgani, G. Povey, I. Underwood, and H. Haas: Using a CMOS camera sensor for visible light communication, in Proc.IEEE Globecom Workshop on OWC, 2012.
- [41] H. Haan, M. Gerken, and M. Tausendfreund: Long-range laser communication terminals: Technically interesting, commercially incalculable, in Proc. 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), Jul. 2012.
- [42] C. Kachris, K. Bergman, Keren, and I. Tomkos (Eds.): Optical Interconnects for Future Data Center Networks, Springer, 2013.
- [43] A.G. Kirk: Free-space optical interconnects, Book Chapter in Optical Interconnects: The Silicon Approach, Springer, 2006.
- [44] <http://cir-inc.com/> (last accessed at 06/07/2014).
- [45] R. Ramirez-Iniguez and R. Green, "Indoor optical wireless communications," in Optical Wireless Communications (Ref. No. 1999/128), IEE Colloquium on. IET, 1999, pp. 14–1.
- [46] Z. Ghassemlooy and A. Hayes, "Indoor optical wireless communications systems – part 1 : Review," School of Engineering, Northumbria University, 2003.
- [47] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication : potential and state-of-the-art," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 9, pp. 56–62, 2011.
- [48] Zeno Toffano, " Optoélectronique, Composant photoniques et fibres optiques ", © Ellipses édition marketing S.A, 32 rue Bargue 75740 Paris cedex 15, Vol.316, 2001, ISBN 2-7298- 0703-9.
- [49] Sondes KHAMIR, " Génération d'impulsion optiques brèves 40 GHz par mélange a quatre ondes ", *PFE, Ecole Supérieur des Communications de Tunis*, 2005.