

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



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

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

**Etude des performances d'un système de communication optique
hybride SDM/FSO utilisant la lumière laser à 2 μm**

Présenté par :
Hamamdía Ines

Sous la direction de :
Dr . Graini leila

Juin 2022

Remerciements

♥ *Je remercie tout d'abord " Allah" le tout puissant de nous avoir donné la santé, le courage et la patience afin d'arriver à la finalité de ce parcours.*

♥ *Je vous remercie beaucoup et grandement pour ceux qui ont joué le plus grand rôle en me guidant pendant les étapes de l'achèvement de ce travail, mon encadreur Madame " **GRAINI Leïla**" qui a gentiment supervisé mon travail et m'a donné beaucoup de temps et d'efforts. Merci beaucoup et merci à vous mon aimable professeur*

♥ *Je tiens à remercier également les membres du jury qui ont fait l'honneur d'examiner ce travail et d'apporter leurs réflexions et suggestions scientifiques.*

♥ *Un grand Merci est également adressé au **Mr. FRAGA Chams-Eddine** et **Mr .TÍFOUTI Issam***

Dédicace

Je tien à dédier ce travail

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A Mon frère et mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A tous les gens m'aiment ...

Merci d'être toujours là pour moi.

 *Ines*

الملخص

نشر الوصلات الضوئية اللاسلكية FSO بسيط وسريع واقتصادي على عكس شبكات الألياف. ومع ذلك، فإن هشاشتها في مواجهة انخفاض الرؤية بعد بضعة كيلومترات من المدى يعيق استخدامها. بالإضافة إلى ذلك، يتدهور أداء FSO بسبب التوهين الجوي الناجم عن الظروف الجوية المختلفة. ومع ذلك، هناك حلول مختلفة لهذه المشاكل. خاصة مع اختيار الطول الموجي وتقنية الإرسال المستخدمة.

يتضمن هذا العمل من ناحية، على استخدام الأطوال الموجية 2 ميكرومتر مما يجعل من الممكن ربط أداء الاتصالات وحالة القناة، من حيث الاضطراب، ومن ناحية أخرى، استخدام تقنيات تعدد الإرسال المكاني (SDM)، والتي ظهرت بسرعة كتقنية واعدة لزيادة عرض النطاق الترددي الكلي للشبكات البصرية الحالية.

ويستند النظام المقترح، SDM/FSO عند $\lambda = 2$ ميكرومتر، إلى تعدد الإرسال SDM التقسيمي (MDM)، حيث تستخدم الأوضاع المكانية كقنوات معلومات تحمل تدفقات بيانات مستقلة. بالإضافة إلى ذلك، يعد اختيار الوضع في SDM أيضاً مشكلة مهمة. يجب أن يؤخذ في الاعتبار اختيار أفضل وضع للوصول إلى أفضل مسافة بمعدل خطأ أقل (BER). أظهرت دراستنا أن أوضاع Laguerre-Gaussian، هي أكثر الأوضاع المفضلة في FSO. وأخيراً، تم وضع نموذج لنظام SDM/FSO المقترح بواسطة البرنامج الحاسوبي. Optisystem، مع الأخذ بعين الاعتبار الخسائر المختلفة الناجمة عن الظواهر الجوية المختلفة، والتي تؤثر على الإشارة بصرية المنبعثة. تم تحليل أداء النظام المقترح، من حيث معامل الجودة (Q) ومعدل الخطأ BER.

الكلمات المفتاحية: الوصلات الضوئية اللاسلكية FSO. تقنيات تعدد الإرسال المكاني SDM. الطول الموجي 2

ميكرومتر. الاضطرابات الجوية.

Abstract

The deployment of free space optical (FSO) links is simple, fast and economical than optical fiber networks. . However, they present weakness in front of low visibility and beyond a range of few kilometers, thus slow down their use. Furthermore, the FSO performance is deteriorated by atmospheric attenuation due to different meteorological conditions. There are different solutions to these problems, in particular with the choice of an appropriate wavelength and the technique of the transmission.

This work consists, on the use of wavelengths at 2 μm which relate the telecom performance and the FSO channel state, in terms of turbulence. On the other hand, on the use of space division multiplexing (SDM) as optical system transmission technique, which appears as a promising technique to increase aggregate bandwidth of current optical networks.

The proposed system, SDM/FSO at $\lambda = 2 \mu\text{m}$, is based on SDM with mode division multiplexing (MDM), where spatial modes are used as channels information carrying independent data streams. Furthermore, the mode types in a SDM is also an important issue. Choice the best modes type for achieving the maximum range, with week bit error rate (BER) should be taken into account. Our study showed that the Laguerre-Gaussian modes are the most preferred for used in the FSO link.

Finally, we modeled the proposed SDM/FSO system with the Optisystem software, in order to determine its availability, taking into account the different losses due to different atmospheric conditions, which influence an emitted optical signal. The performance of the proposed system is analyzed in terms of quality factor (Q factor), eye diagram and BER.

Keywords: Free space optics (FSO), Space division multiplexing (SDM), Wavelengths at 2 μm , Atmospheric turbulence.

Résumé

Le déploiement des liens FSO est simple, rapide et économique au contraire des réseaux fibrés. Néanmoins leur fragilité face aux faibles visibilités et au-delà de quelques kilomètres de portée freine leur utilisation. En outre, la performance du FSO est détériorée par l'atténuation atmosphérique due aux différentes conditions météorologiques. Cependant, il existe différentes solutions à ces problèmes. Notamment avec le choix de la longueur d'onde et la technique de transmission utilisés.

Ce travail de mémoire consiste d'un côté sur l'utilisation des longueurs d'ondes à $2 \mu\text{m}$ qui permet de relier la performance télécom et l'état du canal, en termes de turbulence, et de l'autre côté sur l'utilisation des techniques de multiplexage spatiale (SDM), qui apparaît rapidement comme une technique prometteuse pour augmenter la bande passante agrégée des réseaux optiques actuels.

Le système proposé, SDM/FSO à $\lambda = 2 \mu\text{m}$, est basé sur le multiplexage SDM par répartition en mode (MDM), où les modes spatiaux sont utilisés comme canaux d'information transportant des flux de données indépendants. En outre, la sélection des modes dans SDM est également un problème important. Choisir le meilleur mode pour atteindre la meilleure distance avec un moindre taux d'erreur binaire (BER) doit être pris en compte. Notre étude a montré que les modes Laguerre-Gaussien, sont les modes les plus préférés d'utilisés dans la FSO.

Enfin, une modélisation du système SDM/FSO proposé a été faite sous le logiciel Optisystem, en tenant compte des différentes pertes due aux différents phénomènes atmosphériques, qui influent sur un signal optique émis. Les performances du système proposé, sont analysées, en termes de facteur de qualité (Q factor), de diagramme de l'œil et de BER.

Mots clés : Optiques en espace libre (FSO), Turbulence atmosphérique, Multiplexage spatial (SDM), Longueurs d'ondes à $2 \mu\text{m}$.

Table des Matières

Table des Matières.....	I
Liste des Figures.....	III
Liste des Tableaux.....	V
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Présentation générale et principe de fonctionnement des liaisons optiques atmosphériques	
I.1 Introduction	3
I.2 Présentation de la technologie FSO.....	3
I.3 Caractéristique des liaisons optiques atmosphériques.....	4
I.4 Principe de fonctionnement des liaisons FSO.....	5
I.4.1 L'émetteur.....	5
a. Les diodes électroluminescentes (LED : Light-Emitting Diode en anglais).....	6
b. Les diodes laser.....	7
I.4.2 Le récepteur.....	7
a. Les Photodétecteurs.....	8
b. Techniques de photodétection.....	9
I.4.3 Le canal Atmosphérique (FSO).....	9
I.5 Les conditions atmosphériques et leurs effets sur les liaisons FSO.....	10
I.5.1 Le brouillard.....	10
I.5.2 L'absorption atmosphérique.....	11
I.5.3 La diffusion atmosphérique.....	12
I.5.4 La turbulence atmosphérique (Scintillation).....	13
I.6 Les paramètres d'une liaison optique atmosphérique.....	14
I.6.1 Intensité rayonnante.....	14
I.6.2 Puissance optique reçue.....	14
I.6.3 Atténuation dans l'espace libre.....	15
I.6.3.1 L'atténuation géométrique.....	15
I.6.3.2 Affaiblissement atmosphérique linéique.....	16
I.6.3.3 Effets de scintillation.....	17
I.6.3.4 Marge d'une liaison FSO.....	18
I.6.3.5 Bilan de liaison.....	19
I.7 Caractéristiques des équipements FSO.....	20
I.8 Les applications des systèmes FSO.....	20
I.9 Les défis des liaisons FSO.....	20
Chapitre II : La technique de multiplexage spatial (SDM)	
II.1 Introduction.....	22
II.2 Les techniques de multiplexages.....	22
II.2.1 Multiplexage temporel (TDM).....	22
II.2.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM).....	23
II.2.3 Multiplexage par répartition de codes optique (OCDMA).....	25
II.3 Le multiplexage spatial (SDM).....	26

II.3.1 L'architecture d'un SDM.....	26
II.3.2 Les avantages de la technique de multiplexage par répartition spatiale (SDM).....	28
II.4 Les modes de propagation.....	28
II.4.1 Les modes gaussiens.....	28
II.4.1.1 Le mode Hermite-gauss.....	29
II.4.1.2 Les mode Laguerre –gaussien.....	30
II.4.2 Les modes Polarisé Linéairement (LP : linearly polarised).....	31
II.5 Conclusion.....	32
Chapitre III : Résultats de la simulation	
III.1 Introduction.....	34
III.2 Présentation du logiciel OptiSystem.....	34
III.3 Les principaux critères d'évaluation d'une transmission optique.....	35
III.3.1 Le diagramme de l'œil.....	35
III.3.2 Facteur de qualité Q.....	36
III.3.3 Taux d'erreur binaire (BER).....	36
III.4 Présentation de l'architecture du système SDM/FSO.....	36
III.4.1 Schéma générale du système SDM/FSO.....	36
III.4.2 Choix de la longueur d'onde.....	37
III.4.2.1 Les critères de sélection la longueur d'onde 2 μm	37
III.4.2.2 Confirmation du choix de la longueur d'onde avec la simulation....	38
III.4.3 Choix des modes spatiaux.....	39
III.5 Présentation de système SDM/FSO sur l'OptiSystem.....	40
III.5.1 L'architecture du système SDM/FSO sur l'OptiSystem.....	40
III.5.1.1 L'émetteur optique.....	41
III.5.1.2 Le canal FSO.....	42
III.5.1.3 Le récepteur optique.....	42
III.5.2 Résultats de la simulation et discussions.....	43
III.5.3 Effet de différent paramètres sur la performance du système SDM/FSO....	47
III.5.3.1 Effet de la variation de la puissance optique d'un émetteur spatial pour une liaison SDM/FSO.....	47
III.5.3.2 Effet de la variation de l'atténuation géométrique (dB/km) pour une liaison SDM/ FSO.....	48
III.5.3.3 Effet de la variation de la divergence du faisceau laser pour une liaison SDM/ FSO.....	51
III.5.3.4 Effet de la variation du diamètre de l'ouverture du récepteur FSO.....	52
III.5.3.5 Effet de la variation de débit de transmission d'une liaison SDM/FSO.....	54
III.5.3.6 Effet de nombre des modes (nombre des canaux) sur une liaison SDM/FSO.....	55
III.6 Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	58

Liste des Figures

Chapitre I : Présentation générale et principe de fonctionnement des liaisons optiques atmosphériques

Figure I.1 : Exemple d'architecture d'un réseau FSO, des liaisons optiques FSO reliant des bâtiments centraux entre eux.....	3
Figure I.2 : Système de communication FSO en visibilité directe.....	5
Figure I.3 : Le schéma bloc de l'émetteur FSO.....	6
Figure I.4 : Schéma bloc du récepteur FSO.....	7
Figure I.5 : Les phénomènes qui affectent le faisceau optique dans une liaison FSO.....	10
Figure I.6 : Spectre d'absorption de l'atmosphère.....	11
Figure I.7 : Transmission à travers l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde.....	11
Figure I.8 : Modèle de diffusion.....	13
Figure I.9 : Les effets de la diffusion et l'absorption.....	13
Figure I.10 : Les paramètres pour calculer l'atténuation géométriques.....	15
Figure I.11 : Déviation du faisceau sous l'influence de cellules de turbulence (a) cellules plus grandes que le diamètre du faisceau (déviations du faisceau), (b) cellules plus petites que le diamètre du faisceau (élargissement du faisceau) (c) cellules de turbulence de différentes tailles (scintillation).....	17

Chapitre II : La technique de multiplexage spatial (SDM)

Figure II.1 : Principe du multiplexage temporel.....	23
Figure II.2 : Multiplexage en longueur d'onde (WDM).....	24
Figure II.3 : Schéma synoptique d'une liaison CDMA optique.....	25
Figure II.4 : Architecture d'un système de transmission SDM.....	26
Figure II.5 : Schéma fonctionnel du système FSO/SDM.....	27
Figure II.6 : Représentation de la distribution de l'intensité des quelques modes HG.....	28
Figure II.7 : Représentation de la distribution de l'intensité des quelques modes LG.....	31
Figure II.8 : Représentation de la distribution d'amplitude des premiers modes LP.....	32

Chapitre III : Résultats de la simulation

Figure III.1 : Diagramme de l'œil d'une transmission optique.....	35
Figure III.2 : Schéma globale d'un system SDM/FSO.....	37
Figure III.3 : Variation de facteur Q en fonction de la longueur d'onde.....	38
Figure III.4: Représentation des quatre modes LG (en haut) et LP (en bas).....	39
Figure III.5: Résultat de comparaison du facteur Q de différents modes dans SDM/FSO..	40
Figure III.6 : Schéma bloc du système SDM / FSO.....	40
Figure III.7: model de simulation d'émetteur spatial.....	41
Figure III.8: La forme spatiale du faisceau laser émis.....	41
Figure III.9: Le model de simulation d'un canal FSO.....	42
Figure III.10: Le model de simulation d'un récepteur optique.....	42
Figure III.11 : La variation des pertes géométriques en fonction de la distance (Range).....	44
Figure III.12 : la variation de la variance de Rytov en fonction de la distance (Range).....	44

Figure III.13 : Les diagrammes de l'œil correspondants les quatre canaux (modes).....	45
Figure III.14 : Variation des facteurs Q correspondants les quatre canaux (modes) en fonction de la distance (Range).....	46
Figure III.15: Variation de facteur Q en fonction de la puissance optique émise pour les quatre modes.....	47
Figure III.16 : Variation de BER en fonction de la puissance optique émise pour les quatre modes.....	48
Figure III.17 : la variation de Q en fonction de la distance avec une atténuation 0.15 dB/km (temps très clair).....	49
Figure III.18: la variation de Q en fonction de la distance avec une atténuation 2.61 dB/km (faible pluie).....	49
Figure III.19 : la variation de Q en fonction de la distance avec une atténuation 6.80 dB/km (faible brouillard).....	50
Figure III.20 : la variation de Q en fonction de la distance avec une atténuation 19.77 dB/km (brouillard fort).....	50
Figure III.21 : Variation de facteur Q en fonction de la divergence du faisceau laser.....	51
Figure III.22 : Variation du BER en fonction de la divergence du faisceau laser.....	52
Figure III.23 : Variation de facteur Q en fonction de l'ouverture de récepteur.....	53
Figure III.24 : Variation de BER en fonction de diamètre de récepteur.....	53
Figure III.25 : Variation de facteur Q en fonction de la distance avec un débit 20 Gbps...	54
Figure III.26 : Variation de facteur Q en fonction de la distance avec un débit 10 Gbps...	54
Figure III.25 : La distribution d'intensité selon une direction (x ou y), pour les huit modes LG (LG ₀₀ , LG ₀₁ , LG ₀₂ , LG ₀₃ , LG ₁₁ , LG ₁₂ , LG ₁₃ , et LG ₁₄ , de gauche à droite, respectivement).....	55
Figure III.28 : La forme spatiale du faisceau laser émis.....	56
Figure III.29 : Variation de facteur Q en fonction de la distance pour 8 modes (8 canaux).....	56

Liste des Tableaux

Tableau III.1 : Les paramètres utilisé dans la comparaison.....	38
Tableau III.2 : Les caractéristiques de la source de la lumière.....	41
Tableau III.3 : Les caractéristiques du canal FSO.....	42
Tableau III.4 : Les caractéristiques du récepteur.....	42
Tableau III.5 : Les paramètres utilisés dans la simulation.....	43



Introduction générale

Introduction générale

Le nom anglais « Free Space Optics (F.S.O) » ou liaisons optiques dans l'atmosphère (LOA) existe depuis environ 30 ans à l'état de prototype destiné à l'origine à des applications militaires (Project Star Wars, U.S. Department of Defense 'DoD') et des tests de communication entre la terre et les satellites. Au cours de la dernière décennie, ces systèmes ont été utilisés pour diverses applications dans le domaine spatial. Il s'agit notamment des communications inter-bâtiments (sur quelques kilomètres), des liaisons terre-satellite et des liaisons entre satellites. Les liaisons optiques atmosphériques sont maintenant une technologie mature capable de transmettre des informations à très haut débit d'un point de l'atmosphère à un autre en utilisant un seul faisceau de lumière. Le principal intérêt des FSO est, sans doute, le faible coût, la flexibilité et la rapidité d'installation et de déploiement par rapport à la fibre optique pour assurer le même haut débit. Cependant, les liaisons optiques atmosphériques sont affectées par les conditions atmosphériques, tel que le brouillard, la pluie, la neige et la turbulence, qui peuvent provoquer une atténuation significative de la puissance du faisceau. Connaître plus finement le canal atmosphérique urbain sous toutes conditions météorologiques est donc nécessaire afin d'apporter les solutions pour fiabiliser ce type de liaison, notamment avec le choix d'une longueur d'onde adaptée.

Les systèmes, actuellement en usage, fonctionnent à des longueurs d'onde dans le visible et le proche infrarouge, situées dans des fenêtres de transmission atmosphérique. Plusieurs facteurs conditionnent le choix de la longueur d'onde, à savoir, la pénétration dans l'atmosphère, le coût du laser, la sécurité oculaire, etc. Les caractéristiques des lasers utilisés sont régies par le standard IEC 60825 (IEC : International Electrotechnical Commission) de la sécurité oculaire. Ce travail de mémoire consiste d'une part sur l'utilisation des longueurs d'ondes à 2 μm dans une liaison FSO qui permettra de relier la performance télécom et l'état du canal, en termes de turbulence, dès que les grandes longueurs d'ondes possèdent une meilleure transmission atmosphérique que les plus faibles longueurs d'ondes.

En outre, l'évolution des réseaux de télécommunications vers la transmission de données nécessite la recherche de systèmes offrant une bande passante élevée et un accès à de multiples ressources. De nombreux chercheurs se sont concentrés sur le multiplexage par répartition d'espace SDM (spatial division multiplexing,) qui ouvre une nouvelle dimension pour la transmission optique puisque l'espace est une dimension qui n'a pas été exploitée à ce jour pour les communications optiques. Dans le multiplexage spatial, un certain nombre

de signaux sont transmis sur différents modes en parallèle. SDM peut être utilisé en combinaison avec d'autres techniques connues telles que WDM (Wavelength Division Multiplexing), TDM (Time Division Multiplexing), et CDMA (Code Division Multiplexing). Alors, l'objectif de notre travail est de surmonter la limitation de la capacité en mettant en œuvre la technique de multiplexage spatial sur une liaison FSO (SDM/FSO) à la longueur d'onde $2\ \mu\text{m}$. Cette étude consiste à utiliser les modes Laguerre-Gaussien comme canaux d'information transportant des flux de données indépendants, prenons en compte les différents paramètres affectant les performances de la liaison FSO. Pour cela, nous avons organisé ce mémoire comme suit :

Le premier chapitre introduit le fonctionnement de la technologie FSO et décrit son principe de fonctionnement et les différents phénomènes atmosphériques qui affectent les ondes optiques lors de leurs propagations, tel que l'atténuation géométrique et la turbulence.

Le second chapitre présente le multiplexage par répartition d'espace et les différents composants pour le réaliser, en se concentrant sur le multiplexage spatial sur la répartition des modes. L'étude et la caractérisation des modes spatiaux qui sont capables de transporter des informations à travers la liaison FSO sont également présentées, notamment les modes Laguerre-Gaussien (LG), Hermite-Gaussien (HG), et les modes linéairement polarisé (LP).

Le troisième chapitre décrit les résultats de la simulation et la conception d'une liaison SDM/FSO à la longueur d'onde $2\ \mu\text{m}$, utilisons le logiciel OptiSystem. L'étude consiste à déterminer pour chaque cas, la portée maximale entre l'émetteur et le récepteur FSO en fonction de différents paramètres affectant les performances de la liaison. Pour cela, nous discutons l'évaluation des performances de la liaison SDM/FSO via les indicateurs suivants : le taux d'erreur binaire (BER) le facteur de qualité (Facteur-Q), et le diagramme de l'œil.

Finalement, nous finalisons notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :

Présentation générale et principe de fonctionnement des liaisons optiques atmosphériques

I.1 Introduction

Les Liaisons Optiques Atmosphériques (LOA), (*Free Space Optic (FSO)*), il s'appelle aussi Wireless Optical Communications (WOC), constituent une technologie optique de communications pour la propagation de la lumière en espace libre, afin de transmettre des données entre deux points distants. Cette technique 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 [1].

Dans ce chapitre, après avoir présenté la technologie FSO, nous décrivons le principe de base de cette technologie et les caractéristiques des équipements FSO. Nous explicitons également les diverses applications de ce type de liaisons ainsi que leurs intérêts et leurs implications dans le monde des télécommunications d'aujourd'hui.

I.2 Présentation de la technologie FSO

Les systèmes de télécommunication basés sur le principe des FSO fonctionnent en prenant un signal standard de données ou un signal de télécommunication, le numérisant et le transmettant à travers l'atmosphère. La façon la plus facile de visualiser le fonctionnement de ces systèmes est d'imaginer deux points interconnectés par un câble de fibre optique, puis de retirer la fibre. Les principes de base de la transmission d'un signal le long d'une fibre sont les mêmes que pour la transmission en espace libre.

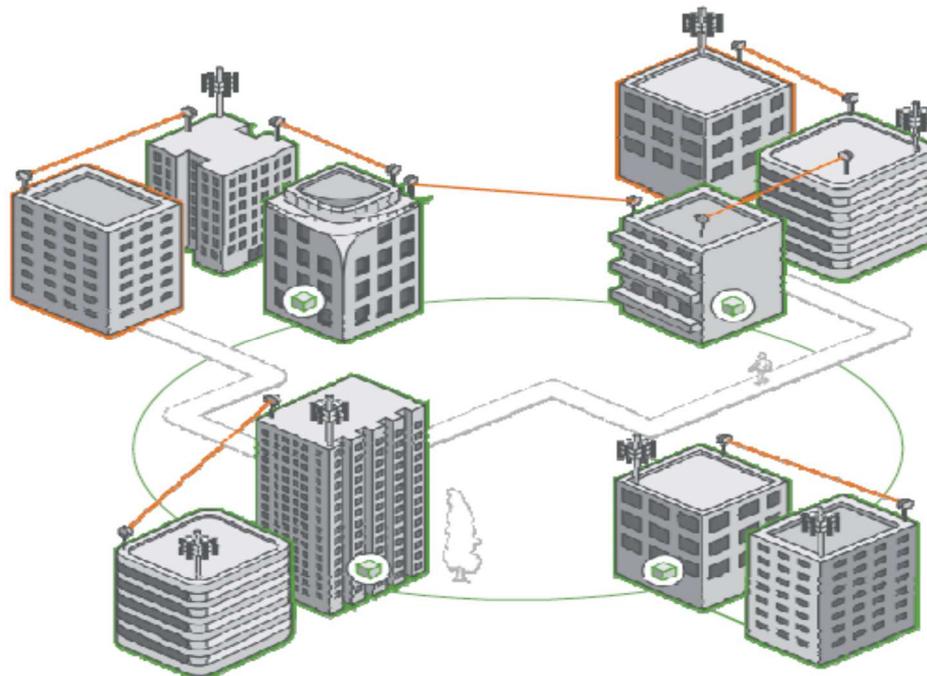


Figure I.1 : Exemple d'architecture d'un réseau FSO, des liaisons optiques FSO reliant des bâtiments centraux entre eux.

La liaison FSO consiste en une transmission de la lumière (dans le visible ou l'infrarouge en général), en espace libre (sans fil) et conçue pour la connexion de deux points en visibilité directe à un débit très élevé. A l'instar de la fibre optique, une FSO est une liaison point à point capable d'offrir les bandes passantes les plus élevées en matière de débit. Contrairement à celle-ci, elle requiert une visibilité optique directe (en anglais Line Of Sight : LOS) entre l'émetteur et le récepteur, ce qui implique le plus souvent une installation au sommet des immeubles [2].

I.3 Caractéristique des liaisons optiques atmosphériques

Les caractéristiques de base de la technologie FSO sont [3] :

- ✓ **Énorme bande passante de modulation** : L'utilisation d'un support optique (fibre ou sans fil) dont la fréquence varie de 10^{12} Hz à 10^{16} Hz pourrait permettre la transmission de jusqu'à 200 THz de données.
- ✓ **Faisceau de taille étroite** : Le rayonnement optique est connu par son faisceau très étroit, un faisceau laser typique possède un angle de divergence entre 0,01 et 0,1 mrad.
- ✓ **Un spectre ne nécessitant pas de licence contrairement aux transmissions hertziennes** : Les transmissions optiques ne nécessitent aucune autorisation. En effet, l'absence de licences et de réglementation se traduit dans la facilité, la rapidité et le faible coût de déploiement. Et puisque les émetteurs-récepteurs FSO peuvent transmettre et recevoir à travers les fenêtres, il est possible de monter les équipements FSO à l'intérieur des bâtiments, ce qui réduit la nécessité d'allouer des espaces sur les toits, simplifie le câblage, et permettant aux équipements FSO de fonctionner dans un environnement très favorable.
- ✓ **Rapide à déployer et redéployer.**
- ✓ **Performance liée aux conditions climatologiques.**
- ✓ **Faible taux d'erreur** : en effet la taille réduite du faisceau laser rend la détection, l'interception ou le brouillage très difficile.
- ✓ **Sécurité intrinsèque des dispositifs, plus élevée que celle des liaisons radioélectriques** :
 - Immunité aux interférences électromagnétiques
 - Protocole de communication transparent (transmission sans codage).

I.4 Principe de fonctionnement des liaisons FSO

Le principe de fonctionnement d'une liaison FSO est représenté sur la figure (I.2). Les équipements FSO utilisent la modulation d'un faisceau laser pour échanger des informations binaires dans les deux sens (Full-Duplex) par l'intermédiaire d'un couple Emetteur/Récepteur (diode laser/ LED, diode PIN/ APD) à chaque extrémité.

Conceptuellement, une liaison optique atmosphérique est simple ; un émetteur dirige un faisceau laser vers un récepteur. Le faisceau laser, de taille finie, concentre l'intensité dans la direction du récepteur et rend toute tentative de son interception par une tierce personne très difficile. La transmission de données par faisceau optique d'un point à un autre procure un niveau de sécurité élevé. L'interception de l'information par des personnes non autorisées est quasi impossible. Ceci, nécessite l'accès à la surface couverte par le faisceau à la réception. Cependant, le faisceau doit être dirigé avec précision dans la direction du récepteur. A la réception, le système doit fortement exclure la lumière ambiante (lumière du soleil entre autre) qui peut perturber le signal reçu. En pratique, le détecteur à la réception possède un champ de vue optique assez petit et le dispositif de réception comporte des filtres qui permettent de ne laisser passer que les longueurs d'onde souhaitées [2].

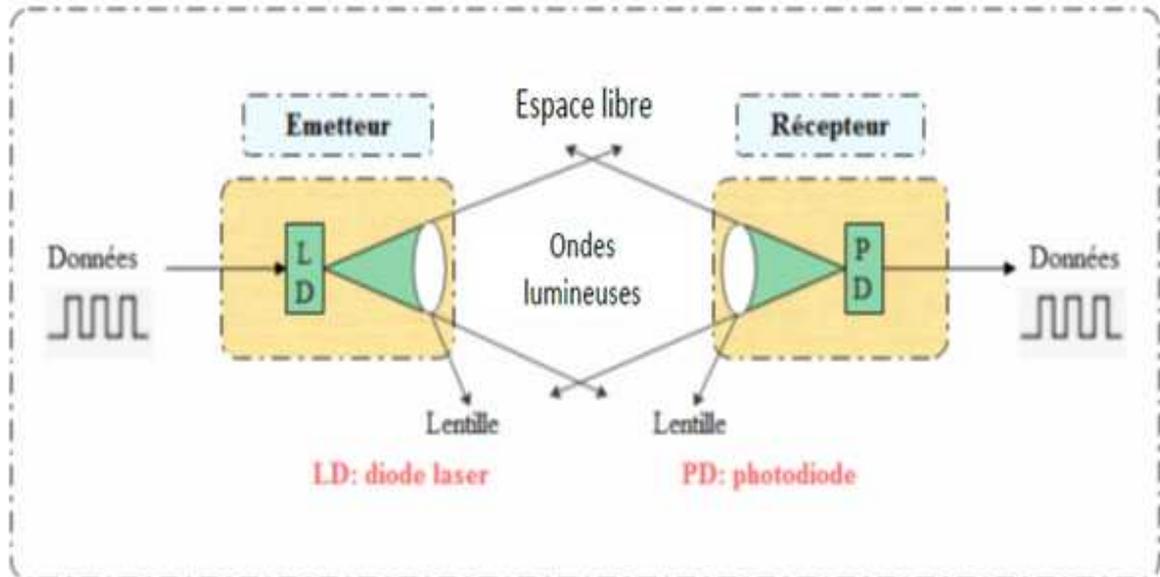


Figure I.2 : Système de communication FSO en visibilité directe

I.4.1 L'émetteur

Ce bloc fonctionnel a le rôle primordial de modulation de la source de données sur la porteuse optique, qui se propage ensuite à travers l'atmosphère vers le récepteur. Le type de

modulation le plus utilisé est la modulation d'intensité (IM). L'idée réside dans la transmission des informations sur la puissance instantanée du signal porteur. Ce qu'on peut l'avoir soit en faisant varier le courant de conduite de la source optique directement en correspondance avec les données à transmettre, ou via un modulateur externe.

Dans l'opération d'émission optique, le rayon envoyé par la source lumineuse passe à travers une lentille qui est utilisée pour contrôler la quantité de divergence du faisceau laser[4]. Le schéma bloc émetteur FSO est donné par la figure (I.3).

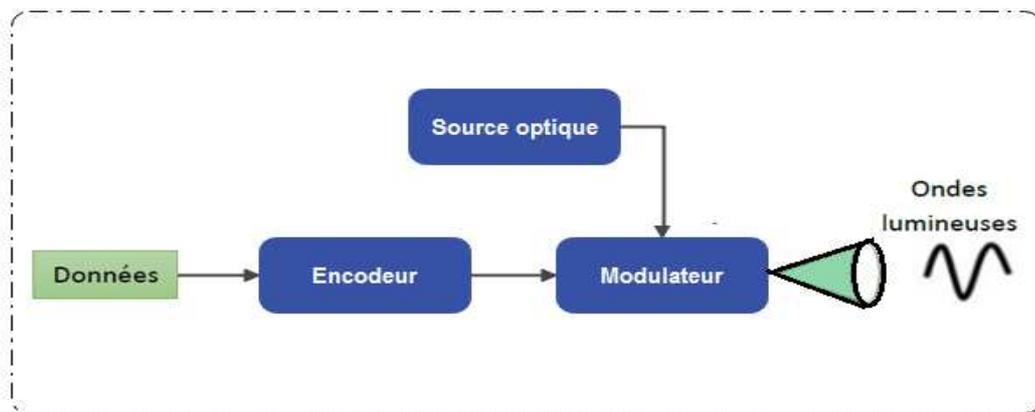


Figure I.3 : Le schéma bloc de l'émetteur FSO

L'une des principales clés des systèmes de communication optique est la source lumineuse, qui peut être facilement modulée à des débits de données très élevés. La source lumineuse est basée sur le semi-conducteur le plus couramment utilisé dans les communications optiques sans fil. Nous distinguons [1]:

a. Les diodes électroluminescentes (LED : Light-Emitting Diode en anglais) :

Sont des composants optoélectroniques qui émettent la lumière. La LED est une diode à jonction PN réalisée sur un matériau semi-conducteur, fortement dopé. Ils sont généralement utilisés dans des applications sur des courtes distances. L'avantage majeur des LED est leur vie extrêmement longue et de faible coût. Parmi les caractéristiques d'une LED, sa puissance d'émission qui est relativement faible. Le courant qui travers la jonction est défini par l'équation :

$$I = I_s(e^{V_d/kT} - 1) \quad (I.1)$$

I_s : le courant de saturation de la diode, K : la constante de Boltzmann, T : la Température, et V_d : la tension aux bornes de la diode.

b. Les diodes laser :

La diode laser (DL) a de grands avantages pour les applications à longue portée par rapport aux diodes LED. Les DL reposent sur trois processus de base : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée pour produire de la lumière. Les DL sont caractérisés par le courant de seuil, qui est la séparation entre un fonctionnement dominé par l'émission spontanée et un fonctionnement dominé par l'émission stimulée. La puissance émise par le laser se calcule alors de la façon suivante :

$$P = R(I - I_s) \text{ pour } I > I_s \quad (\text{I.2})$$

$$P = 0 \text{ pour } I_s < I$$

Où I : courant injecté au laser et I_s : courant de seuil du laser (dépend de la température T).

R : la sensibilité de la diode laser.

Les facteurs qui influent sur l'utilisation d'une source lumineuse sont:

- ✓ Le prix et la disponibilité des composants.
- ✓ La puissance de transmission.
- ✓ La durée de vie.
- ✓ La capacité de modulation.
- ✓ La sécurité oculaire.
- ✓ Les dimensions physiques.

I.4.2 Le récepteur

Ce bloc fonctionnel permet essentiellement de récupérer et d'extraire les données transmises du champ optique incident. L'unité réceptrice se compose d'une lentille qui concentre le signal lumineux reçu sur un détecteur de lumière, photodiode, où il est converti en un signal électrique, plus le circuit de décision, l'amplification, le filtrage et le traitement des signaux sont effectués pour garantir une haute fidélité de récupération de données [4]. La figure (I.4) représente le schéma bloc du récepteur optique.

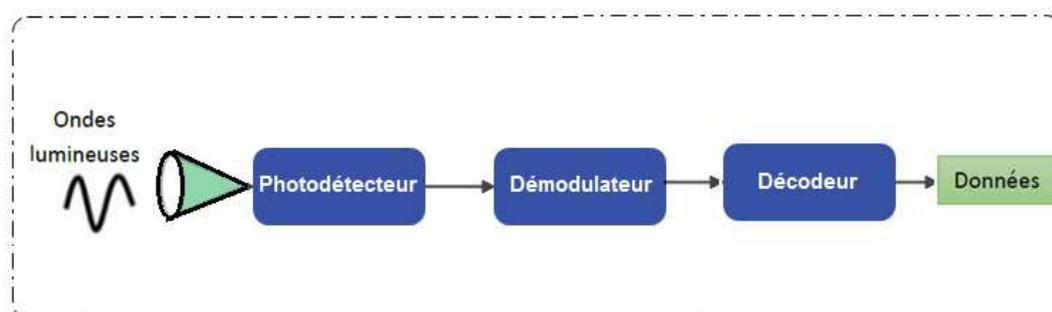


Figure I.4 : Schéma bloc du récepteur FSO.

a. Les Photodétecteurs

Un photodétecteur est un semi-conducteur à jonction PN polarisé en inverse qui convertit un signal optique reçu (photon) en un signal électrique par effet photoélectrique. Le signal généré par un photodétecteur est toujours proportionnelle à la puissance optique instantanée reçue, et comme le signal optique est généralement faible après avoir voyagé à travers le canal de communication atmosphérique, le photodétecteur doit donc répondre à des exigences de performance rigoureuses, telles que la sensibilité élevée au sein de sa gamme de longueurs d'onde de fonctionnement, faible niveau de bruit et une bande passante adéquate pour accueillir le débit de données désirée.

Les photodiodes peuvent être divisées en deux catégories : celles sans gain interne PN et PIN et celles avec avalanche de gain interne (APD).

- PIN (Positive Intrinsic Negative Photodiodes) :

Ce sont également des dispositifs 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 [5].

La photodiode est le plus souvent caractérisée par sa sensibilité et le courant établi dans la photodiode donné par l'expression suivante :

$$i_{ph} = S.P + i_{obs} \quad (I.3)$$

Avec :

P : la puissance optique.

S : la sensibilité

i_{obs} : courant d'obscurité, qui circule dans la jonction en absence d'éclairement, il provient à la fois de courants de fuite et de génération thermique, il augmente avec la température et la tension de polarisation.

- 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 [5].

Le photo courant de l'APD est donné par :

$$iph = M.S.P \quad (I.4)$$

Avec :

M : facteur de multiplication, il est donné par : $M = 1/(1-(V-V_B)^{m'})$ où $m' = 3-6$ (selon le matériau).

P : la puissance optique.

S : la sensibilité

b. Techniques de photodétection

On distingue deux types de détections [6] :

- **La détection directe** : Pour récupérer, les informations par ce type de détection, on les associe à la variation de l'intensité du champ transmis.
- **La détection cohérente ou la détection hétérodyne** : Elle repose sur le mélange du rayonnement à détecter et l'onde de référence, ou "oscillateur local", créé au niveau du capteur. Elle exige des montages interférométriques plus difficiles à réaliser en optique qu'en radar à cause de l'utilisation des petites longueurs d'onde. Dans ce type de détection, un oscillateur local est utilisé pour générer un rayonnement optique à une certaine fréquence/longueur d'onde.

I.4.3 Le canal Atmosphérique (FSO)

Les canaux de propagation forment le milieu atmosphérique. Les canaux atmosphériques sont des milieux complexes qui peuvent affecter les propriétés de la lumière émise. Les liaisons FSO sont soumises aux restrictions défavorables imposées par les milieux de propagation atmosphérique. Ces limites atténuent ou annulent le signal optique pendant la propagation, limitant la portée entre l'émetteur et le récepteur. L'extinction atmosphérique est causée par plusieurs phénomènes de sélection de longueur d'onde : L'absorption moléculaire (N_2 , O_2 , H_2 , HO , CO_2 , O_3 , etc.) caractérisée par une forte dépendance spectrale, la diffusion moléculaire (diffusion Rayleigh), l'extinction (absorption et diffusion) due aux particules en suspension dans l'air (aérosol, glace, poussière, fumée, etc.), en précipitations (pluie, neige, etc.), et la turbulence atmosphérique due aux variations spatio-temporelles de l'indice de l'air (scintillation) [5]. Ces derniers sont montrés dans la figure (I.5).

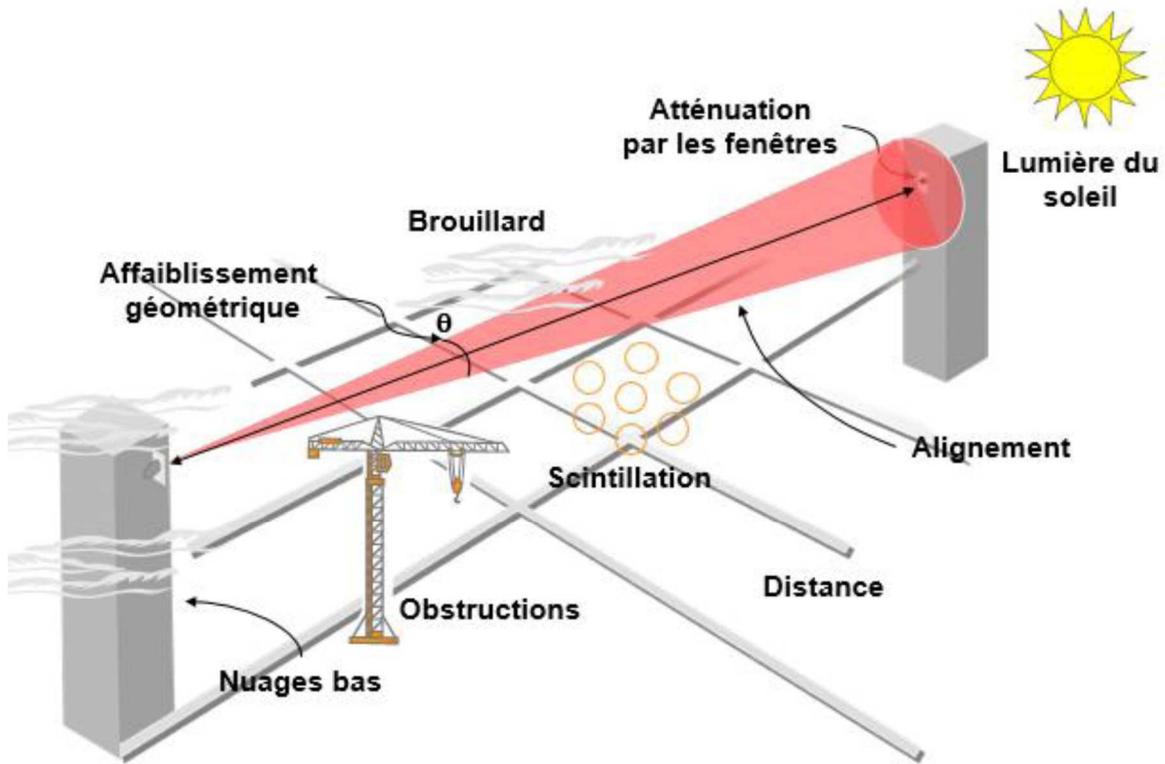


Figure I.5 : Les phénomènes qui affectent le faisceau optique dans une liaison FSO [1].

I.5 Les conditions atmosphériques et leurs effets sur les liaisons FSO

Lors de leur propagation en espace libre, les signaux optiques subissent une atténuation liée à des conditions climatiques imprévisibles. Les conditions atmosphériques pour les canaux FSO peuvent être globalement divisées en trois catégories [1] :

- **Temps clair** : il est caractérisé par une longue visibilité et une atténuation relativement faible ;
- **Temps nuageux** : il est caractérisé par une faible visibilité, il va du brouillard ou du brouillard aux gros nuages
- **Temps pluvieux** : il se caractérise par la présence de gouttelettes de différentes tailles et peut y avoir des effets graves en fonction du taux de précipitations.

I.5.1 Le brouillard :

Le brouillard est la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes d'eau de quelques centaines de microns de diamètre. Ces gouttelettes sont en mesure de modifier les caractéristiques de la lumière voire empêcher le passage des rayons lumineux à travers une combinaison d'absorption et de diffusion dans le cas de brouillard dense.

I.5.2 L'absorption atmosphérique :

Au fur et à mesure de leur propagation, les ondes lumineuses peuvent être absorbées par certaines molécules présentes dans l'atmosphère traversée. Cette absorption dépend de la composition moléculaire, mais aussi de la longueur d'onde du faisceau.

L'absorption est un phénomène quantique dans lequel l'énergie d'un photon est absorbée par les molécules ou les particules qu'il rencontre, et ces électrons passent au niveau d'électronique, vibrationnel ou rotationnel. Au niveau macroscopique, le faisceau est atténué. Cette étude de l'absorbance en fonction de la longueur d'onde est très aide à détecter les gaz dans l'atmosphère. Mais dans la communication les systèmes optiques doivent sortir de ces plages spectrales d'absorption pour maximiser et minimiser le rapport signal/bruit lors de la réception et donc minimiser les erreurs de transmission [7].

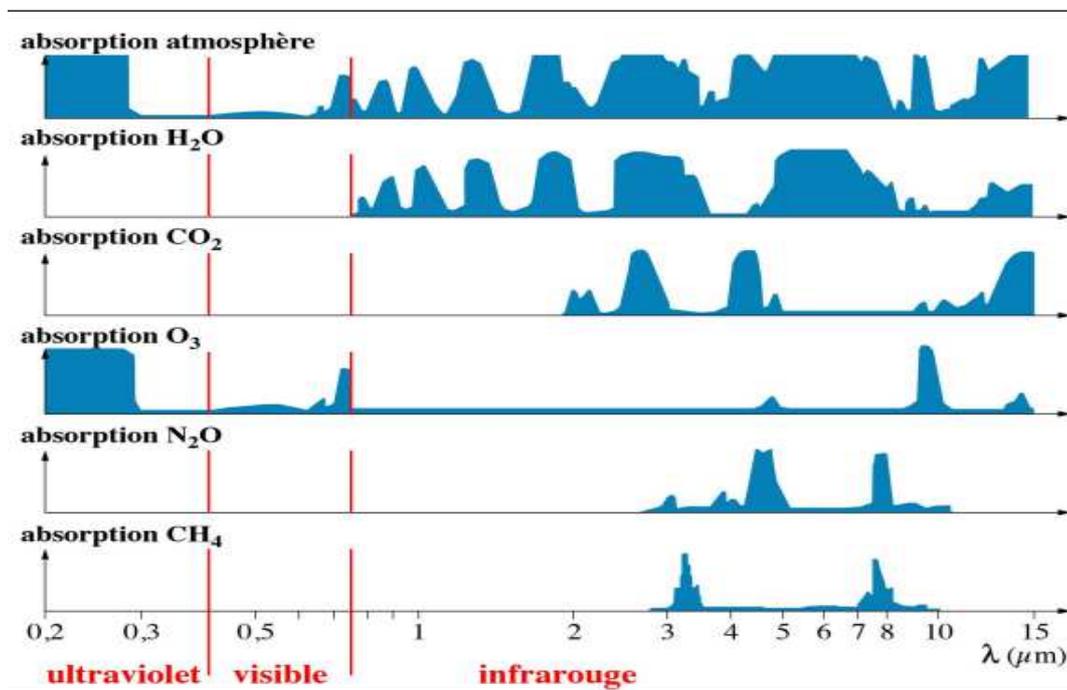


Figure I.6 : Spectre d'absorption de l'atmosphère [7]

L'absorption atmosphérique est un phénomène sélectif lié à la composition de l'atmosphère, ainsi comme le montre la figure (I.7), la transmission spectrale de l'atmosphère présente une zone transparente appelée fenêtre de transmission atmosphérique et une zone opaque ou fenêtre de blocage atmosphérique. Ces figures montrent quelques-unes des principales fenêtres de transmission du spectre dans la gamme de 15 μm des UV. Les molécules responsables de chaque bande d'absorption sont indiquées au bas de ces figures.

Dans cette partie du spectre, les molécules d'eau (H_2O) et de dioxyde de carbone (CO_2) semblent être les plus absorbantes.

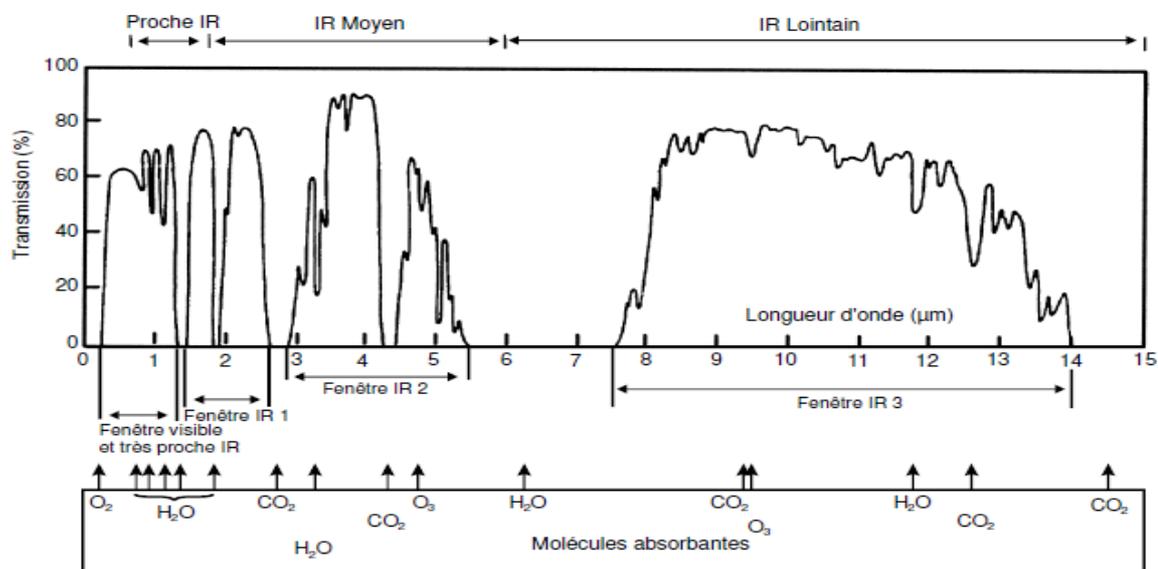


Figure I.7 : Transmission à travers l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde [1]

Les systèmes FSO disponibles dans le commerce utilisent des longueurs d'onde proche du spectre visible, autour de 850 et 1550 nm, ce qui correspond à des fréquences autour de 200 THz. Les longueurs d'onde 850 et 1550 nm, dite à sécurité oculaire, sont deux fenêtres atmosphériques (régions spectrales qui ne souffrent pas de beaucoup d'absorption de l'atmosphère environnante), et puisque ces longueurs d'onde sont également utilisées dans les communications par fibre optique, alors des composants standards de l'industrie fibre optique peuvent être utilisés dans les systèmes de communication optique sans fil [7].

I.5.3 La diffusion atmosphérique :

La diffusion atmosphérique résulte de l'interaction d'une partie du rayonnement incident avec les atomes et/ou les molécules dans le milieu de propagation, d'où une redistribution angulaire de cette partie du rayonnement avec ou sans modification de la longueur d'onde incidente [8].

Les molécules des différents constituants gazeux de l'atmosphère contribuent également à l'atténuation du rayonnement électromagnétique par diffusion de la lumière. Ce type de diffusion concerne les particules de taille très petite par rapport à la longueur d'onde. Dans ce cas on parle de la diffusion de Rayleigh.

La diffusion de Rayleigh se produit lorsque la taille des particules est inférieure à la longueur d'onde du rayonnement. Celles-ci peuvent être soit des particules de poussière ou des molécules d'azote ou d'oxygène. La diffusion de Rayleigh disperse et dévie de façon plus importante les courtes longueurs d'onde que les grandes longueurs d'onde. Cette forme de diffusion est prédominante dans les couches supérieures de l'atmosphère. Ce phénomène explique pourquoi nous percevons un ciel bleu durant la journée. Comme la lumière du Soleil traverse l'atmosphère, les courtes longueurs d'onde (correspondant au bleu) du spectre visible sont dispersées et déviées de façon plus importante que les grandes longueurs d'onde. Au coucher et au lever du Soleil, le rayonnement doit parcourir une plus grande distance à travers l'atmosphère qu'au milieu de la journée. La diffusion des courtes longueurs d'onde est plus importante. Ce phénomène permet à une plus grande proportion de grandes longueurs d'onde de pénétrer l'atmosphère.



Figure I.8 : Modèle de diffusion

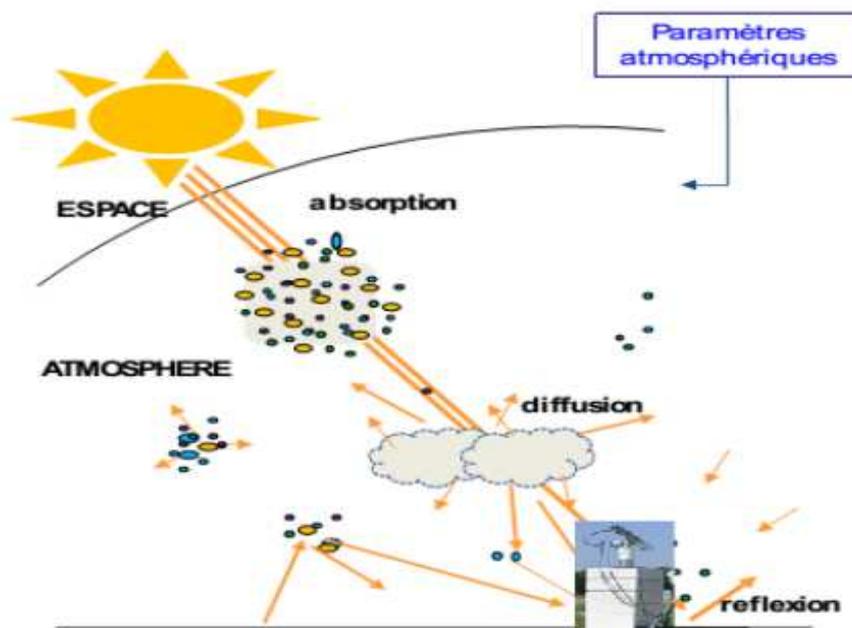


Figure I.9 : Les effets de la diffusion et l'absorption

I.5.4 La turbulence atmosphérique (Scintillation) :

Comme le sol se réchauffe par le soleil, l'air se réchauffe aussi, certaines cellules d'air ou de poches d'air se réchauffent plus que les autres, cela provoque des changements dans l'indice de réfraction, qui à son tour modifie le chemin que la lumière prend dans sa propagation à travers l'air. Ces phénomènes induisent des atténuations de la puissance du rayonnement affectant la performance des liaisons optiques ainsi que leur disponibilité.

I.6 Les paramètres d'une liaison optique atmosphérique

Avant de déployer des liaisons optiques atmosphériques, il est important de connaître leur disponibilité et leur fiabilité. La disponibilité détermine le pourcentage de temps pendant lequel vous travaillez dans des conditions acceptables. La fiabilité garantit la circulation de l'information à travers une qualité de service particulière.

Il est primordial de connaître 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 paramètres et les caractéristiques de l'équipement à connaître dans cette situation sont : la puissance émise, la sensibilité du récepteur, la zone de photodétection 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.

I.6.1 Intensité rayonnante

Le rayonnement optique de la plupart des émetteurs optiques peut être modélisé par un modèle Lambertien généralisé. Un émetteur ayant un rayonnement de type Lambertien généralisé d'ordre "m" a un diagramme de rayonnement exprimé par la relation suivante [5] :

$$R_0(\varnothing) = \frac{m+1}{2\pi} * \cos^m(\varnothing) \quad (\text{I.5})$$

L'intensité rayonnée pour une puissance optique P_t s'écrit par la relation suivante :

$$I = P_t * R_0(\varnothing) \quad (\text{I.6})$$

I.6.2 Puissance optique reçue

La puissance optique reçue est donnée par la relation suivante : [5]

$$P_r = P_t G_t G_L G_R \tau_T \tau_L \tau_{atm} \quad (\text{I.7})$$

P_t : la puissance totale émise, G_t : gain de l'antenne émettrice, G_L : la perte due au trajet de distance L, G_R : gain du récepteur, τ_T : le rendement de l'émetteur optique, τ_L : le rendement du récepteur, et τ_{atm} : perte atmosphérique

I.6.3 Atténuation dans l'espace libre

I.6.3.1 L'atténuation géométrique

Pour certains systèmes FSO, la perte géométrique est une valeur fixe, c'est parce qu'il ne change pas avec le temps. La taille du faisceau émis est beaucoup plus grande à l'entrée du récepteur que la surface de capture. Par conséquent une partie de la lumière est perdue au cours de la transmission. En fonction de la divergence du faisceau émis, la taille du faisceau émis peut être de plusieurs mètres alors que le diamètre du télescope en réception est de l'ordre de 8 à 20 cm. Ce phénomène est appelé perte de trajet géométrique. La perte est fonction de la divergence du faisceau, de la distance de la liaison et de la surface de capture du récepteur, quelle que soit la longueur d'onde et la puissance de l'émetteur. La figure (I.10) montre la perte due à la divergence du faisceau lorsque le récepteur ne peut collecter qu'une petite partie du faisceau transmis.

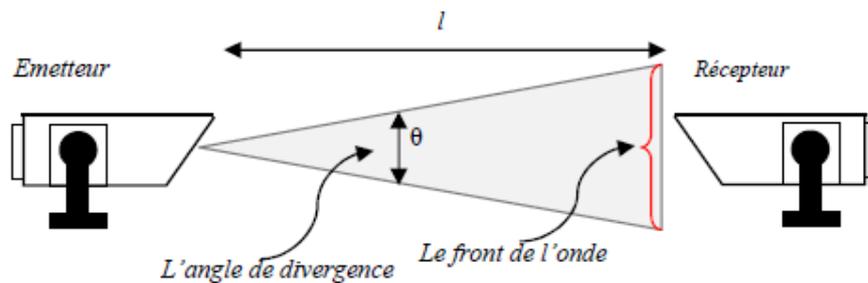


Figure I.10 : Les paramètres pour calculer l'atténuation géométriques [9]

L'atténuation géométrique de la liaison (dB) peut être représentée par l'équation suivante [9] :

$$A_{geo} = \frac{S_L}{S_{capture}} \quad (I.8)$$

Avec :

$S_{capture}$: Surface de détection du récepteur

S_L : Superficie du faisceau d'émission à une distance d , qui correspond à l'approximation suivante :

$$S_L = \frac{\pi}{4}(L.\theta)^2 \quad (I.9)$$

où:

θ : divergence du faisceau (mrad)

L : distance entre l'émetteur et le récepteur (km).

I.6.3.2 Affaiblissement atmosphérique linéique

Les performances de la liaison FSO est soumise à divers facteurs environnementaux tels que le brouillard, la neige et la pluie, etc., qui entraînent une diminution de la puissance du signal reçu. Parmi ces facteurs environnementaux, l'atténuation atmosphérique qui est généralement dominée par le brouillard, étant donné que la taille des particules du brouillard est comparable à la longueur d'onde d'intérêt dans le système FSO. Cela peut modifier les caractéristiques du signal optique ou entraver complètement le passage de la lumière en raison de l'absorption, de la diffusion et de la réflexion [1].

L'affaiblissement atmosphérique linéique γ_{atm} (dB/km) peut être représenté comme la somme de deux termes :

$$\gamma_{atm} = \gamma_{clear_air} + \gamma_{excess} \quad (I.10)$$

Où :

γ_{clear_air} : affaiblissement linéique par temps clair (dû à la présence de molécules gazeuses)

γ_{excess} : Affaiblissement linéique dû à la présence occasionnelle de brouillard, de buée, de brume, de bruine, de pluie, de neige, de grêle, etc.

- L'équation (I.11) définit l'atténuation spécifique du brouillard [1].

$$\gamma_{brouillard}(\lambda) = \frac{3.912}{v} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (I.11)$$

où (km) représente la visibilité, (nm) la longueur d'onde et q le coefficient de distribution de la taille de la diffusion.

Selon le modèle de Kruse, q est donné par :

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{Si } v > 50 \text{ Km} \\ 1.3 & \text{Si } 6 \text{ Km} < v < 50 \text{ Km} \\ 0.585v^{1/3} & \text{Si } v < 6 \text{ Km} \end{cases}$$

Selon le modèle de Kim, q est donné par :

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{Si } v > 50 \text{ Km} \\ 1.3 & \text{Si } 6 \text{ Km} < v < 50 \text{ Km} \\ 0.16v + 0.34 & \text{Si } 1 \text{ Km} < v < 6 \text{ Km} \\ v - 0.5 & \text{Si } 0.5 \text{ Km} < v < 1 \text{ Km} \\ 0 & \text{Si } v < 0.5 \text{ Km} \end{cases}$$

I.6.3.3 Effets de scintillation

La scintillation atmosphérique provoquée par les turbulences est un deuxième phénomène atmosphérique important qui affecte l'efficacité des systèmes de communication laser et cause d'importantes variations de la puissance du signal reçu.

Si la taille des cellules de turbulences est supérieure au diamètre du faisceau, des courbures aléatoires apparaîtront dans tout le faisceau laser, entraînant une perte de signal si le faisceau se déplace et n'atteint plus l'ouverture du récepteur. Le déplacement du faisceau est moins important pour les grandes longueurs d'onde que pour les courtes longueurs d'onde, bien que les longueurs d'onde soient faiblement incidentes à ce phénomène.

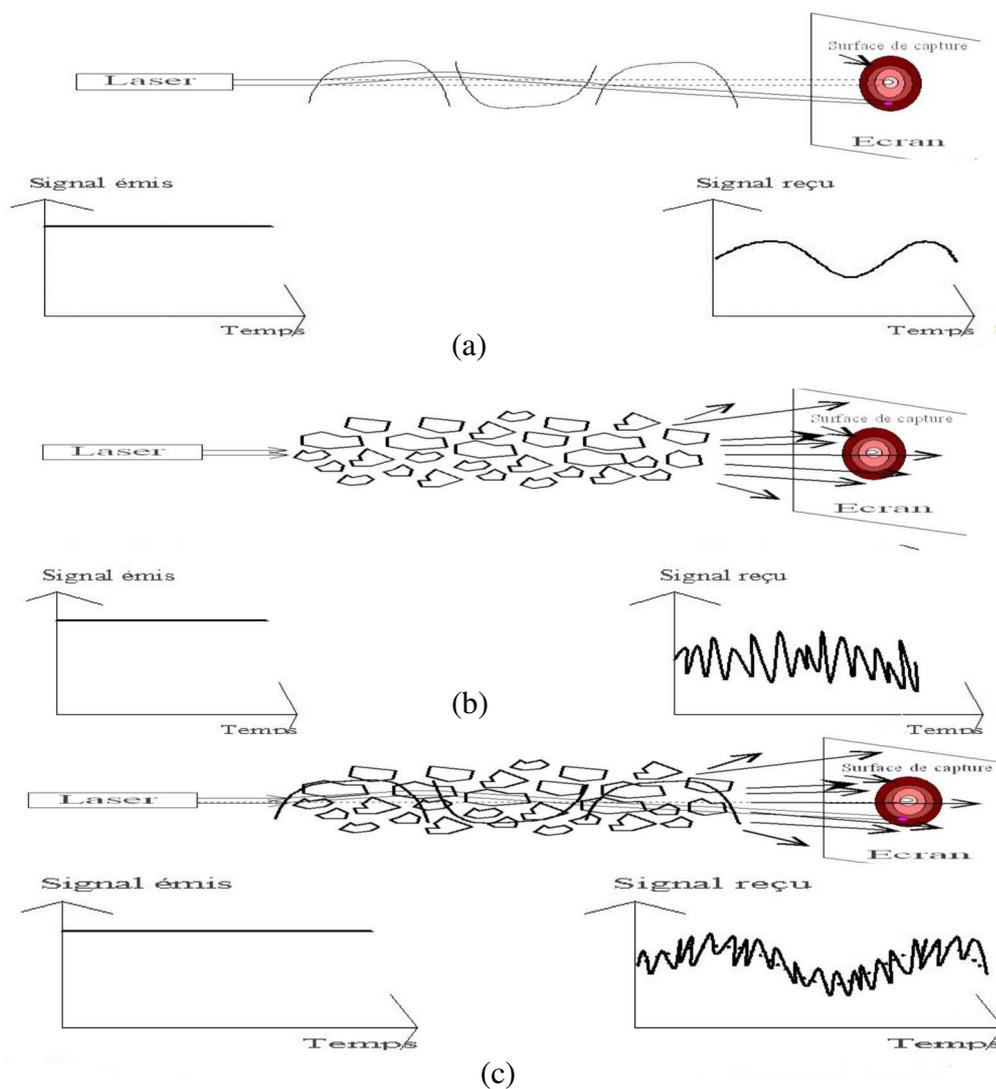


Figure I.11 : Déviation du faisceau sous l'influence de cellules de turbulence (a) cellules plus grandes que le diamètre du faisceau (déviation du faisceau), (b) cellules plus petites que le diamètre du faisceau (élargissement du faisceau) (c) cellules de turbulence de différentes tailles (scintillation) [1].

Plus couramment, si la taille des cellules turbulentes est inférieure au diamètre du faisceau laser, la courbure et la diffraction des rayons peuvent provoquer des distorsions du front d'onde du faisceau laser, entraînant des variations d'intensité de faisceau laser. Au fil du temps, appelé scintillement [9]. Ces derniers sont montrés dans la figure (I.11).

L'effet de la scintillation est généralement étudié à partir du logarithme de l'amplitude [dB] du signal observé (« log-amplitude »), définie comme le rapport en décibels de son amplitude instantanée à sa valeur moyenne. La variance de la scintillation σ^2 (dB²) peut être calculée avec l'équation suivante :

$$\sigma^2 = 23,17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6} \quad . \quad (\text{I.12})$$

Où : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$: Nombre d'onde

L : longueur de la liaison

C_n^2 : Paramètre de structure d'indice de réfraction, représentant l'intensité de la turbulence.

L'atténuation liée à la scintillation est :

$$\gamma_{scintillation} = 2 \cdot \sigma = 2 \cdot \sqrt{23,17 \cdot K^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6}} \quad (\text{I.13})$$

En optique, la valeur de C_n^2 est de l'ordre de $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$.

Parmi les modèles mathématiques permettant la modélisation des effets de scintillation atmosphérique, majoritairement utilisés dans la littérature est le modèle Log-Normal. En se concentrant uniquement sur l'amplitude du champ, la fonction densité de probabilité de I pour une distribution Log-Normal est donnée par [6] :

$$p(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I^2}} \frac{1}{I} \exp\left(-\frac{(\ln(I/I_0) + \sigma_I^2/2)^2}{2\sigma_I^2}\right); I \geq 0 \quad (\text{I.14})$$

Où : I est l'intensité de l'irradiante dans un milieu turbulent et I_0 est l'intensité du rayonnement en espace libre dans un milieu sans turbulence.

I.6.3.4 Marge d'une liaison FSO

La marge brute de la liaison peut être considérée comme le seuil de performance du lien. C'est un élément de base pour réaliser la disponibilité de la liaison. En effet, pour qu'une liaison optique atmosphérique fonctionne, la marge brute du système doit compenser toutes les pertes imprévisibles qui sont variables dans le temps, telles que [4] :

- ✓ L'atténuation atmosphérique,

- ✓ L'atténuation due au phénomène de scintillation qui provoque une fluctuation du niveau de la puissance reçue, causée par la présence de cellules de turbulence dans l'air,
- ✓ L'atténuation par la lumière ambiante.
- ✓ L'atténuation due au mouvement des grands immeubles causant ainsi un dépointage optique.

La marge de liaison (dB), qui est la puissance disponible pour la sensibilité du récepteur, peut être calculée à l'aide de l'équation (13) [9] :

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atm} - A_{scintillation} - A_{system} \quad (\text{I.15})$$

P_e (dBm) : puissance totale de l'émetteur

S_r (dBm): sensibilité du récepteur, qui dépend également de la largeur de bande (débit de données)

A_{geo} (dB): affaiblissement géométrique de la liaison dû à l'étalement du faisceau d'émission en fonction de la distance

A_{atm} (dB): affaiblissement atmosphérique dû à l'absorption et à la diffusion

$A_{scintillation}$ (dB): affaiblissement dû aux turbulences atmosphériques

A_{system} (dB): toutes les autres pertes liées au système (défaut d'alignement du faisceau, perte optique dans le récepteur, perte due au déplacement du faisceau, diminution de la sensibilité due à la lumière ambiante (rayonnement solaire)).

I.6.3.5 Bilan de liaison

Le bilan de liaison permet de calculer le rapport signal utile sur bruit en sortie du récepteur en fonction de tous les paramètres qui influent sur la puissance de l'onde émise. Considérons N la puissance de bruit des récepteurs, il est défini par :

$$\frac{P_R}{N} = \frac{P_t G_t G_L G_R \tau_T \tau_L \tau_{atm}}{N} \quad (\text{I.16})$$

P_R : la puissance totale reçu,

La puissance de bruit dans une bande de fréquence donnée, se définit par : $N = k * T * B$

Où k est la constante de Boltzmann, T : la température de système en Kelvin, et B représente la bande de fréquence.

I.7 Caractéristiques des équipements FSO

Pour définir une liaison FSO, il faut prendre en considération les paramètres suivants :

- **La portée** : La portée de liaison FSO varie entre quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres. Certains fabricants recommandent une portée maximale, d'autres proposent une portée typique pour différentes conditions météorologiques alors que d'autres indiquent une portée recommandée intégrant une marge par rapport à la valeur maximale
- **Le débit et l'application préconisée** : de nombreux systèmes FSO acceptent différents débits et différents protocoles pour un intervalle de débits importants.
- **La sécurité** : elle est représentée par la classe laser, c'est un facteur important à prendre en compte dans les FSO. Elle conditionne les modalités plus au moins aisées pour l'installation et la maintenance de la liaison laser. Les paramètres à prendre en compte pour définir la classe laser sont : la longueur d'onde de la transmission, la puissance à l'émission et la forme du faisceau.
- **la longueur d'onde de la transmission** qui influence la marge brute du système et par conséquent la qualité de service.

I.8 Les applications des systèmes FSO

Les systèmes FSO sont utilisés dans les applications suivantes [10] :

- ✓ Installation des liaisons temporaires
- ✓ Interconnecter des réseaux LAN 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.
- ✓ Etablissement une connexion haute vitesse rapidement
- ✓ Communication entre vaisseaux spatiaux
- ✓ Installation d'une liaison d'urgence en cas de panne de liaison

I.9 Les défis des liaisons FSO

Les liaisons FSO présentent les inconvénients suivants :

- ✓ Conditions météorologiques sont limitées par la portée (en cas de pluie, brouillard, neige, chaleur ambiante)
- ✓ Dispersion du faisceau
- ✓ L'alignement du faisceau : visibilité directe

- ✓ L'atténuation atmosphérique, relié à la composition de l'atmosphère, aux effets de scintillations et la présence d'aérosols (polluant, ...)
- ✓ Le rayonnement solaire
- ✓ Présence des obstructions physique entre l'émetteur et le récepteur.

I.10 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre, que l'espace libre utilisé comme moyen de propagation de la lumière est devenu un élément important des systèmes de communication optique. Nous avons décrit les principales caractéristiques de la technologie FSO. Nous avons également décrit les composants optoélectroniques utilisés dans un système FSO, ainsi les phénomènes atmosphériques qui viennent perturber l'onde optique lors de sa propagation à travers l'atmosphère. Nous avons décrit aussi, les caractéristiques des équipements FSO, leurs applications et leurs inconvénients.

Nous envisagerons, dans le chapitre suivant, de présenter la technique de multiplexage spatiale par répartition de mode spatiale SDM et leurs avantages par rapport d'autres techniques.

Chapitre II :

La technique de multiplexage spatial (SDM)

II.1 Introduction

Les systèmes de communications optiques actuels mettent en œuvre des techniques d'accès multiple, dont le principe repose sur le multiplexage de plusieurs canaux de transmission de données sur le même support physique. Cette opération de multiplexage permet de partager la bande passante entre les différents utilisateurs des systèmes. Le multiplexage offre de larges économies grâce à la réduction des coûts d'installation et/ou d'exploitation. (Moins de câbles pour faire passer la même quantité d'information).

Pour obtenir des augmentations substantielles de la capacité par FSO, il est nécessaire de se tourner vers une meilleure exploitation du domaine spatial depuis toutes les autres dimensions de signalisation physique (à savoir le temps, fréquence, longueur d'onde, ...).

La technique du multiplexage spatial de mode consiste à utiliser les modes spatiaux de la lumière pour permettre un nouveau codage de l'information sur chacun d'entre eux tout en étant compatibles avec les autres technologies de multiplexages ou de modulation de l'information.

Ce chapitre donne une brève description de différentes techniques de multiplexage, nous présenterons également, des généralités sur la technique de multiplexage spatial ainsi que les modes de la propagation de la lumière.

II.2 Les techniques de multiplexages

Le multiplexage est une technique qui consiste à faire passer plusieurs informations à travers un seul support de transmission qui peut être soit un câble coaxial, une fibre, un canal radio ou optique. Elle permet de partager une même ressource entre plusieurs utilisateurs.

Parmi les types de multiplexage les plus couramment utilisés dans les systèmes de transmission optique, on distingue le multiplexage temporel (TDM : Time division multiplexing), le multiplexage en longueur d'onde (WDM: Wavelength Division Multiplexing) et le multiplexage par répartition de codes optique (OCDMA: Optical code Division Multiplexing).

II.2.1 Multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage TDM (Time Division Multiplexing) ou MRT (Multiplexage à répartition dans le temps) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant et à tour de rôle pour chaque utilisateur [11].

Le multiplexage TDM consiste à générer un signal modulé à partir de S_b signaux modulés obtenus à partir de séquences temporelles de symboles. Le temps symbole associé aux différents signaux modulés à multiplexer, T_s est égal à $S_b T_c$ où T_c est le temps symbole associé au signal modulé obtenu après multiplexage. La figure II.1 décrit le principe du multiplexage temporel dans le cas simplifié où l'information est contenue dans quatre séquences de données binaires.

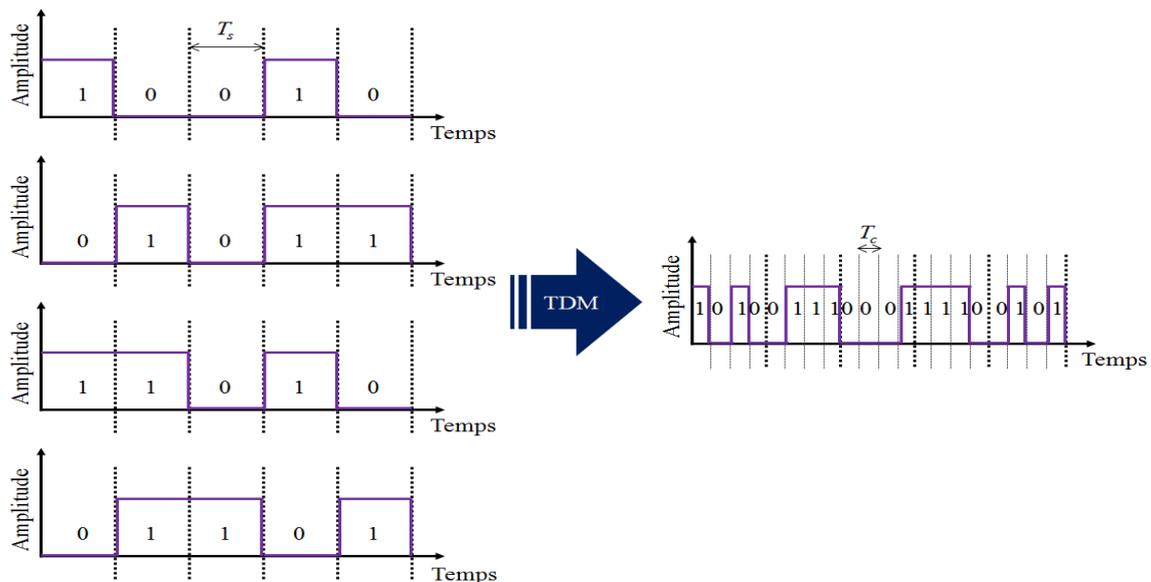


Figure II.1 : Principe du multiplexage temporel

Le débit d'information est alors multiplié par S_b . Par exemple pour un système $N= 4$ utilisateurs de débit 10 Mbits/s, on peut obtenir en sortie un multiplex temporel tel que le débit à l'entrée de la fibre est 40 Mbits/s. La source laser doit émettre au débit D , des impulsions ultracourtes de largeur $T_c = 1/40. 10^6 = 25 ns$.

Le multiplexage TDM permet de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé. Pour récupérer en réception par démultiplexage temporel les informations d'un utilisateur, le système nécessite un signal de synchronisation du rythme des données émises T_b .

II.2.2 Multiplexage en longueur d'onde (WDM)

A l'inverse de la technologie TDM qui n'utilise qu'une seule longueur d'onde. Le multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) permet le partage du réseau en utilisant la longueur d'onde comme composante de multiplexage [11],

c'est-à-dire plusieurs signaux sont générés simultanément sur des fréquences optiques (longueurs d'onde) différentes et peuvent être modulés individuellement, toutes les longueurs d'onde (les couleurs) sont envoyées sur la même fibre optique (Figure II.2). Ceci est possible, en les mélangeant à l'entrée à l'aide d'un multiplexeur (MUX), et en séparant les différentes ondes à la sortie au moyen d'un démultiplexeur (DEMUX).

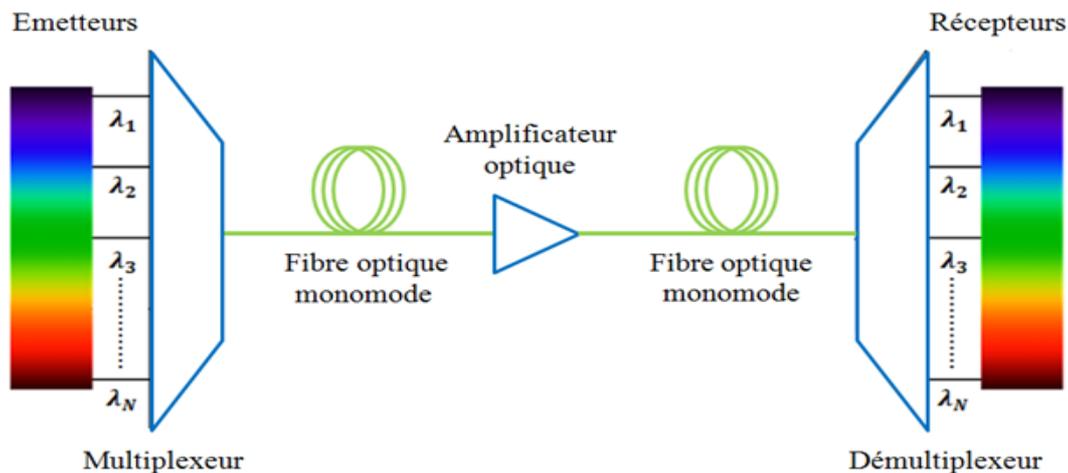


Figure II.2 : Multiplexage en longueur d'onde (WDM).

WDM est l'un des concepts les plus prometteurs pour les systèmes de communication de haute capacité, elle permet ainsi l'utilisation optimale de la bande passante optique et d'offrir un débit très élevé, le débit de la liaison est le débit par canal multiplié par le nombre des canaux (longueur d'onde).

La bande de fréquence la plus utilisée est la bande C (1530 - 1565 nm), Pour augmenter la capacité totale d'un système WDM, il est possible de jouer sur le débit transporté par chaque canal ou sur le nombre de canaux, voir sur les deux en même temps.

Le multiplexage WDM est caractérisé par l'intervalle minimum entre deux longueurs d'onde utilisables. Cet intervalle peut être exprimé en nanomètres ou en gigahertz. Lorsque l'espacement entre les longueurs d'onde est de 20 nm, on parle de Coarse WDM (CWDM). Pour un espacement plus faible (donc plus de longueurs d'onde simultanément en propagation), on parle de WDM voire Dense WDM (DWDM, plus de 32 longueurs d'onde) et même Ultra Dense WDM (UDWDM). Les systèmes DWDM commerciaux espacent les longueurs d'onde d'environ 0,8 nm (100 GHz), 0,4 nm (50GHz) voire 0,1 nm (12.5GHz). Il est ainsi possible de combiner 160 longueurs d'onde optiques et plus.

II.2.3 Multiplexage par répartition de codes optique (OCDMA)

Le CDMA optique est basé sur les mêmes concepts de base que le CDMA radiofréquence. Les différents utilisateurs partagent le même canal optique et chacun dans le réseau a sa propre séquence d'étalements (ou code) qui permet d'identifier le récepteurs destinataire. Cette différence est due principalement à la différence entre les deux milieux de propagation.

Dans l'OCDMA, une source de données, optique ou électronique activant une source optique, alimente un encodeur optique qui transforme chaque bit de donnée en séquence optique : c'est la conception de l'encodeur optique qui détermine de manière matérielle le code utilisé. La séquence est couplée avec l'ensemble des autres séquences venant des autres utilisateurs du système dans un coupleur en étoile, via une le canal optique. Côté récepteur, la totalité des signaux couplés est comparée au code correspondant à un émetteur donné (corrélation) et une détection à seuil détermine si un bit «1» ou «0» est reconnu. L'adressage se fait de manière implicite dans le codage, puisque l'ensemble des récepteurs reçoit le message (broadcast) et seul le récepteur concerné possède la clé qui lui permet d'accéder à la donnée qui lui est destinée [12].

Le schéma général d'une liaison OCDMA est présenté dans la Figure II.3.

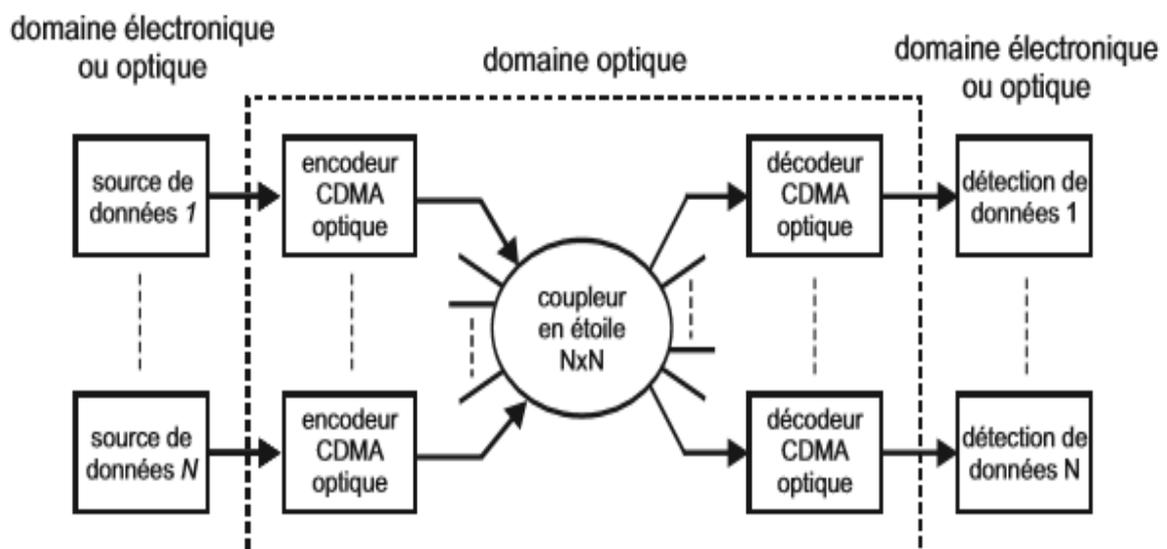


Figure II.3 : Schéma synoptique d'une liaison CDMA optique

II.3 Le multiplexage spatial (SDM)

Toutes les innovations de multiplexage cité dans le paragraphe précédent ont permis jusqu'à ce jour de répondre à la demande croissante ; toutefois ces technologies atteindront bientôt leur plein potentiel et ne suffiront plus. Il est donc impératif de mettre au point de nouvelles technologies qui permettront d'augmenter considérablement la capacité des réseaux de communications optiques. Une avenue possible est le multiplexage spatial (SDM : spatial division multiplexing), puisque l'espace est une dimension qui n'a pas été exploitée à ce jour pour les communications optiques.

Un multiplexage spatial SDM (Space Division Multiplexing) est une méthode de communication optique où les modes spatiaux sont utilisés comme canaux d'information transportant des flux de données indépendants.

II.3.1 L'architecture d'un SDM

Le multiplexage spatial implique la transmission de plusieurs séries de données indépendantes codées dans différents modes spatiaux, qui sont des solutions aux équations de propagation. Semblable au multiplexage par répartition en longueur d'onde WDM, le débit binaire total transmis est donc la somme des débits binaires de tous les canaux de données [13].

Dans l'ordre de rendre les systèmes SDM faisable, des nouvelles technologies photoniques et électroniques doivent être explorées et intégrée avec les moindres coûts possibles, cette font SDM échelle mieux que par duplication de matériel simple. De ce point, le multiplexage modale (MDM : Mode Division Multiplexing) peut être une approche prometteuse si fiable transmission MDM long-courrier peut être réalisé.

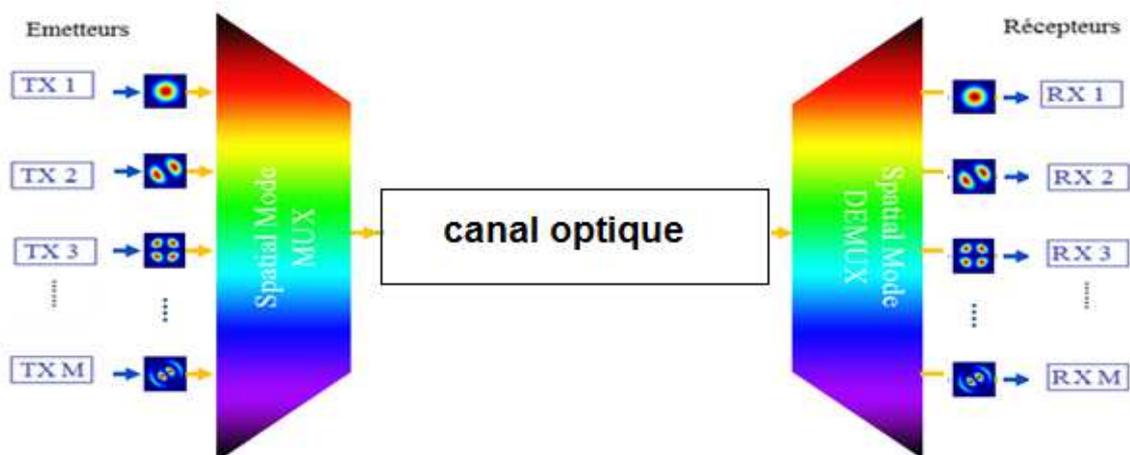


Figure II.4 : Architecture d'un système de transmission SDM

La figure II.4 illustre l'architecture du système de transmission SDM. Les signaux sont d'abord générés par N émetteurs. Le multiplexage Modale des N signaux est réalisé au moyen du multiplexeur spatial du mode (S-MUX). Les signaux portés par différents modes spatiaux sont ensuite lancés dans le canal optique (fibre optique ou espace libre). Lors de la transmission, tous les modes sur les mêmes longueurs d'onde doivent être traités comme une entité comme un supercanal SDM, à savoir, ils sont amplifiés, supprimés et ajoutés en même temps sans traitement individuel en mode. Après la transmission, les signaux reçus sont alors démultiplexé par un démultiplexeurs spatial du mode (S-DMUX). Les signaux démultiplexée sont ensuite détectés par N récepteurs [13].

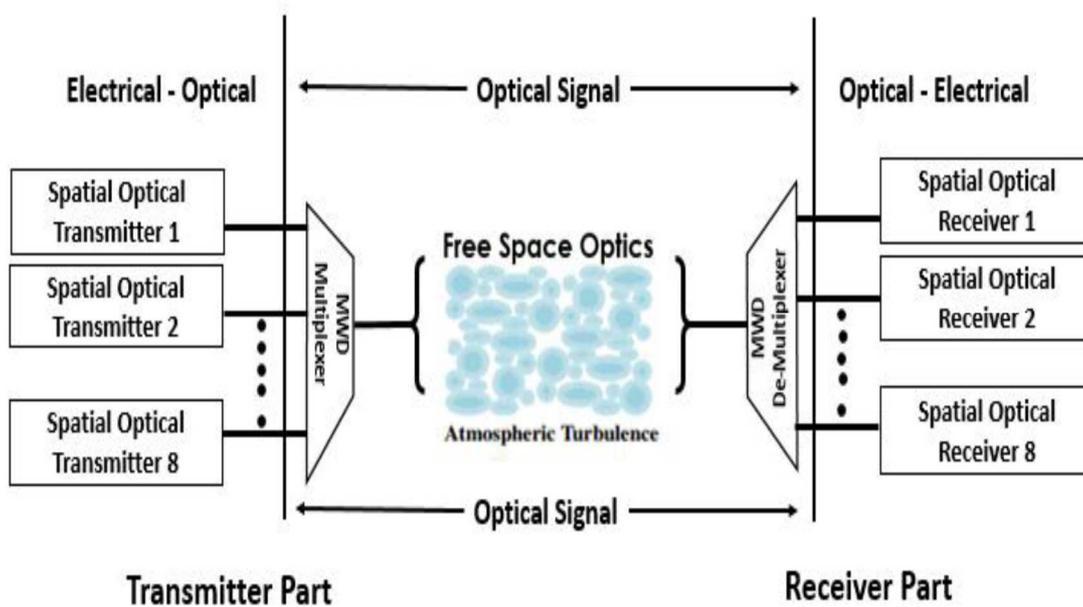


Figure II.5 : Schéma fonctionnel du système FSO/SDM [14].

Le SDM fournit un moyen de répondre aux futures demandes de capacité. Il permettra une utilisation plus efficace des ressources disponibles au niveau des systèmes FSO. Un système FSO basé sur SDM est présenté sur la figure II.5. Un émetteur optique spécial est utilisé pour générer le signal d'entrée. Il envoie plusieurs modes, sous-portent sur une même longueur d'onde. La porteuse optique du canal 1 est réglée sur le mode 1, le canal 2 va sur le mode 2, le canal 3 va sur le mode 3, etc.... On voit également que la sortie des canaux est combinée à l'aide d'un multiplexeur spatial, et transmise à travers un espace libre FSO sous différentes conditions météorologiques. Après FSO, les récepteurs optiques spéciaux ont été utilisés pour récupérer les signaux de FSO [14].

En outre, la sélection des modes dans SDM est également un problème important. Choisir le meilleur mode pour atteindre la meilleure distance avec un moindre taux d'erreur binaire (BER) doit être pris en compte. Il est à noter que les modes Laguerre-Gaussien, Hermite-Gaussien et les modes polarisé linéairement sont les modes les plus préférés d'utilisés dans la communication optique.

II.3.2 Les avantages de la technique de multiplexage par répartition spatiale (SDM)

- ✓ L'utilisation de la technique de multiplexage SDM peut simultanément augmenter la capacité et réduire la puissance optique requise par bit d'information.
- ✓ L'avantage de l'utilisation du SDM pour la réduction d'énergie par bit est visible dans la limite de capacité supérieure de Shannon, dont la formule est : $C = \log_2(1+SNR)$.
- ✓ le SDM nous permet d'échanger la largeur de bande de l'amplificateur pour des dimensions spatiales. Cette flexibilité supplémentaire peut améliorer la puissance globale de l'efficacité grâce à l'optimisation de la largeur de bande de l'amplificateur pour obtenir le rendement de conversion de la pompe à signal le plus élevé sans sacrifier la capacité de transmission du SDM [15].

II.4 Les modes de propagation

Lorsque la lumière se propage dans l'espace libre ou dans un milieu optique homogène, son profil d'intensité va généralement changer au cours de la propagation. Cependant, pour certaines distributions d'amplitude de champ électrique, appelées modes, ce n'est pas le cas : la forme du profil d'amplitude reste constante, même s'il peut y avoir une remise à l'échelle du profil, un changement global de phase optique, et éventuellement aussi une modification de la puissance optique totale [16].

II.4.1 Les modes Gaussiens

Comme tous les phénomènes électromagnétiques, la propagation des champs optiques est gouvernée par les équations de Maxwell qui donnent les relations entre les champs électriques et magnétiques. La combinaison des équations de Maxwell fourni l'équation d'onde caractérisée par un vecteur d'onde lié à la fréquence par la vitesse de la lumière c .

$$\nabla^2 E = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (\text{II.1})$$

Sa solution est de la forme $E = E_0 e^{i\omega t}$, il vient : $\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \vec{E}$

$$\Delta \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{L'équation de Helmholtz} \quad (\text{II.2})$$

Considérons les solutions de l'équation de Helmholtz correspondant à des faisceaux qui se propagent globalement selon Oz, avec des rayons paraxiaux. La solution s'écrit de façon générale sous la forme suivante : $E = E_0 e^{-ikz}$, avec : $K=w/c$.

En injectant cette solution dans (II-2).

L'approximation paraxiale consiste à supposer que la variation de l'amplitude du champ est faible suivant la direction de propagation z par rapport aux directions transversales x, y.

Ainsi l'équation de Helmholtz se transforme en équation d'onde paraxiale :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 2ik \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.3})$$

II.4.1.1 Le mode Hermite-Gaussien

Les faisceaux Hermite-gaussiens sont une famille de modes laser structurellement stables qui ont une symétrie rectangulaire le long de l'axe de propagation [17].

Les polynômes d'Hermite qui interviennent dans les modes d'Hermite-Gauss découlent de la recherche d'une forme de solution adéquate à la résolution de l'équation paraxiale à variables séparées x et y [18].

L'équation de départ qui nous conduit à la détermination des modes Hermite-Gauss est :

$$U(x, y, z) = f(x, y) * g(y, z) * A(z) e^{-i\psi(z)} e^{-i\beta(z)(x^2+y^2)} \quad (\text{II.4})$$

La solution obtenue par ce raisonnement est sous la forme :

$$U_{mn}(x, y, z) = E_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right) H_m \frac{\sqrt{2} x}{w(z)} H_n \frac{\sqrt{2} y}{w(z)} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{w^2(z)}\right) \exp(ikz) \exp\left(-ik \frac{x^2+y^2}{R_c(z)}\right) \exp[ik(m+n+1)\varphi(z)] \quad (\text{II.5})$$

Avec : Les indices n et m déterminent la forme du profil dans la direction x et y, respectivement. Les grandeurs w et R évoluent dans la direction z. H_n est le polynôme d'Hermite d'ordre n il est défini comme suit :

$$H_0=1, H_1=x, H_2=4x^2-2 \dots$$

Le polynôme d'Hermite se développe comme suit :

$$H_n(x) = n! \sum_{s=0}^{n/2} (-1)^s \frac{(2x)^{n-2s}}{(n-2s)!s!} \quad (\text{II.6})$$

A titre d'exemple, la figure II.6 illustre la distribution d'intensité selon une direction (x ou y) pour quelques ordres.

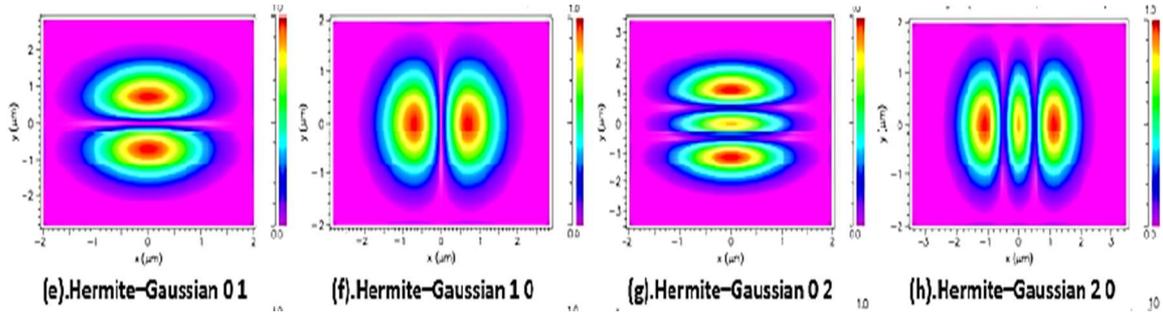


Figure II.6 : Représentation de la distribution de l'intensité des quelques modes HG

II.4.1.2 Les mode Laguerre –Gaussien

Contrairement aux faisceaux Hermite-Gaussiens, les modes Laguerre-Gaussiens ont une symétrie de rotation le long de leur axe de propagation. Ainsi on a la forme générale de l'équation paraxiale.

$$\nabla_T^2 u + 2ik \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.7})$$

Effectuant le passage de l'opérateur Laplacien d'un système de coordonnées cartésiennes vers le système de coordonnées cylindriques suivant le plan transverse on obtient l'équation paraxiale pour un champ cylindrique :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + 2ik \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.8})$$

L'équation de départ qui nous conduit à la détermination des modes Laguerre-Gauss est :

$$u(r, \theta, z) = f(r, z) * g(\theta) * A(z) * e^{-i\psi(z)} * e^{-(\alpha+i\beta)r^2} \quad (\text{II.9})$$

On obtient l'expression de la solution rechercher :

$$U_{mn}(x, y, z) = E_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right) \left(\frac{\sqrt{2} r}{w(z)} \right) L_p^1 \left(\frac{2r^2}{w^2(z)} \right) \exp \left(-i \left[kz - (2l + m + 1) \arctan \left(\frac{z}{z_R} \right) + \frac{kr^2}{2q(z)} - 1 \right] \right) \quad (\text{II.10})$$

Sachant que le polynôme de Laguerre généralisé s'exprime sous la forme :

$$L_l^m(x) = \frac{x^{-m}}{l!} * e^x * \frac{\partial^l}{\partial x^l} (X^{1+m} * e^{-x}) \quad (\text{II.11})$$

A titre d'exemple, la figure II.7 illustre la distribution d'intensité selon une direction (x ou y) pour quelques ordres.

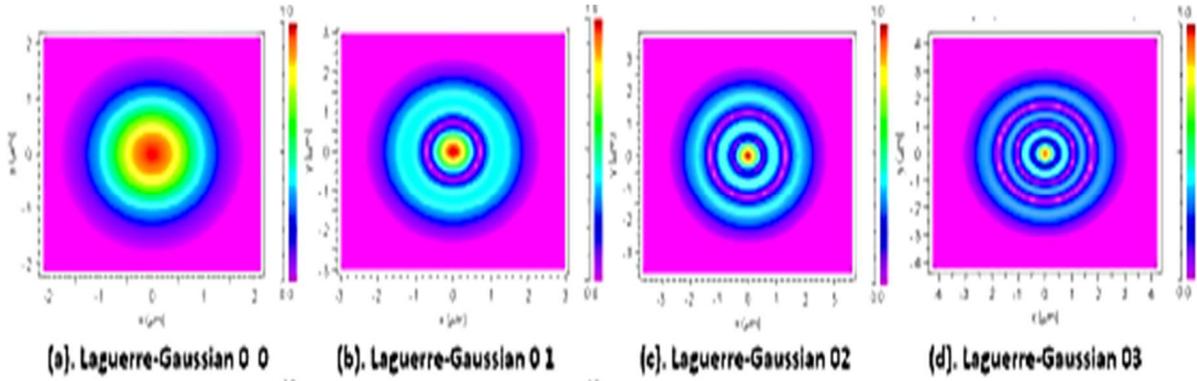


Figure II.7 : Représentation de la distribution de l'intensité des quelques modes LG

II.4.2 Les modes Polarisé Linéairement (LP : linearly polarised)

La variation très faible (moins de 1 %) de l'indice de réfraction dans la partie utile des fibres optiques (l'approximation du guidage faible) permet de remplacer les équations de Maxwell par une équation de propagation scalaire, et la solution de cette équation est appelée le mode polarisés linéairement (LP) de la fibre [19].

$$\Delta\Psi + K^2n(r)^2\Psi = 0 \quad (\text{II.12})$$

Avec : $k = 2\pi/\lambda$.

Les modes polarisés linéairement (l, m) sont souvent appelés modes LP_{lm} . Où l est le nombre azimutal correspondant au nombre de plans de symétrie du champ et le nombre radial m est le nombre de maxima d'intensité sur la direction radiale.

La résolution de l'équation de propagation en coordonnées cylindriques est tout à fait adaptée :

$$\frac{\partial^2 \Psi(r,\phi)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi(r,\phi)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi(r,\phi)}{\partial \phi^2} + [k_0^2 n^2(r) - \beta^2] \Psi(r, \phi) = 0 \quad (\text{II.13})$$

Avec : β est la constante de propagation.

L'équation résultante est donc :

$$\frac{r^2 d^2 R}{R dr^2} + \frac{r}{R} \frac{dR}{dr} + r^2 [k_0^2 n^2(r) - \beta^2] = -\frac{1}{\phi} \frac{d^2 \phi}{d\phi^2} \quad (\text{II.14})$$

Et comme la fibre optique étant un milieu circulaire, les solutions sont 2π périodiques.

Il est ainsi possible d'écrire :

$$\frac{1}{\phi} \frac{d^2 \phi}{d\phi^2} = \text{constante} = -l^2$$

$$\frac{r^2 d^2 R}{R dr^2} + \frac{r}{R} \frac{dR}{dr} + r^2 [k_0^2 n^2(r) - \beta^2] = -l^2 \quad (\text{II.15})$$

L'ensemble des modes LP constitue une base orthonormée de la fibre optique. Le multiplexage de mode spatial utilise cette propriété afin d'envoyer autant de canaux de données que de modes spatiaux dans la fibre optique [20].

La représentation des premiers modes LP se trouve sur la Figure II.8. La couleur rouge correspond à une phase nulle alors que la couleur bleue à une phase égale à π .

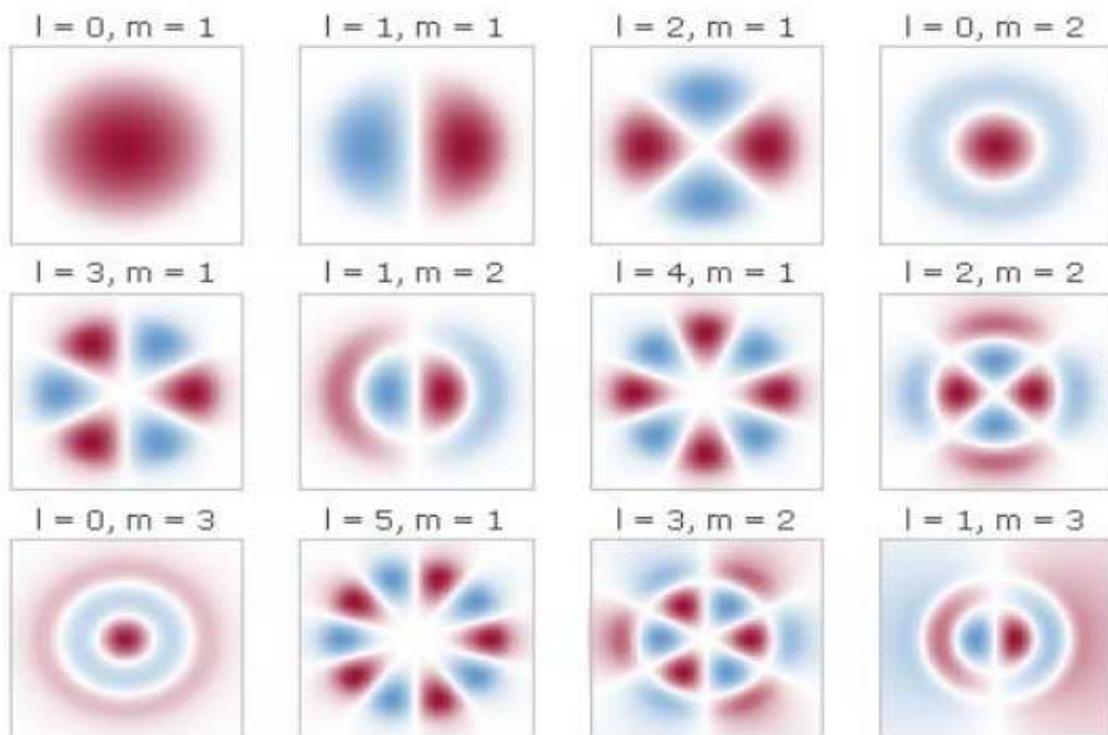


Figure II.8 : Représentation de la distribution d'amplitude des premiers modes LP.

II.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter plusieurs techniques de multiplexage ont été inventées pour faire face à la demande de capacité. Le multiplexage spatial semble la

technologie qui peuvent fournir la capacité d'échelle compatible avec la demande en capacité au cours des prochaines décennies. En se concentrant sur le multiplexage par répartition des modes, appelé également le multiplexage modale (MDM), nous avons consacré à l'étude et la caractérisation des différents modes spatiaux (le mode LG, HG, et LP) qui sont capables de transporter des informations.

Au chapitre suivant nous aborderons les résultats et les interprétations de la conception et l'évaluation des performances d'un système FSO pour les télécommunications optiques à haut débit en utilisant la technique SDM.

Chapitre III :

Résultats de la simulation

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus par la simulation du système SDM/FSO à la longueur d'onde 2 μm , en utilisant le logiciel OptiSystem. Cette analyse est effectuée en termes de facteur de qualité Q, de BER, et le diagramme de l'œil, prenons en considération l'atténuation géométrique (geometric Loss), et la variance de Rytov pour modéliser l'effet de la scintillation.

Le système est analysé pour les différentes conditions météorologiques telles que : temps très clair, pluie légère, forte pluie, bouillard fort... Et les variations des différents paramètres du système telles que : l'atténuation géométrique, l'angle de divergence de l'émetteur, diamètre d'ouverture du récepteur, débit binaire et le nombre des modes. L'étude consiste à déterminer la portée maximale entre l'émetteur et le récepteur FSO pour une valeur de facteur Q acceptable.

III.2 Présentation du logiciel OptiSystem

Le logiciel OptiSystem est développé par une société canadienne Optimale ; « Optical Communication System Design Software », il permet de concevoir, simuler et d'analyser des systèmes de transmission optique. Ce logiciel permet de faire la simulation de telle liaison optique et d'optimiser la qualité de transmission

Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- **Les composants virtuels de la bibliothèque** sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- **La bibliothèque de composants** permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, ces composants s'intègrent aux équipements de test et de mesure des différents fournisseurs.
- **Les outils de visualisation avancée** produisent le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation.

Applications du logiciel OptiSystem

Parmi les diverses applications d'OptiSystem nous allons citer les plus utilisées :

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

- Le calcul du taux d'erreur binaire (BER ou TEB) et le calcul du bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et les réseaux optiques passifs (PON).
- L'espace libre pour les systèmes optique.
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

Avantages du logiciel OptiSystem

Les avantages du logiciel OptiSystem sont :

- Obtenir un aperçu de performances du système de fibre optique.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation du système.
- Présentation virtuelle des options de conceptions.

III.3 Les principaux critères d'évaluation d'une transmission optique

Pour évaluer les performances d'un système de transmission, on utilise le facteur de qualité Q, le taux d'erreurs binaire TEB (BER) et le diagramme de l'œil qui sont des trois principaux critères de qualité.

III.3.1 Le diagramme de l'œil

Le Diagramme est un moyen visuel efficace pour déterminer la qualité du signal optique détectée au niveau du récepteur optique.

Le diagramme de l'œil représente la superposition synchrone de tout symbole binaire de la séquence transmise. Quand le facteur de transmission Q est plus faible le diagramme de l'œil obtenu est plus fermé, en revanche. Quand la qualité du signal optique détecté est fiable, la détection du signal est sans erreur donc le diagramme de l'œil obtenu est plus ouvert [21].

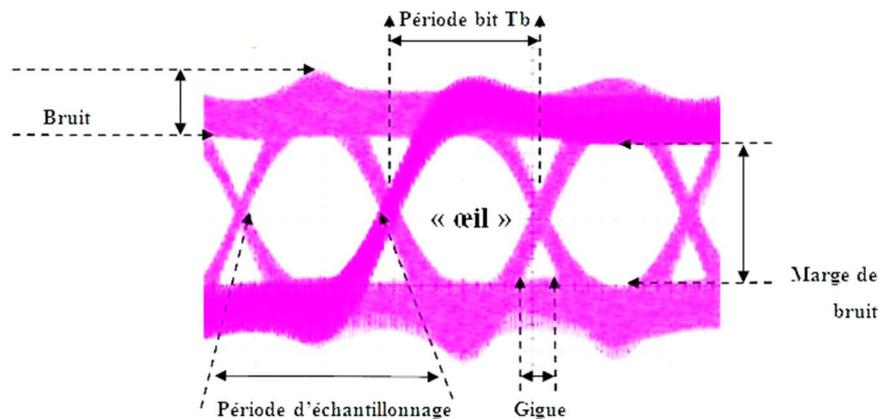


Figure III.1 : Diagramme de l'œil d'une transmission optique

III.3.2 Facteur de qualité Q

Le signal mesuré à l'entrée d'un analyseur de diagramme de l'œil contient une contribution due au signal 'utile' ainsi qu'un apport en bruit dû à l'ensemble des éléments de la chaîne de transmission. Dans le diagramme de l'œil qui retrace le signal mesuré, 'le signal utile' est représenté par les niveaux moyens μ_1 et μ_0 . Le 'bruit' représente les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens, il est quantifié en combinant les écarts-types μ_1 et μ_0 . On définit donc le facteur Q à partir de relever du diagramme de l'œil par [21] :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{III.1})$$

III.3.3 Taux d'erreur binaire (BER)

Le taux d'erreur en bit, ou BER "Bite Error Rate", est une grandeur sans dimension qui permet d'évaluer les performances d'une communication numérique. Le BER est le rapport du nombre d'erreurs sur celui de bits transmis lors de la mesure.

Une qualité de transmission numérique est simple à évaluer ; il suffit donc de comparer la séquence de symboles envoyés à celle de symboles reçus, et de compter les erreurs (nombre de fois où "0" est détecté pour un "1" émis ou vice-versa [21]).

$$BER = \frac{\text{nombre de bits errones}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (\text{III.2})$$

III.4 Présentation de l'architecture du système SDM/FSO

III.4.1 Schéma générale du système SDM/FSO

Dans notre système de communication SDM/FSO, les émetteurs-récepteurs optiques communiquent à travers l'air pour former des liaisons directes point à point. L'émetteur spatial génère les différents modes utilisés comme porteuses optiques. La porteuse optique du canal 1 est réglée sur le mode 1, le canal 2 va sur le mode 2, le canal 3 va sur le mode 3, etc... Cependant, un modulateur optique est utilisé pour fournir un format de modulation sur les données numériques. Le multiplexeur spatiale multiplexé tous les canaux pour les envois à travers la liaison FSO. Une liaison FSO consiste le lien entre un émetteur et un récepteur. À la réception, un démultiplexeur spatiale est utilisé pour séparer les canaux, suivi par des récepteurs spatiaux pour détecter et converti les signaux reçus de l'optique à électrique. La figure (III.2) illustre un schéma global du système proposé SDM/FSO.

Le choix de la longueur d'onde pour le FSO et la sélection des modes dans SDM sont également un problème important. Choisir la meilleure longueur d'onde et les meilleurs modes pour atteindre une longue distance avec un moindre (BER) doit être pris en compte.

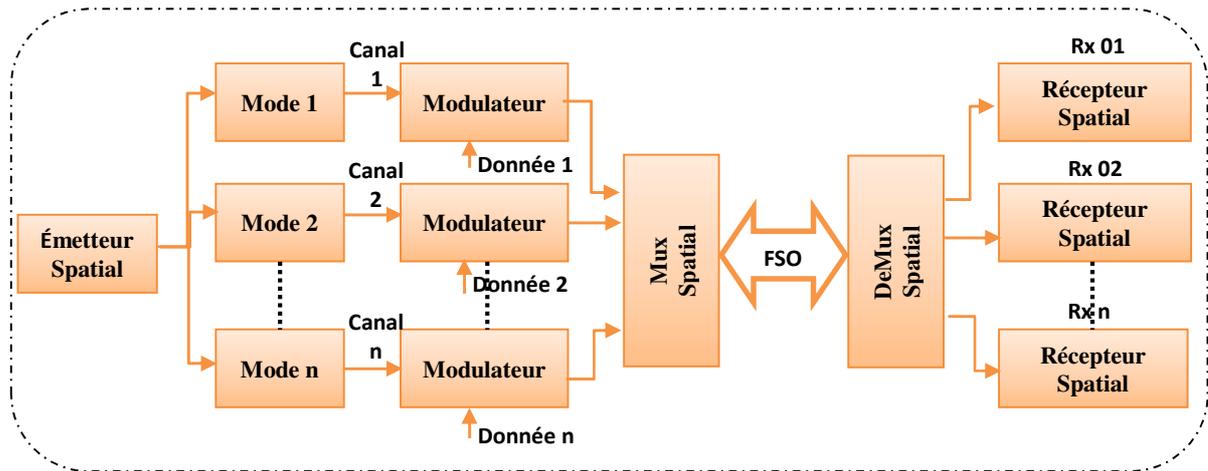


Figure III.2 : Schéma globale d'un system SDM/FSO

III.4.2 Choix de la longueur d'onde

Le choix de la longueur d'onde est un paramètre important pour une liaison optique en espace libre. Cependant, deux plages de longueurs d'ondes sont utilisables, les plages infrarouges et visibles qui se répartissent dans des fenêtres de transmission optique. Dans ces fenêtres, les longueurs d'ondes émises ne souffrent pas beaucoup de phénomènes d'absorption atmosphérique. Un autre avantage de l'utilisation de ces longueurs d'ondes est qu'elles sont utilisées dans les composants utilisant les fibres optiques. Dans les fenêtres de transmission, les grandes longueurs d'ondes (infrarouge lointain) possèdent une meilleure transmission atmosphérique que les plus faibles longueurs d'ondes. Toutefois, il n'existe pas de fenêtre de transmission à toutes les longueurs d'ondes. En effet, l'absorption atmosphérique est un phénomène sélectif lié à la composition de l'atmosphère. Ainsi, la transmission spectrale de l'atmosphère va présenter des zones transparentes dites fenêtres de transmission atmosphérique et des zones opaques ou fenêtres de blocage atmosphérique. Ces fenêtres permettent les transmissions optiques en espace libre sans pertes excessives.

Dans ce travail de mémoire, la longueur d'onde $2\ \mu\text{m}$ est choisi pour la liaison FSO.

III.4.2.1 Les critères de sélection la longueur d'onde $2\ \mu\text{m}$

- ✓ Les longueurs d'onde de $2\ \mu\text{m}$ sont incluses dans la gamme de longueurs d'onde jugée sûre pour les yeux car le rayonnement laser autour de $1,4\ \mu\text{m}$ à $2,4\ \mu\text{m}$ est fortement absorbé dans le corps vitré de l'œil et n'atteint pas la rétine.
- ✓ Les lasers $2\ \mu\text{m}$ remplacent régulièrement les autres sources lumineuses en raison de leur faible coût, facilité d'utilisation et gamme de méthodes de distribution d'énergie telles que faisceaux pulsés et continus.

- ✓ Les inconvénients de la longueur d'onde 1.55 μm sont le haut niveau de scintillation dans l'atmosphère turbulente et une plus faible transmission comparés à 2 μm .
- ✓ La liaison à 2 μm présente une meilleure transmission et une visibilité très claire par rapport à la liaison à 1,55 μm , alors elle devienne la plus intéressante en termes de puissance.
- ✓ La disponibilité d'une liaison FSO sera augmentée en hiver en utilisant une longueur d'onde infrarouge moyen 2 μm au lieu d'une longueur d'onde infrarouge courte 1,55 μm .

III.4.2.2 Confirmation du choix de la longueur d'onde avec la simulation

Dans cette section nous allons faire une étude de la performance d'une liaison FSO pour quatre longueurs d'onde ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$, $\lambda = 1 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ et $\lambda = 2 \mu\text{m}$), dans des conditions météorologiques différentes ; temps très claire et fort brouillard, en incluant les variations associées.

Le débit	10 Gbit/s
La puissance d'émission	30 dBm
Les longueurs d'ondes choisies	($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$, et $2 \mu\text{m}$)
La distance entre l'émetteur et le récepteur	1 km
L'atténuation pour un temps très claire [7]	0.15 dB
L'atténuation pour un temps avec fort brouillard [7]	19.77dB

Tableau (III.1) : Les paramètres utilisé dans la comparaison.

En se basant sur les données susmentionnées dans le tableau (III.1), les résultats de la comparaison sont montrés sur la figure III.3.

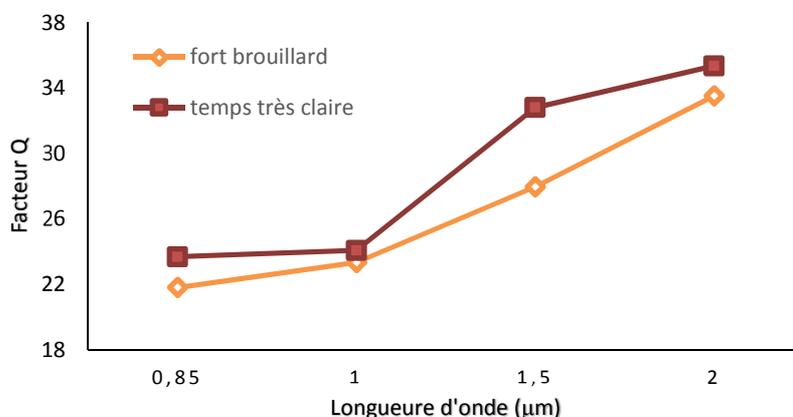


Figure III.3 : Variation de facteur Q en fonction de la longueur d'onde

La figure III.3 montre la variation de facteur Q en fonction de la longueur d'onde pour deux conditions météorologiques (temps très claire et avec fort brouillard). Cette comparaison a souligné l'importance du choix de la longueur d'onde pour FSO qui peut atteindre la meilleure qualité. Sur la base de l'analyse, les résultats montrent que la longueur d'onde 2 μm est la meilleure option qui a atteint la meilleure qualité dans les différentes conditions météorologiques.

III.4.3 Choix des modes spatiaux

De nombreux modes peuvent être utilisés comme support de données avec le système SDM sur FSO. Ces modes doivent être sélectionnés avec soin pour obtenir la distance la plus longue possible ainsi que le Q le plus haut.

Dans cette partie, nous allons étudier la qualité de la liaison SDM/FSO pour les modes LP et les modes LG. Ainsi, les modes appliqués sont :

- LG₀₀, LG₀₁, LG₀₂ et LG₀₃.
- LP₀₁, LP₀₂, LP₀₃ et LP₀₄.

La distribution d'intensité selon une direction (x ou y), pour les quatre modes LG et modes LP, sont montré dans la figure III.4.

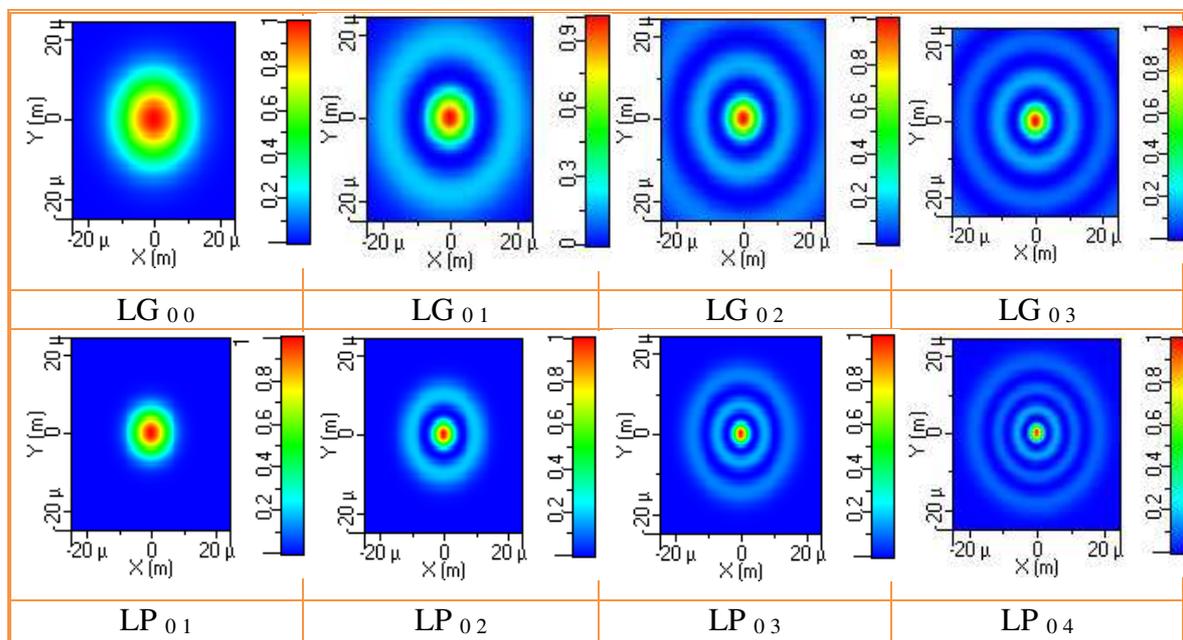


Figure III.4: Représentation des quatre modes LG (en haut) et LP (en bas).

Les résultats de la comparaison entre quatre modes LG et modes LP sont présentés dans la figure III.5. Cette figure montre la variation du facteur de qualité Q en fonction des modes

choisis pour un débit de données total est de 10 Gbps, une distance maximale de la liaison FSO est de 12 km et une atténuation de 0,15 dB/Km. Cette comparaison a souligné l'importance de la sélection du mode pour SDM qui peut atteindre la meilleure qualité en modes LG et LP. Sur la base de l'analyse, les résultats montrent que le mode LG est la meilleure option qui a atteint une distance de 12 km.

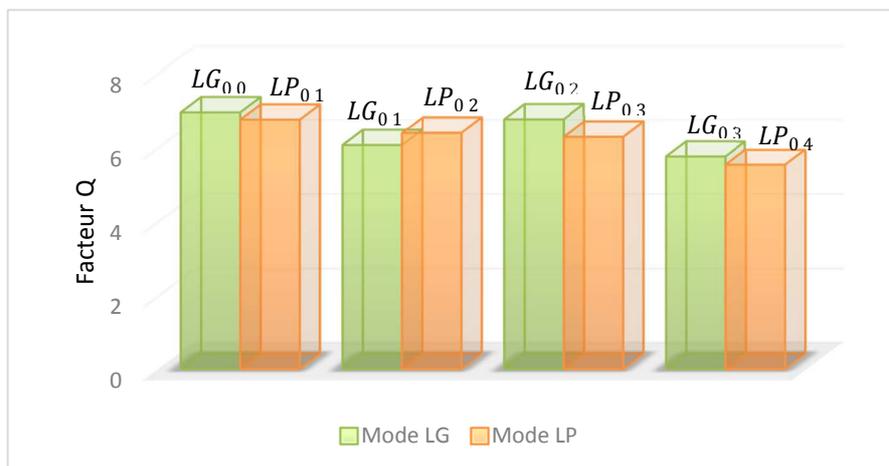


Figure III.5: Résultat de comparaison du facteur Q de différents modes dans SDM/FSO

III.5 Présentation de système SDM/FSO sur l'OptiSystem

III.5.1 L'architecture du système SDM/FSO sur l'OptiSystem

Dans cette partie, nous présentons l'architecture du système SDM/FSO que nous avons simulé dans le but d'étudier leur performance, pour 4 modes.

Le schéma ci-dessous représente le modèle du système SDM/FSO sous le logiciel OptiSystem.

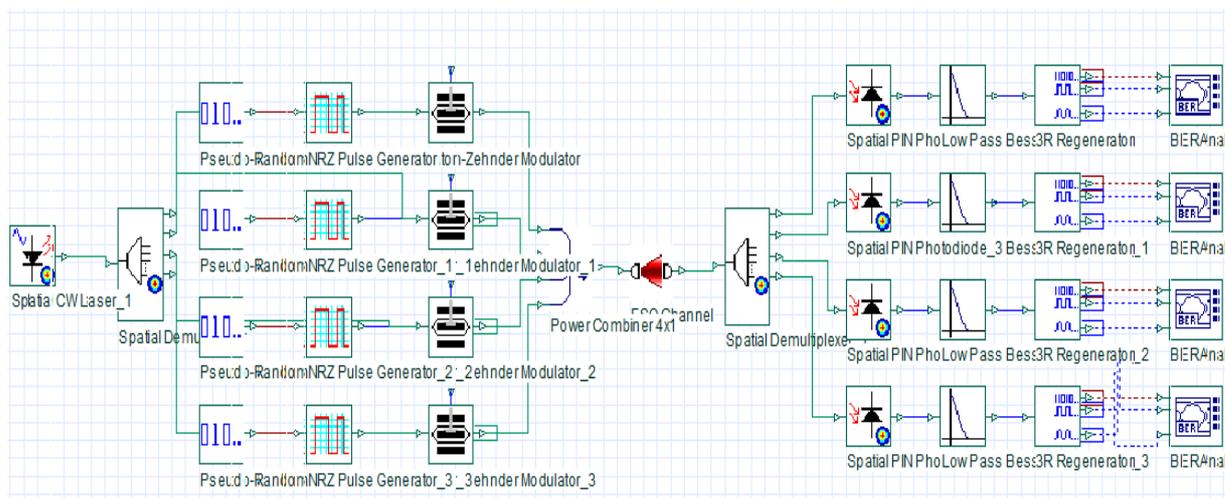


Figure III.6 : Schéma bloc du système SDM / FSO

Le système SDM/FSO est composé de trois grandes parties, à savoir :

- Un émetteur optique ;
- Un canal FSO ;
- Un récepteur optique.

III.5.1.1 L'émetteur optique

L'émetteur du système proposé SDM/FSO est une source laser multimode, constitué d'une diode laser de type CW et un générateur multimode permet de générer les quatre modes spatiaux LG_{00} , LG_{01} , LG_{02} et LG_{03} . Le paramétrage de l'émetteur optique est conformé par (le tableau III.2).

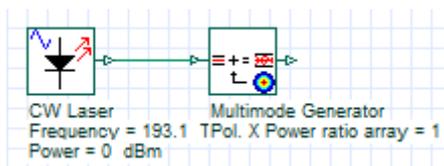


Figure III.7: model de simulation d'émetteur spatial

Puissance (power)	30 dBm
La longueur d'onde	2000 nm
La taille du faisceau laser (Spot size)	15 μm
Les modes	LG_{00} - LG_{01} - LG_{02} - LG_{03}

Tableau III.2 : Les caractéristiques de la source de la lumière

Les modes générés sont séparé par un démultiplexeur spatial pour générer quatre canaux optiques. Ces canaux sont ensuite modulés par les données numériques des utilisateurs, en utilisant un modulateur optique de type Mack-Zehnder. Cependant, nous avons utilisé un générateur d'impulsions électriques Non-Return-to-Zero (NRZ) pour fournir un format de modulation sur des données numériques. Le combineur multiplexé tous les canaux (les modes) et l'envoi à travers la liaison FSO. La forme spatiale du faisceau laser est donnée par la superposition des quatre modes générés comme illustrée dans la figure (III.8).

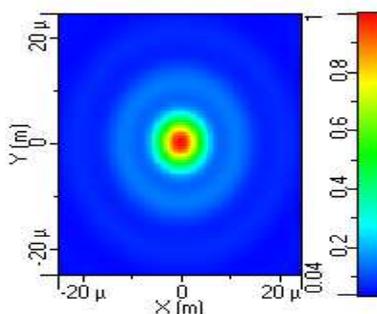


Figure III.8: La forme spatiale du faisceau laser émis

III.5.1.2 Le canal FSO

Les données de la source optique sont émises sous un canal FSO présenté par la figure (III.9) sous le logiciel OptiSystem. Le tableau suivant illustre les paramètres à configurer.

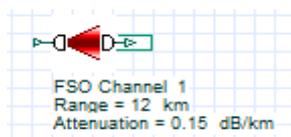


Figure III.9: Le model de simulation d'un canal FSO

La longueur de FSO (Range)	12 km
Atténuation géométrique	0.15 dB/km
Diamètre d'ouverture d'émetteur	20 cm
Diamètre d'ouverture de récepteur	20 cm
Divergence du faisceau (Beam divergence)	0.25 mrad
Le modèle de scintillation	Log-normal

Tableau (III.3) : Les caractéristiques du canal FSO

III.5.1.3 Le récepteur optique

Au bout de la liaison optique proposée, nous trouvons le récepteur spatial du système SDM/FSO. Il se base essentiellement sur une photodiode de type PIN, pour détecter les données qui ont été envoyées par l'émetteur optique (Figure 0III.10). Le démultiplexeur spatial utilisé en amont des photodiodes est pour séparer les différents modes. Le paramétrage du récepteur spatial se fait conformément au tableau III.4. Après celui-ci, nous trouvons un filtre de Bessel passe bas avec une fréquence de coupure 0.65 fois la fréquence de rythme qui est utilisée pour passer les basses fréquences limitées. Nous savons que les données transmettent sont affectées par un bruit et il peut se produire une interférence inter-symbole. Pour mesurer l'erreur, nous avons utilisé un analyseur de BER.

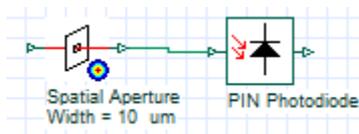


Figure III.10: Le model de simulation d'un récepteur optique

La largeur de l'ouverture spatiale (Spatial Aperture Width)	30 μm
Le type d'ouverture	Circulaire
responsivité	1 A/W
Courant d'obscurité	10 nA

Tableau III.4 : Les caractéristiques du récepteur

III.5.2 Résultats de la simulation et discussions

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de la simulation obtenus de la conception d'un système optique SDM/FSO à $\lambda = 2 \mu\text{m}$.

Les paramètres utilisés dans la simulation sont montrés dans le tableau suivant :

Paramètre de la simulation	Valeur
Range	12 km
Longueur d'onde	2 μm
Puissance (Power)	30 dbm
Débit binaire par canal	10.10 ⁹ bit /s
Spot size	15 μm
Les modes	LG ₀₀ , LG ₀₁ , LG ₀₂ , LG ₀₃
Atténuation géométrique	0.15 dB/km
Le diamètre d'ouverture de l'émetteur	20 cm
Divergence du faisceau (Beam divergence)	0.25 mrad
Le diamètre d'ouverture de récepteur	20 cm
La largeur de l'ouverture spatiale (Spatial Aperture Width)	30 μm
Le modèle de scintillation	Log-normal

Tableau III.5 : Les paramètres utilisés dans la simulation

La performance de la liaison proposée est étudiée sous l'impact des pertes géométriques (A_{Geo}) et pour des conditions climatiques variables, à savoir : clair, brouillard léger, brouillard modéré et fort brouillard, prenons ainsi en considération l'effet de la scintillation.

Les variations des pertes géométriques (geometric Loss) et la variance Rytov pour la scintillation atmosphérique, avec une portée FSO (Range) croissante sont illustrées à la figure III.11 et 12, respectivement.

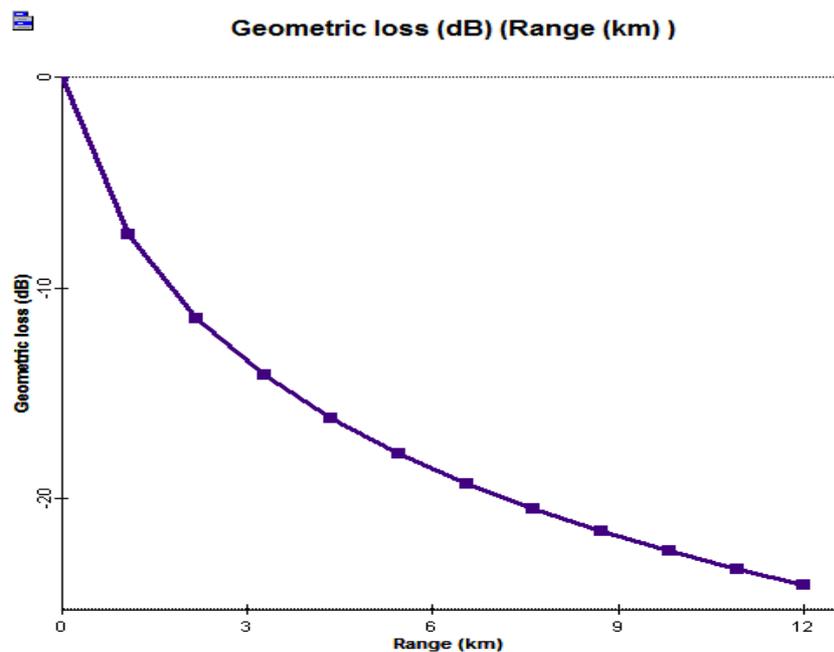


Figure III.11 : La variation des pertes géométriques en fonction de la distance (Range)

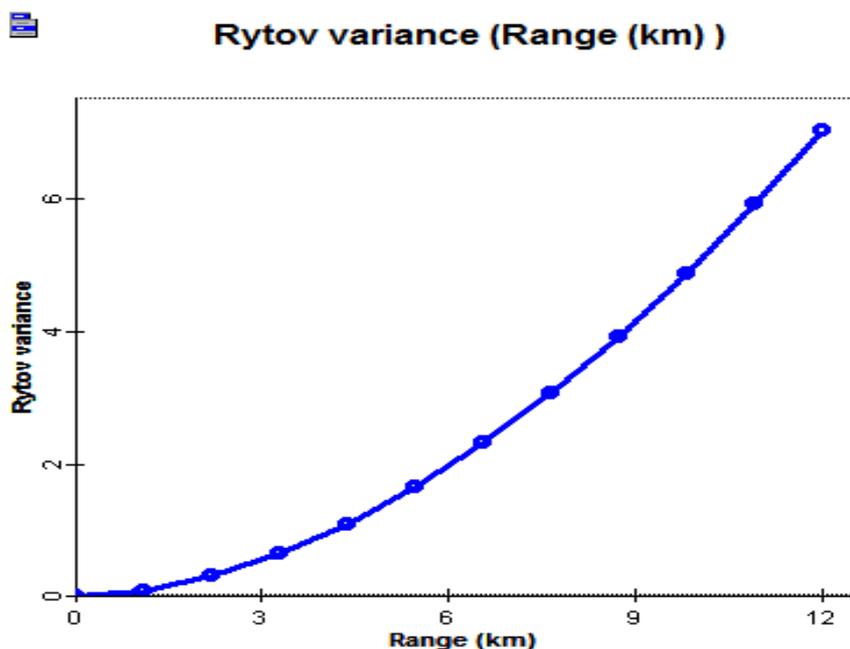


Figure III.12 : la variation de la variance de Rytov en fonction de la distance (Range)

Le bloc 'BER analyser' nous permet d'évaluer le BER et le facteur Q et nous permet encore de visualiser le digramme de l'œil.

Les figures suivantes, représentent les diagrammes de l'œil correspondants les quatre canaux (modes), et les variations de facteur Q en fonction de la distance, respectivement.

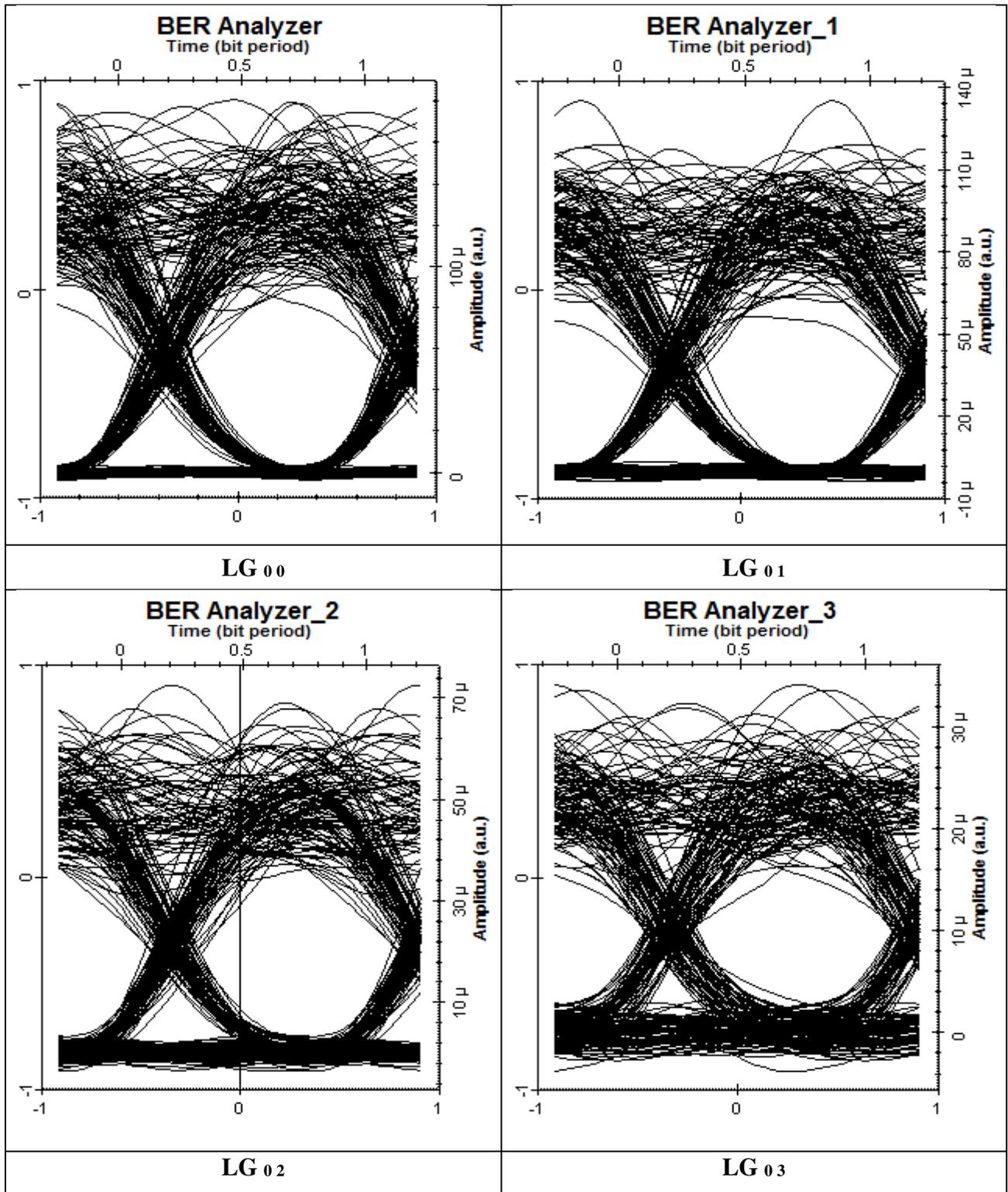


Figure III.13 : Les diagrammes de l'œil correspondants les quatre canaux (modes).

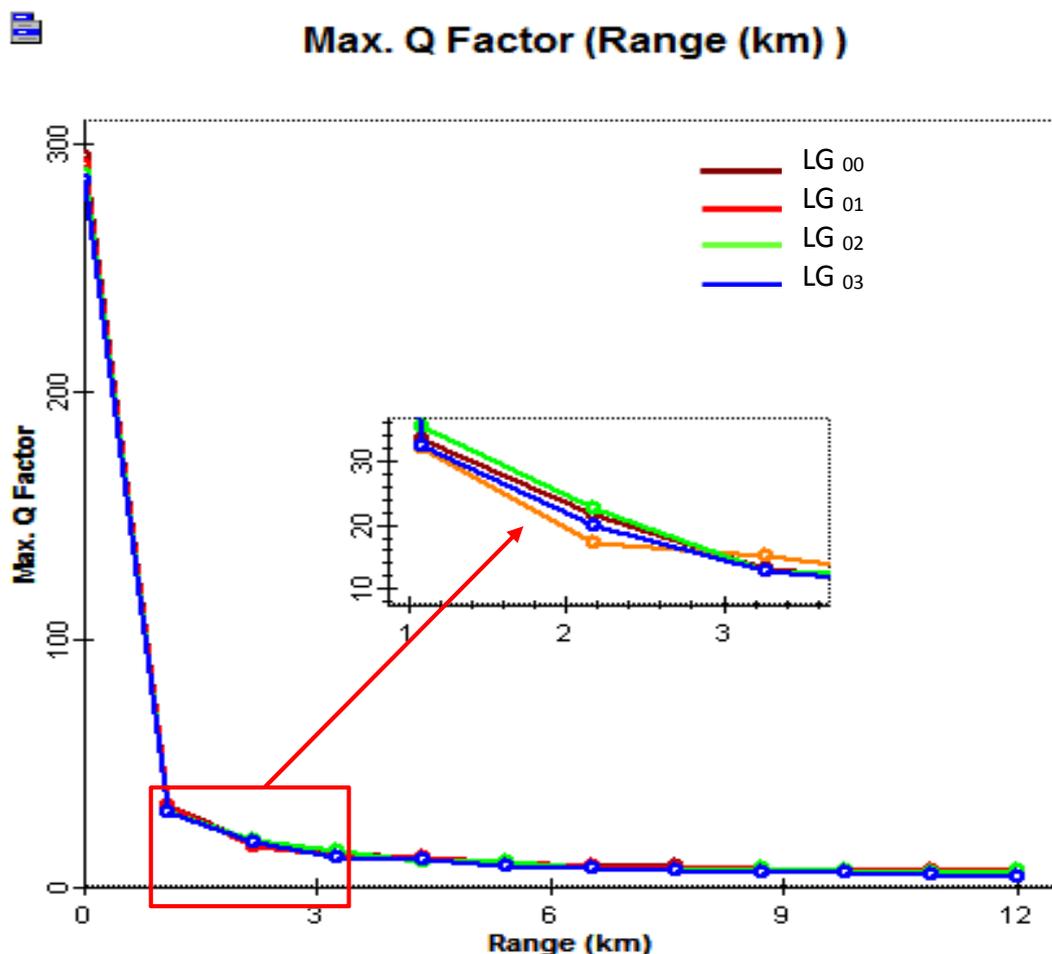


Figure III.14 : Variation des facteurs Q correspondants les quatre canaux (modes) en fonction de la distance (Range)

La figure III.13 représente le diagramme de l'œil avec les quatre modes LG dans des conditions météorologiques en temps claires à une distance de 12 Km. Les diagrammes de l'œil présentent des bons résultats, présentés par les bonnes ouvertures des diagrammes de l'œil, ce qui indique également une meilleure réception du signal. La valeur du paramètre d'atténuation géométrique qui a été utilisée dans cette simulation est 0.15 dB/km, ce qui montre que la dégradation major du système FSO est venue de l'effet de la scintillation.

La figure III.14 montre la variation des facteurs Q des quatre modes en fonction de la distance. On remarque que le facteur Q des quatre modes est varié de la même manière et est atteint également une valeur $Q = 10$ à une distance de 12 Km.

III.5.3 Effet de différent paramètres sur la performance du système SDM/FSO

III.5.3.1 Effet de la variation de la puissance optique d'un émetteur spatial pour une liaison SDM/FSO

La figure suivante montre la variation de facteur Q en fonction de la puissance optique d'un émetteur spatial pour une liaison SDM/FSO à 12 km avec un format de modulation NRZ.

Après ces résultats il est très clair que l'augmentation de la puissance d'émission optique a un effet remarquable sur les performances d'un système SDM/FSO. Les facteurs Q des quatre modes montrent que le facteur Q ($Q = 7$) du mode LG_{00} est élevé que celle du mode LG_{03} ($Q = 5$) pour une puissance de 30 dBm. Cette différence dans la valeur de Q indique également une meilleure réception du signal du canal du mode LG_{00} . Ces résultats sont confirmés aux résultats obtenus de BER (Figure III.16).

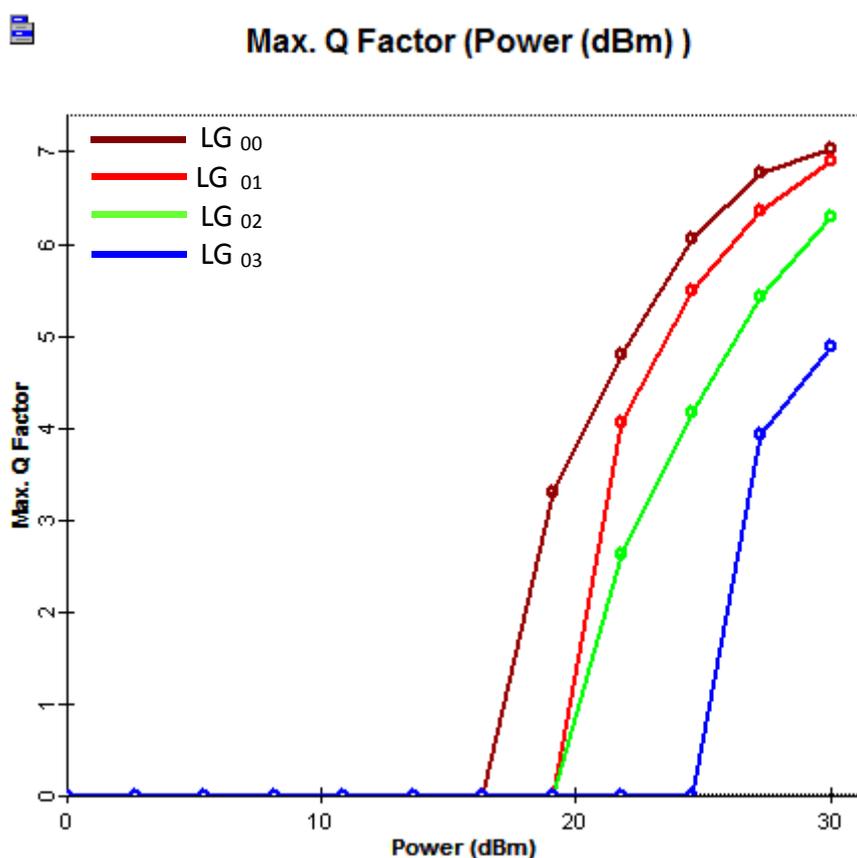


Figure III.15: Variation de facteur Q en fonction de la puissance optique émise pour les quatre modes.

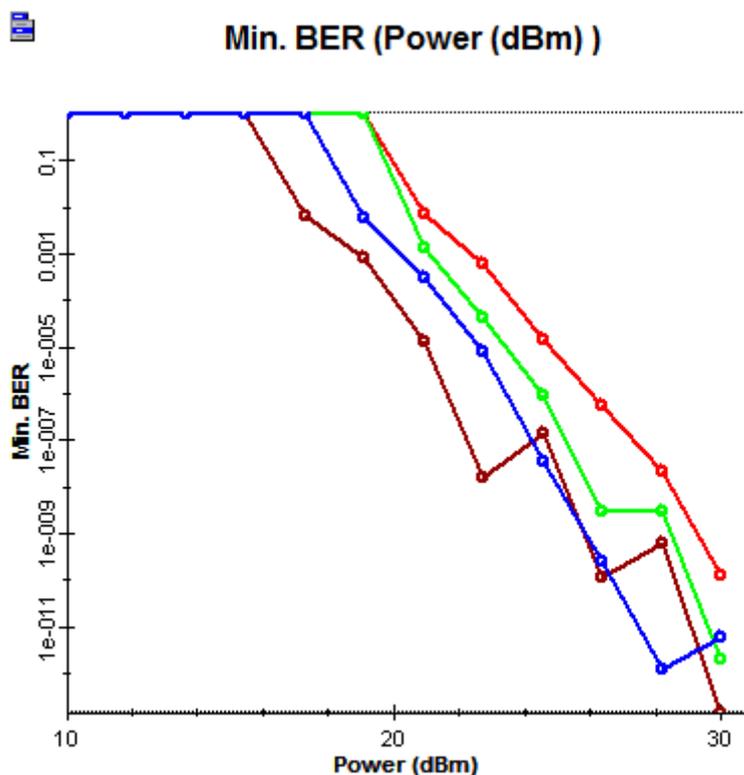


Figure III.16 : Variation de BER en fonction de la puissance optique émise pour les quatre modes.

III.5.3.2 Effet de la variation de l'atténuation géométrique (dB/km) pour une liaison SDM/ FSO

Les figures suivantes (III.17, 18, 19 et 20) illustrent la variation de facteur Q en fonction de la distance avec des valeurs différentes d'atténuation atmosphérique pour différentes conditions météorologiques (temps très clair, faible pluie, faible brouillard et brouillard fort).

Après ces résultats, on remarque que l'augmentation de l'atténuation atmosphérique provoque une perte d'énergie au niveau de récepteur, ce qui entraîne une forte diminution de facteur Q de transmission. On remarque aussi que le facteur Q des quatre modes est varié de la même manière, et est atteint également une valeur $Q = 10$ à une distance de 12 Km dans le cas d'un temps très clair, $Q = 10$ à une distance de 5 Km dans le cas d'une faible pluie, $Q = 10$ à une distance de 3 Km dans le cas d'un faible brouillard, et $Q = 10$ à une distance de 1 Km dans le cas d'un brouillard fort. On peut conclure ainsi, que la portée d'une liaison FSO est fortement limitée par l'atténuation géométrique.

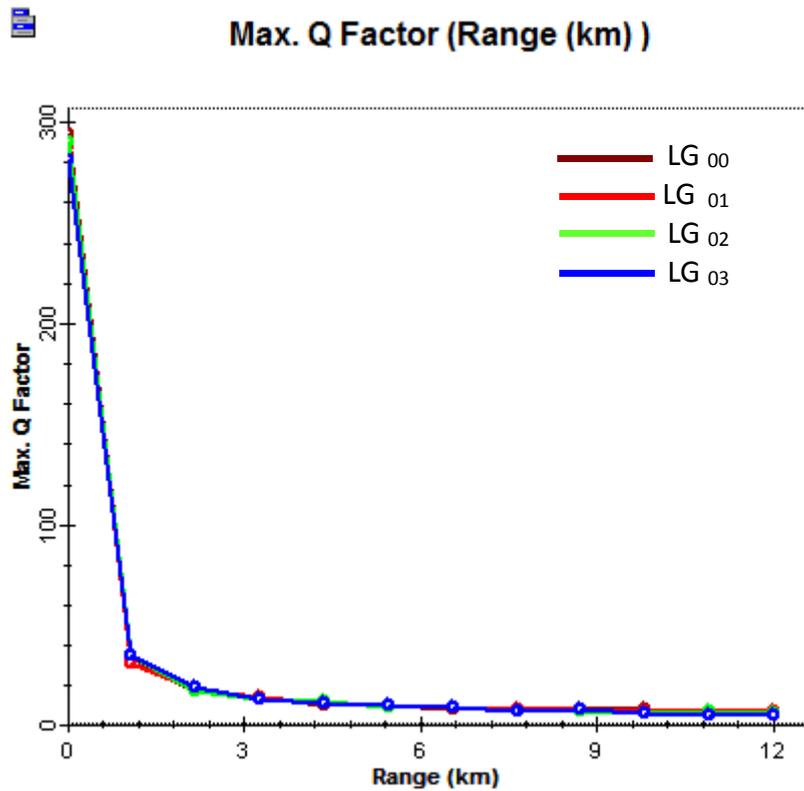


Figure III.17 : la variation de Q en fonction de la distance avec une atténuation 0.15 dB/km (temps très clair)

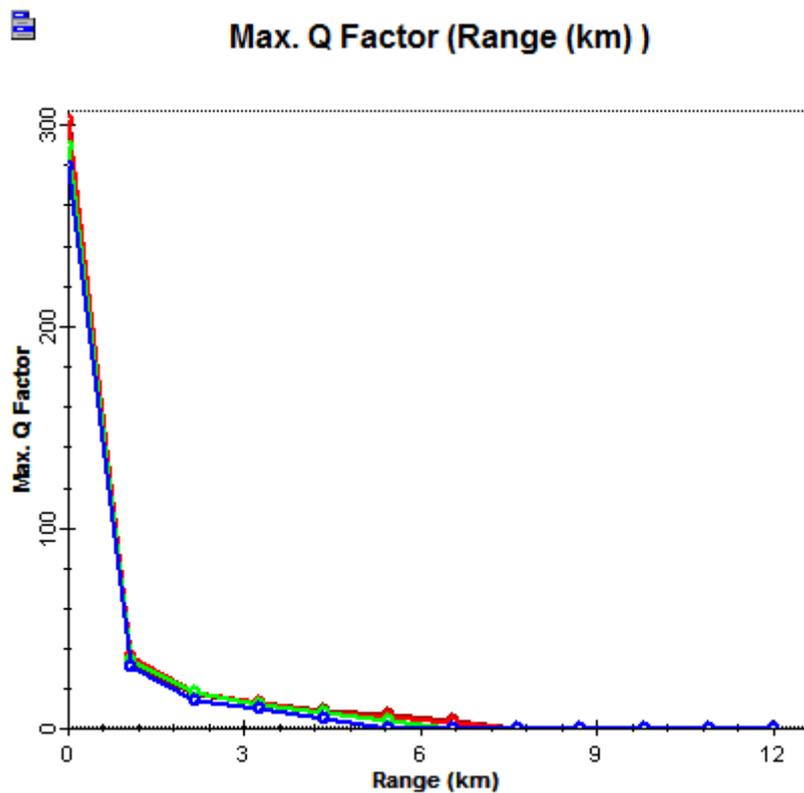


Figure III.18: la variation de Q en fonction de la distance avec une atténuation 2.61 dB/km (faible pluie)

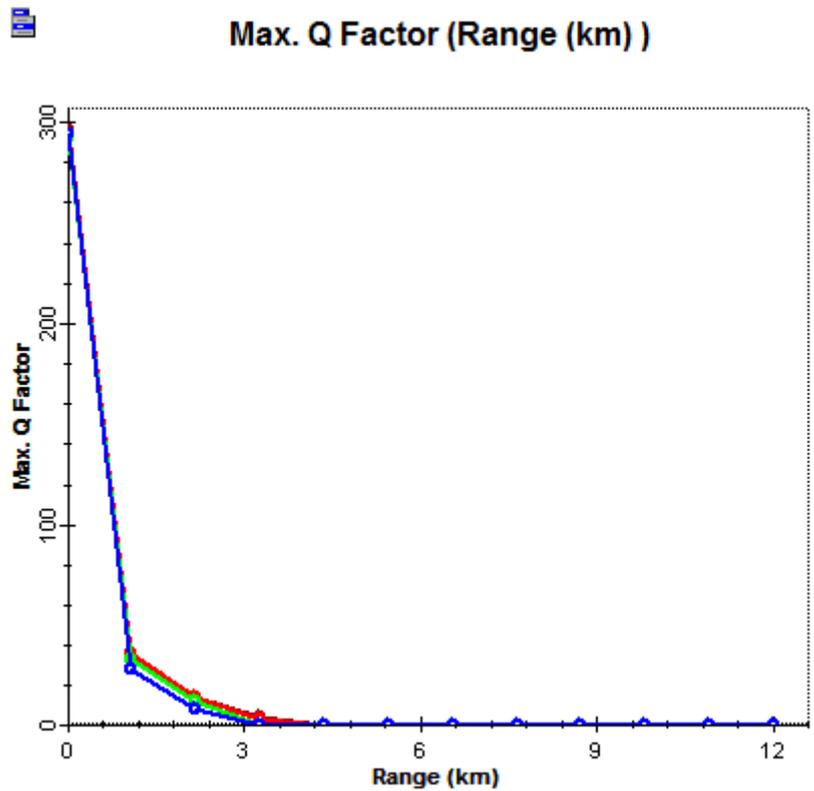


Figure III.19 : la variation de Q en fonction de la distance avec une atténuation 6.80 dB/km (faible brouillard)

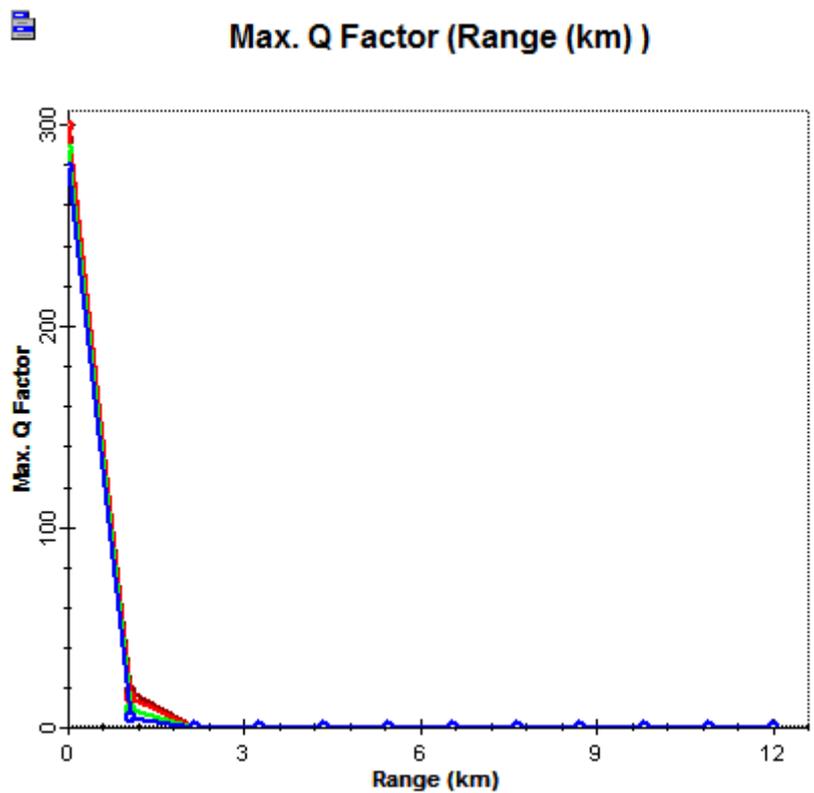


Figure III.20 : la variation de Q en fonction de la distance avec une atténuation 19.77 dB/km (brouillard fort)

III.5.3.3 Effet de la variation de la divergence du faisceau laser pour une liaison SDM/ FSO

La divergence d'un faisceau laser « beam divergence en anglais » c'est un paramètre très important dans une liaison FSO et leur variation à des impacts remarquables sur la qualité de la liaison.

La figure III.21 illustre les performances en termes de facteur Q de la liaison SDM/FSO pour tous les canaux spatiaux avec un angle de divergence augmente de 0,2 mrad à 1,3 mrad à une distance de 12 km. Les résultats montrent que l'augmentation de l'angle de divergence dégrade la qualité du signal reçu, ce qui devrait être attendu car l'augmentation de l'angle de divergence signifie plus de perte de puissance du signal optique vers l'environnement. D'après la comparaison des performances des différents canaux spatiaux en fonction de l'augmentation de l'angle de divergence, on peut voir que le facteur Q est élevé ($Q = 8$) pour le canal LG_{01} qui est le plus robuste et est faibles ($Q = 6.5$) pour le canal LG_{03} qui est le plus influe aux effets atmosphérique. D'après les résultats de la figure III.21, on observe que tous les canaux sont transportés de manière fiable jusqu'à une portée FSO de 12 km avec un angle de divergence de 0,1 mrad. Au-delà, les performances du signal se dégradent. Ces résultats sont confirmés aux résultats obtenus de BER (Figure III.22).

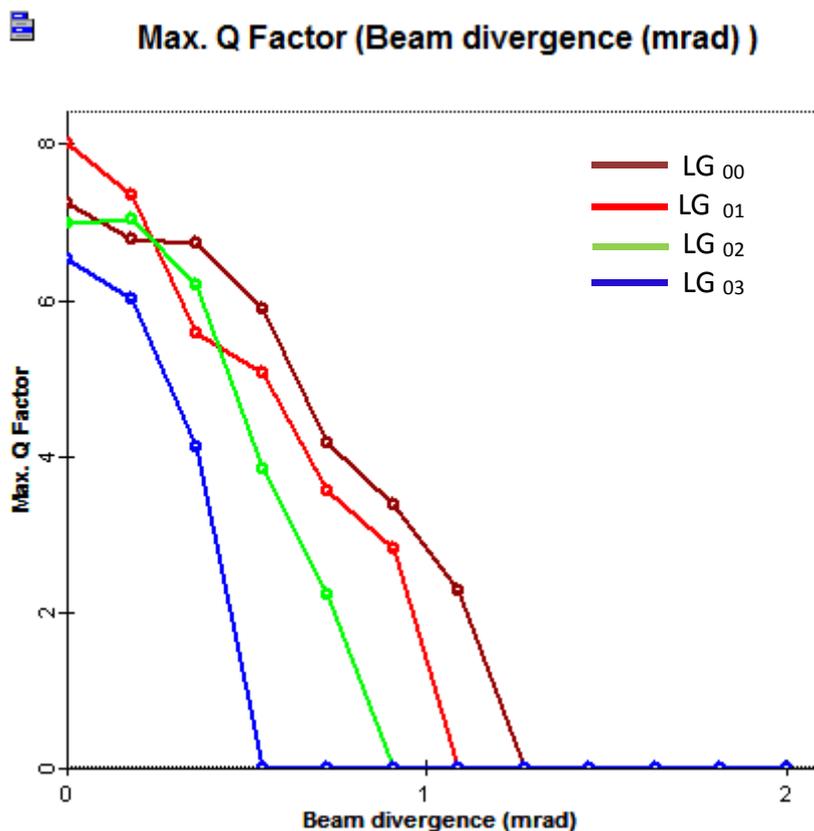


Figure III.21 : Variation de facteur Q en fonction de la divergence du faisceau laser

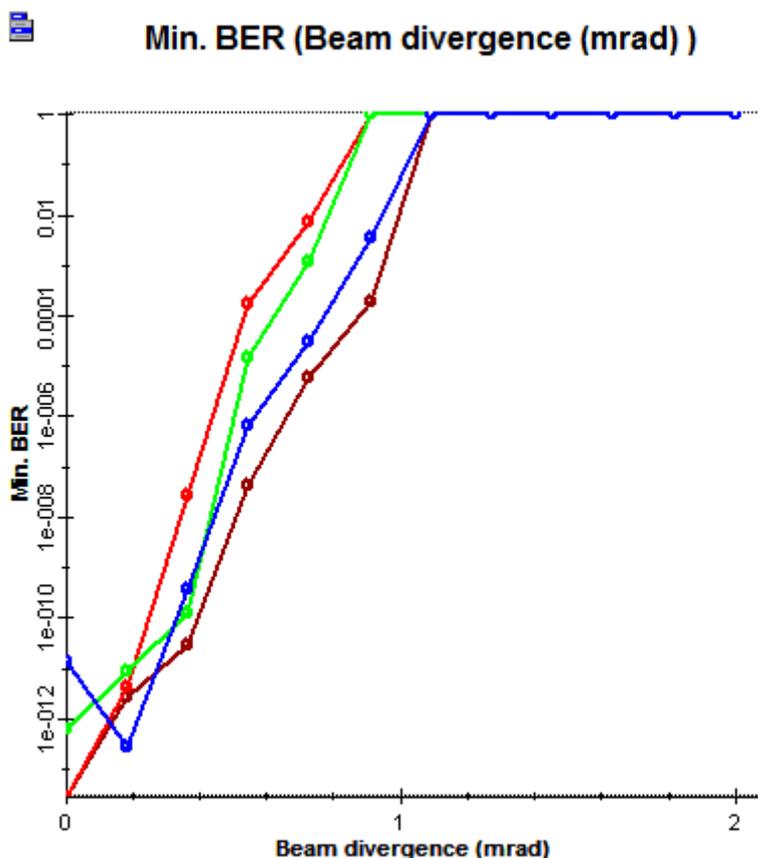


Figure III.22 : Variation du BER en fonction de la divergence du faisceau laser

III.5.3.4 Effet de la variation du diamètre de l'ouverture du récepteur FSO

La figure III.23 suivante illustre les valeurs de facteur Q en fonction du diamètre d'ouverture d'un récepteur FSO, avec un format de modulation NRZ à 12 km, et un diamètre de l'ouverture du récepteur FSO varie de de 5 cm à 20 cm.

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté, si on augmente le diamètre de l'ouverture du récepteur FSO, le facteur Q augmente aussi et vice versa, car l'augmentation le diamètre de l'ouverture du récepteur signifie plus de puissance du signal optique est reçu. D'après la comparaison des performances des différents canaux spatiaux en fonction de l'augmentation du diamètre d'ouverture d'un récepteur, on peut voir que le facteur Q est élevé ($Q = 7$) pour les canaux LG_{00} et LG_{01} qui sont les plus robustes et est faible ($Q = 5$) pour le canal LG_{03} qui est le plus influé à cause de la présence des lobes secondaire. D'après les résultats de la figure III.23, on observe que tous les canaux sont transportés de manière fiable jusqu'à une portée FSO de 12 km avec un diamètre de l'ouverture du récepteur de 20 cm, sinon, les performances du signal se dégradent. Ces résultats sont confirmés aux résultats obtenus de BER (Figure III.24).

III.23 Max. Q Factor (Receiver aperture diameter (cm))

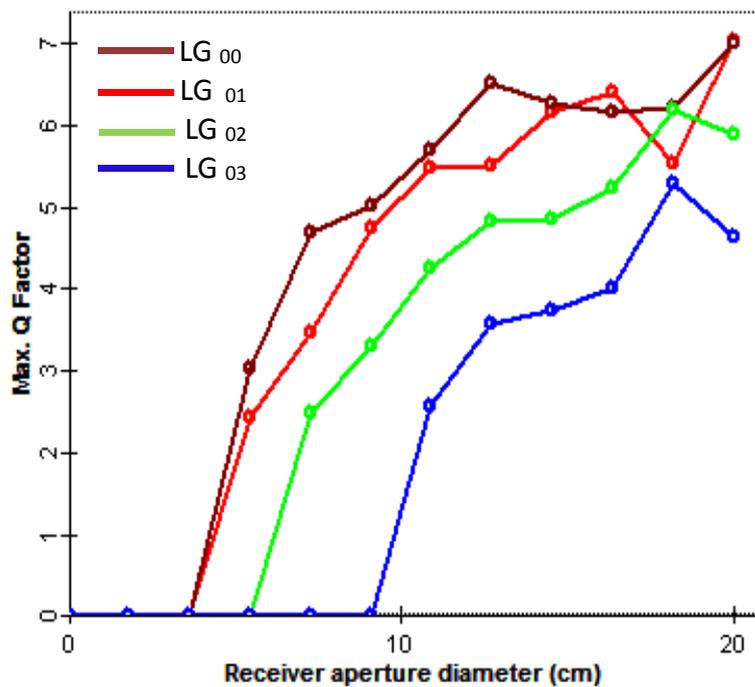


Figure III.23 : Variation de facteur Q en fonction de l'ouverture de récepteur

III.24 Min. BER (Receiver aperture diameter (cm))

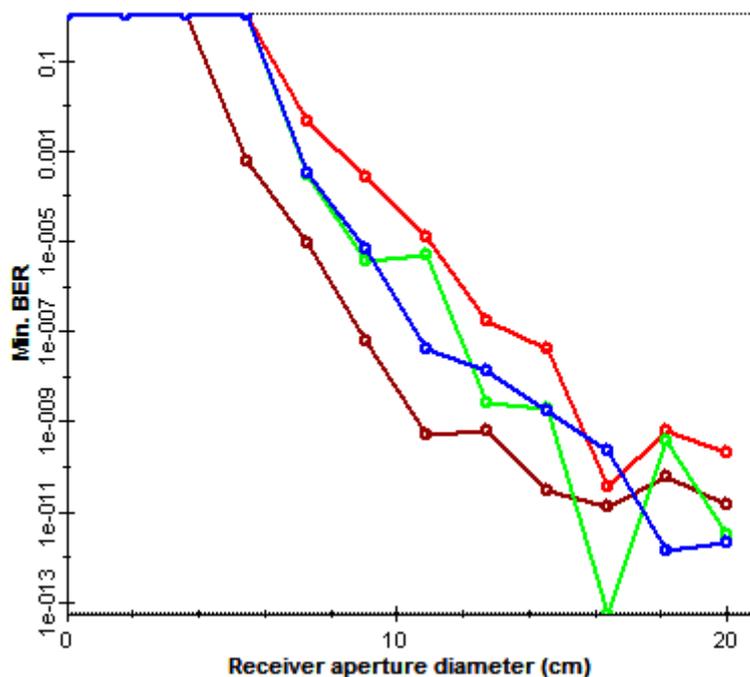


Figure III.24 : Variation de BER en fonction de diamètre de récepteur

III.5.3.5 Effet de la variation de débit de transmission d'une liaison SDM/FSO

Les figures suivantes montrent la variation de facteur Q en fonction de la distance pour l'environnement très clair pour différentes valeurs de débit binaire : $20 \cdot 10^9$ bit /s, et $10 \cdot 10^9$ bit /s, respectivement.

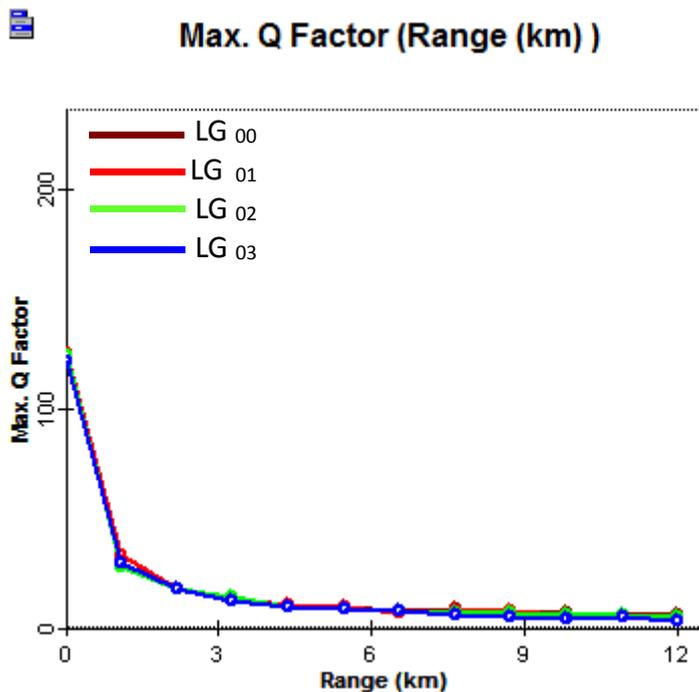


Figure III.25 : Variation de facteur Q en fonction de la distance avec un débit 20 Gbps

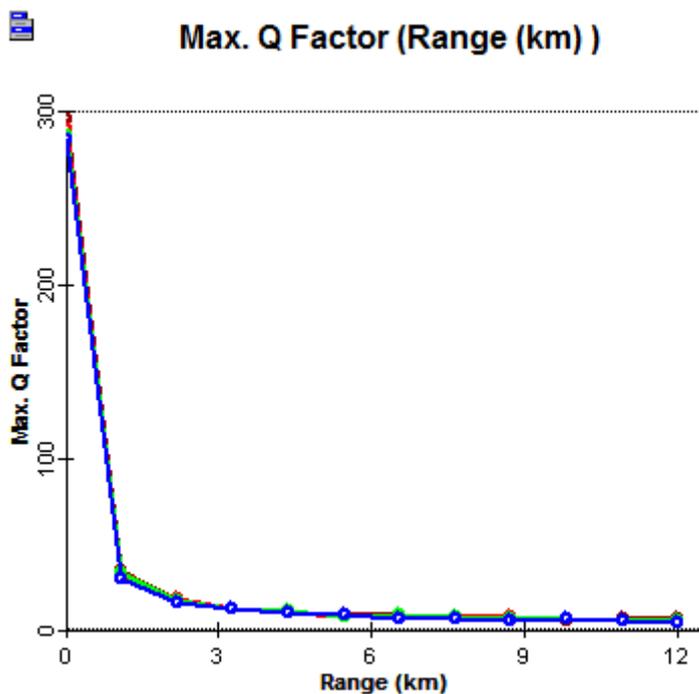


Figure III.26 : Variation de facteur Q en fonction de la distance avec un débit 10 Gbps

D'après les résultats montrés dans la figure III.25 et III.26, nous avons constaté que lorsque le débit de données augmente, le facteur Q de transmission diminue. Comme dans tous les réseaux de télécommunication, le facteur de qualité est une grandeur inversement proportionnelle liée à la distance de la liaison FSO et le débit de données de chaque canal. Les résultats indiquent que le système proposé SDM/FSO peut atteindre avec succès une distance de liaison de 12 Km à un débit de 20 Gbps à un facteur $Q = 10$. Il est clair qu'à une plus courte distance de liaison, par exemple, à 1 Km, le Q peut atteindre à environ 35, ce qui est suffisant. Tous les modes (canaux) sont transportés de manière fiable jusqu'à une portée FSO de 12 km indépendamment de la valeur du débit binaire utilisé.

III.5.3.6 Effet de nombre des modes (nombre des canaux) sur une liaison SDM/FSO

Dans cette partie on va augmenter le nombre des modes à huit. La distribution d'intensité selon une direction (x ou y), pour les huit modes LG, sont montrés dans la figure III.27. La forme spatiale du faisceau laser est donnée par la superposition des huit modes générés comme illustrée dans la figure (III.28).

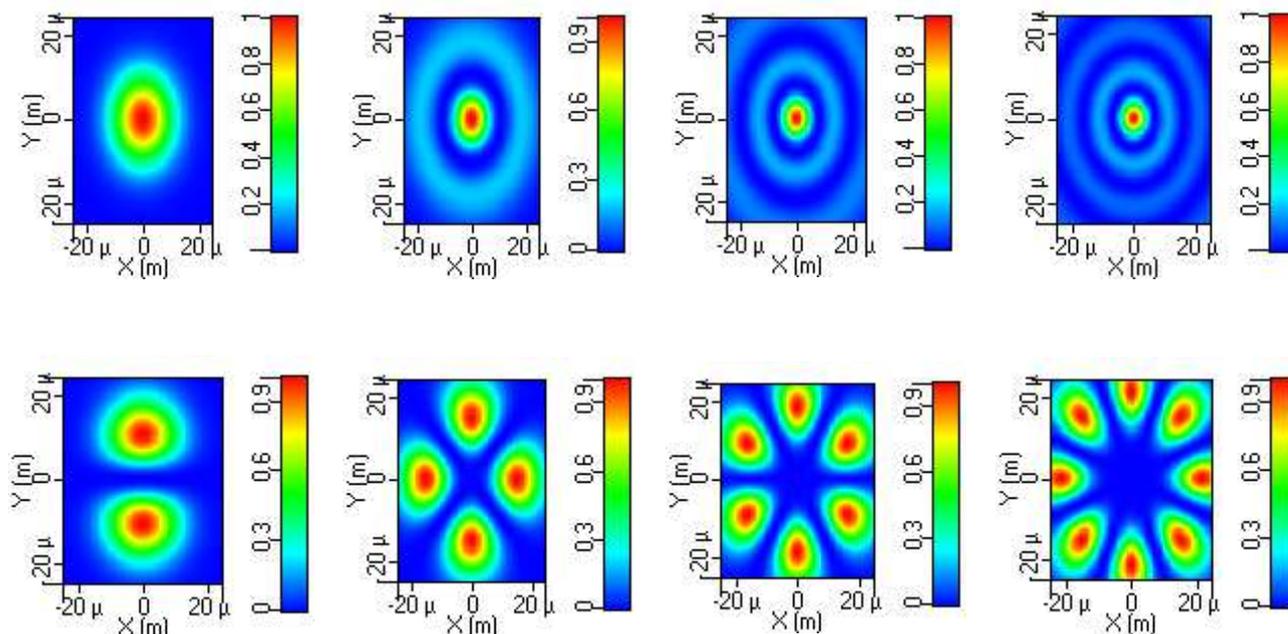


Figure III.27 : La distribution d'intensité selon une direction (x ou y), pour les huit modes LG (LG₀₀, LG₀₁, LG₀₂, LG₀₃, LG₁₁, LG₁₂, LG₁₃, et LG₁₄), de gauche à droite, respectivement.)

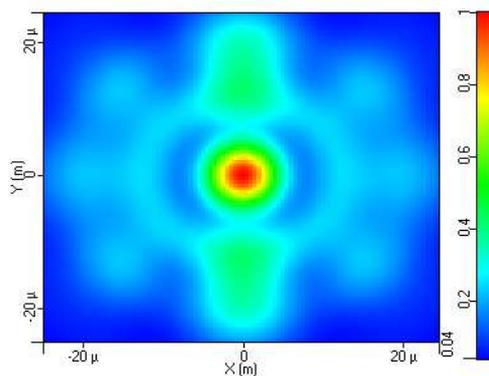


Figure III.28 : La forme spatiale du faisceau laser émis

L'objectif de cette partie est de vérifier l'influence du nombre des modes (nombre des canaux) sur les performances du système SDM/FSO. Dans les simulations, les conditions météorologiques sont spécifiées par la valeur de l'atténuation pour un temps très clair, et la distance du canal FSO est de 12 km. La Figure III.29 montre la variation de facteur Q en fonction de la distance pour 8 modes (8 canaux). À partir des résultats obtenus, nous remarquons que le facteur Q des quatre premiers modes ($Q > 10$) est élevé que ceux des quatre autres modes ($Q = 6$) à une distance de 5 Km. Cette différence dans la valeur de Q indique également une meilleure réception du signal des canaux des quatre premiers modes du système SDM/FSO. En peut conclure ainsi, que la portée d'une liaison FSO est limitée par le nombre des modes (canaux).

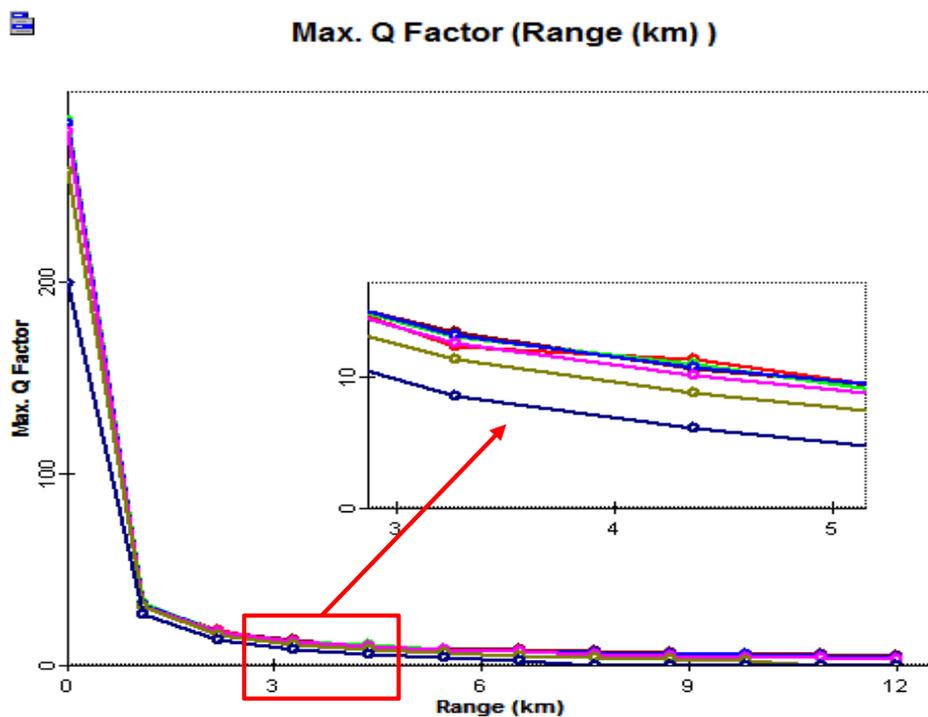


Figure III.29 : Variation de facteur Q en fonction de la distance pour 8 modes (8 canaux)

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus lors de l'étude des performances d'un système SDM/FSO. Le système proposé à $\lambda = 2 \mu\text{m}$, est basé sur le multiplexage SDM par répartition en mode (MDM), où les modes spatiaux sont utilisés comme canaux d'information transportant des flux de données indépendants. Notre étude a montré que les modes Laguerre-Gaussien (LG), sont les modes les plus préférés d'utilisés dans la FSO. Cette étude a pris en compte l'effet de différents paramètres tels que : l'atténuation géométrique, la distance le diamètre du récepteur FSO, la divergence, le débit binaire, et le nombre des modes. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la distance de transmission maximale dans un système de communication SDM/FSO augmente avec le diamètre du récepteur et la puissance d'émission. Cependant, il diminue avec l'augmentation du débit de données, du facteur d'atténuation géométrique, de la divergence du faisceau et du nombre des modes.



Conclusion générale

Conclusion générale

Les transmissions optique en espace libre FSO offrent aujourd'hui l'opportunité des communications à haut débit dans des secteurs encombrés. Connaître plus finement le canal atmosphérique urbain sous toutes conditions météorologiques est donc nécessaire afin d'apporter les solutions pour fiabiliser ce type de liaison. Concernant les effets des aérosols et ceux des brouillards, leurs réductions passent, entre autres, par le choix de la longueur d'onde de la transmission qui présente un minimum d'atténuation en leur présence. Ainsi, dans ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement à l'utilisation de la longueur d'onde $2 \mu\text{m}$ dans la liaison FSO.

Le besoin en largeur de bande se développe plus rapidement que l'infrastructure des réseaux créant de ce fait, un étranglement entre les réseaux à haut débit (demandé par l'utilisateur) et le backbone des réseaux de télécommunications a introduit les techniques de répartition spatiale, telles que la SDM qui représente une des solutions possibles pour le partage des ressources dans les réseaux optiques avec une portée maximal. L'objectif de notre travail est concerné l'évaluation des performances d'une liaison FSO avec la technique SDM (SDM/FSO) en utilisons un seul faisceau lumineux à la longueur d'onde $2 \mu\text{m}$. La technique SDM est basé sur la répartition en mode, où les modes spatiaux sont utilisés comme canaux d'information transportant des flux de données indépendants. Notre étude a montré que les modes Laguerre-Gaussien (LG), sont les modes les plus préférés d'utilisés dans le système SDM/FSO proposé.

Dans la première partie de ce mémoire, nous avons introduit le fonctionnement de la technologie FSO, son principe de fonctionnement et les différents phénomènes atmosphériques qui affectent le faisceau laser lors de son propagation. Nous avons rapporté également la technique de multiplexage spatiale SDM comme une technologie essentielle pour répondre aux futures demandes de trafic. Nous avons aussi détaillés le concept des modes, notamment, les modes Laguerre-Gaussien, Hermite-Gaussien et les modes polarisé linéairement qui sont les modes les plus préférés d'utilisés dans la communication optique.

Dans la deuxième partie, nous avons montré les résultats de la simulation et la conception d'une liaison SDM/FSO à la longueur d'onde $2 \mu\text{m}$, utilisons le logiciel OptiSystem. Nous avons tracé le facteur de transmission (Q factor), et le taux d'erreur binaire (BER) en fonction de différents paramètres de la liaison SDM/FSO et pour différentes situations météorologiques. En plus, l'estimation de la portée maximale à partir d'un Q et un BER

acceptable a été effectuée. Nous avons trouvé que la portée du système de communication SDM/FSO augmente avec le diamètre du récepteur et la puissance d'émission. Cependant, il diminue avec l'augmentation du débit de données, de l'atténuation géométrique, de la divergence du faisceau et du nombre des modes.

Dans l'ensemble, nous pouvons dire que ce travail nous permet de valider les connaissances acquises lors de notre formation, et grâce au travail en cours, nous sommes en mesure d'atteindre nos objectifs. Nous espérons que nos travaux serviront de base à une série d'améliorations que nous ne pouvons pas apporter en raison de contraintes de temps.

Bibliographies

- [1] MESRI Lamia, *‘Etude et analyse des performances du système FSOISAC-OCDMA sous l’effet de mauvaises conditions météorologiques’*, Thèse de doctorat université DJILLALI LIABES de Sidi- Bel-Abbes, 2019
- [2] MAHER Al Naboulsi, *‘Contribution à l’étude des liaisons optiques atmosphériques : propagation, disponibilité et fiabilité...’*, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2005
- [3] ILUNGA Kashama Oné, *‘ Le faisceau optique atmosphérique’*, Mini projet de télécommunication, Université de Lubumbashi , 2018 .
- [4] ROUISSAT. Mehdi, *‘ Etude et Modélisation d’une Liaison Optique Sans Fil’* , Thèse de doctorat l’université de Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2013.
- [5] BENARBIA Khalida , *‘Etude des performances d’un système de communication optique dans l’espace libre (FSO) en utilisant la technologie DWDM’* , mémoire de master Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen, 2017
- [6] RINGAR. Octave, *‘Utilisation des techniques avancées d’Emission/Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande’* , Thèse de doctorat de l’université de Limoges-France ,2015
- [7] SAUVAGE. Chloé , *‘Impact de l’environnement atmosphérique sur les liaisons optiques sans fil pour la ville du futur’* , Thèse de doctorat de l’Institut Polytechnique de Paris-France, 2020.
- [8] BEN AHMED Firas, KANOUN Bilel , *‘Analyse des performances d’une communication optique en espace libre’* , Rapport de projet, Ecole supérieure des communications de Tunis , 2015.
- [9] RECOMMANDATION UIT-R P.1814
- [10] DJERRAD. Mokhtar - SAHRAOUI. Mahmoud Aymen , *‘Etude et Evaluation des performances d’un système de communication SAC-OCDMA dans les liaisons’*, mémoire de master Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj,2021
- [11] FABIA Raharimanitra, *‘contribution à l’étude des architectures basées sur le multiplexage en temps et en longueur d’onde dans le réseau d’accès, permettant la*

migration vers la nouvelle génération de pon (ng-pon) à 10 gbit/s, Thèse de Doctorat, Université européenne de Bretagne, 2013.

[12] ZOUINE Younes, *'Contribution Par La Simulation Systeme A L'etude Des Contraintes Des Composants Optoelectroniques Sur La Transmission Optique Utilisant La Technique Cdma'*, Limoges: Universite De Limoges, 2005.

[13] BENCHANA Mohamed Amin, *'contrôle de mode spatial dans les fibres pour les communications optiques à haut débit'*, mémoire de master, université 8 mais 1945 Guelma, 2016.

[14] AL-DAWOODI Aras, et al, *'Investigation of 8*5 Gb/s mode division multiolixing-FSO system under different weather condition'*, Journal of Engineering Science and Technology Vol. 14, No. 2, pp 674 – 681, (2019).

[15] FRIDATH Bana BIO NIGAN, *'Revue et analyse des technologies des futures genertion de reseaux optiques sous-marin'*, mémoire de master, Université d'Abomey-Calavi, Godomey-Bénin, 2019

[16] Dr. Rüdiger Paschotta, *'Hermite-Gaussian modes, explained by RP Photonics Encyclopedia; Gauss-Hermite, beams, Hermite polynomial, mode family'*, RP Photonics logo Encyclopedia.04

[17] PAMPALONI Francesco, ENDERLEIN Jörg, *'Gaussian, Hermite-Gaussian, and Laguerre- Gaussian beams: A primer'*

[18] BERROUANE Massyl *'Etude des modes Laguerre-Gauss d'un r'esonateur optique'*, mémoire de master Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2017.

[19] GENEVAUX Philippe. *'Le multiplexage de mode spatial pour augmenter le débit dans les fibres optiques'*, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, 2016. Français. 2016

[20] OURFELLA El Bahdja, *'Etude des dynamiques spatiotemporelles non linéaires dans les fibres multimodes'*, mémoire de master Université 08 mais 1945, Guelma,, 2021.

[21] HARICHANE Yassine, BENKRAOUDA Ilyas, *'Étude et évaluation des performances d'un système de communication sans fil optique en espace libre (FSO)'*, mémoire de master Université Hassiba Ben Bouali-Chlef, 2019.

Liste des Acronymes

A

APD : Avalanche Photodiode

B

BER : Bit Error Rate

C

CDMA Code Division Multiplexing

D

DEL Diode Electroluminescent

DL Diode Laser.

F

FSO Free Space Optics

H

HG le mode Hermite-Gaussien

I

IM Modulation d'Intensité

L

LED Light-Emitting Diode

LG le mode Laguerre –Gaussien

LOA Liaisons Optiques dans l'Atmosphère

LP le mode Polarisé Linéairement

M

MDM Mode Division Multiplexing

N

NRZ Non Return to Zero

O

OCDMA Optical Code Division Multiplexing

P

PIN Positive Intrinsic Negative Photodiodes

S

SNR
SDM
S-MUX
S-DMUX

Signal-to-Noise **R**atio.
Space **D**ivision **M**ultiplexing
Multiplexeur **S**patial du mode
Démultiplexeurs **S**patial du mode

T
TDM

Time **D**ivision **M**ultiple

W
WDM

Wavelength **D**ivision **M**ultiplexing