

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

**Faculté des Sciences et de la technologie**

**Département d'Electronique**

# Mémoire

*Présenté pour obtenir*

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : Electronique des systèmes Embarqués

Par

➤ **DJERRAD MOKHTAR**

➤ **SAHRAOUI MAHMOUD AYMEN**

*Intitulé*

## ETUDE ET EVALUATION DES PERFORMANCES D'UN SYSTEME DE COMMUNICATION SAC-OCDMA DANS LES LIAISONS FSO

*Evalué le : 12/09/2021*

*Par la commission d'évaluation composée de\* :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>TALBI Mohamed Lamin</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>HACINI Latifa</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>MESSALI Zoubeida</i>	<i>Pr</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2020/2021*

\* Conformément à :

- L'arrêté n°055 du 21 janvier 2021 Fixant dispositions exceptionnelles autorisées en matière d'organisation et gestion pédagogique, de l'évaluation et de la progression des étudiants, durant la période COVID-19 au titre de l'année universitaire 2020-2021 ;
- Procès-verbal de la réunion de l'équipe du domaine des Sciences et Technologies du mois de Mai 2021.

## *Remerciements*

*Nous remercions 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.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur Dr. L.HACINI qui a bien fourni des efforts pour nous donner toutes les informations, nous avons profité de son savoir et ses précieux conseils. Nous tenons à remercier également les membres du jury qui ont fait l'honneur d'examiner ce travail et d'apporter leurs réflexions et suggestions scientifiques.*

*Nos remerciements vont aussi à nos familles et amis qui nous ont prodigué conseils et encouragements.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Ma chère mère : qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, sa bienveillance et ses sacrifices.*

*Mon cher père : pour m'avoir toujours soutenu et encouragé à aller de l'avant.*

*J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi,  
Santé et longue vie à vous.*

*Mon cher frère et ma sœur, merci pour votre appui et soutien moral permanents, avec toute mon affection.*

*Toute ma famille paternelle et maternelle, tous mes amis, et tous ceux qui ont cru en moi.*

*S. AYMEN*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Ma chère mère : qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, sa bienveillance et ses sacrifices.*

*Mon cher père : pour m'avoir toujours soutenu et encouragé à aller de l'avant.*

*J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi,*

*Santé et longue vie à vous.*

*Mon cher frère et ma sœur, merci pour votre appui et soutien moral permanents, avec toute mon affection.*

*Toute ma famille paternelle et maternelle, tous mes amis, et tous ceux qui ont cru en moi.*

*D.Mokhtar*

# Tables des matières

Remerciement.....	i
Dédicaces .....	ii
Tables des matières.....	iv
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	vii
Introduction générale.....	1

## Chapitre 1 : Les systèmes de communication optique en espace libre

1.1 INTRODUCTION .....	2
1.2 HISTORIQUE.....	2
1.3 CHAÎNE DE TRANSMISSION OPTIQUE EN ESPACE LIBRE (FSO).....	2
1.3.1 Émetteur.....	3
1.3.1.1 les sources optiques.....	3
1.3.1.2 Techniques de modulation.....	5
1.3.1.3 Amplificateurs optiques.....	7
1.3.3 Canal de transmission .....	9
1.3.4 Récepteur.....	10
1.4 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES SYSTEMES FSO.....	11
1.5 LES APPLICATIONS DES SYSTEMES FSO.....	12
1.6 LES SOURCES D'ATTENUATION EN FSO.....	12
1.7 CONCLUSION.....	14

## Chapitre 2 : LES SYSTEMES SAC-OCDMA

2.1 INTRODUCTION .....	15
2.2 SYSTEMES SAC-OCDMA.....	15
2.2.1 Encodage d'un signal SAC-OCDMA.....	15
2.2.2 Décodage d'un signal SAC-OCDMA.....	18

2.3 LES CODES EN SAC-OCDMA.....	21
2.3.1 Les paramètres utilisés dans les codes.....	21
2.3.2 Les différents codes disponibles .....	21
2.4 BRUIT EN SAC-OCDMA.....	22
2.4.1 Bruit thermique.....	22
2.4.2 Le bruit de grenaille (shot noise).....	23
2.4.3 Bruit d'intensité induit par la phase PIIN.....	23
2.5 LE TAUX D'ERREURS BINAIRE .....	23
2.6 CONCLUSION.....	26

### **Chapitre 3 : Résultats et simulations**

3.1 INTRODUCTION.....	27
3.2 LE CODE LSC .....	27
3.3 CALCUL DU BER POUR LE CODE LSC DANS UN CANAL FSO.....	29
3.4 ETUDE DES PERFORMANCES DU SYSTEME.....	30
3.5 SIMULATIONS PAR OPTISYSTEM.....	40
3.5.1 Présentation du logiciel OptiSystem .....	40
3.5.2 Le schéma bloc de simulation du système SAC-OCDMA sur un Canal FSO.....	41
3.5.3 Paramètres de simulation.....	44
3.5.4 Critères d'évaluation des performances .....	46
3.5.5 Génération du code LSC .....	46
3.5.6 Résultats et discussions.....	47
3.6 CONCLUSION.....	51

<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>53</b>
----------------------------------	-----------

## *Liste des figures*

<b>Figure1.1:</b>	Schéma de la modulation directe.....	5
<b>Figure1.2:</b>	Schéma de la modulation externe.....	6
<b>Figure1.3:</b>	Principe de fonctionnement du modulateur Mach-Zehnder intégré.....	7
<b>Figure1.4:</b>	Structure de base d'un amplificateur optique à semi-conducteurs. L, d et w sont respectivement la longueur, l'épaisseur et la largeur de la zone active....	8
<b>Figure1.5:</b>	Applications de base d'un SOA dans les systèmes de télécommunications optiques selon sa position dans la liaison.....	9
<b>Figure1.6:</b>	Coupe transversale d'une diode PIN.....	11
<b>Figure2.1:</b>	Encodage SAC-OCDMA.....	16
<b>Figure2.2:</b>	Encodage SAC-OCDMA avec un masque d'amplitude.....	16
<b>Figure2.3:</b>	AC-OCDMA à base d'AWG.....	17
<b>Figure2.4:</b>	Encodage SAC-OCDMA avec réseaux de Bragg. ....	17
<b>Figure2.5:</b>	AC-OCDMA avec un démultiplexeur et deux multiplexeurs.....	18
<b>Figure2.6:</b>	Principe de la détection complémentaire.....	19
<b>Figure2.7:</b>	Principe de la détection directe.....	20
<b>Figure2.8:</b>	Principe de la détection AND.....	20
<b>Figure3.1:</b>	Puissance reçue en fonction de la distance.....	32
<b>Figure3.2:</b>	BER en en fonction de la distance pour différents cas de brouillard (a)Débit=622Mbps(b)Débit=1Gbps.....	33
<b>Figure3.3:</b>	BER en fonction de la distance pour différentes valeurs de débit binaire.....	35
<b>Figure3.4:</b>	BER en fonction de la distance pour différent angles de divergence.....	36
<b>Figure3.5:</b>	BER en fonction de la distance, pour différent valeurs de diamètre de l'émetteur.....	37
<b>Figure3.6:</b>	BER en fonction de la distance pour différentes valeur du diamètre de récepteur.....	38
<b>Figure3.7:</b>	BER en fonction de la distance pour différent nombre d'utilisateurs.....	39
<b>Figure3.8:</b>	BER en fonction de la puissance émise.....	40
<b>Figure3.9:</b>	Schéma bloc du système SAC-OCDMA sous un canal FSO.....	41
<b>Figure3.10:</b>	Partie émission pour un seul utilisateur dans le system SAC-OCDMA.....	42
<b>Figure3.11:</b>	Inscription des longueurs d'onde dans le WDM Mux pour l'utilisateur 1.....	42
<b>Figure3.12:</b>	Configuration du canal FSO.....	43
<b>Figure3.13:</b>	Le module de détection pour un seul utilisateur.....	44
<b>Figure3.14:</b>	Paramètres globaux utilisés sous OptiSystem.....	45
<b>Figure3.15:</b>	Diagrammes de l'œil et le BER du premier utilisateur pour différents débits (a)622Mbits/s, (b)1Gbits/s.....	47

<b>Figure3.16:</b> Diagrammes de l'œil et le BER du premier utilisateur pour différent angles de divergence (a)0.25 mrad, (b)1 mrad.....	47
<b>Figure3.17:</b> Diagrammes de l'œil et le BER du premier utilisateur pour différent diamètres de l'émetteur(a)10cm, (b)70 cm.....	48
<b>Figure3.18:</b> Diagrammes de l'œil et le BER du premier utilisateur pour différents diamètres du récepteur (a) 10 cm, (b)2 cm.....	48
<b>Figure3.19:</b> Diagrammes de l'œil et le BER du premier utilisateur pour différentes distances du canal (a)1500m, (b)3000m.....	48
<b>Figure3.20:</b> Schéma bloc du système SAC-OCDMA sous un canal FSO en utilisant un amplificateur EDFA.....	49
<b>Figure3.21:</b> Diagrammes de l'œil et le BER du système pour un débit 1 GHz et une distance de 2 Km (a) sans EDFA, (b) avec EDFA.....	50
<b>Figure3.22:</b> Diagrammes de l'œil et le BER du système pour un débit 1 GHz et une distance de 2 Km pour différentes d'atténuation du brouillard. (a)Brouillard dense, (b) Brouillard modéré, (c) Brume, (d) Temps clair.....	51

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1.1 :</b> Tableau comparatif entre la LED et le LASER.....	4
<b>Tableau 3.1 :</b> Paramètres utilisés dans l'analyse numérique par Matlab.....	31
<b>Tableau 3.2 :</b> Atténuation des différents types du brouillard.....	32
<b>Tableau 3.3 :</b> Portée max pour différents types du brouillard.....	34
<b>Tableau 3.4 :</b> Code LSC pour trois utilisateurs avec $w = 3$ et les longueurs d'onde correspondantes.....	46



# **Introduction générale**

## INTRODUCTION GENERALE

Les liaisons optiques atmosphériques sont aujourd'hui une technologie bien établie capable de transmettre des informations à très grande largeur de bande en utilisant un faisceau lumineux d'un point à un autre dans l'atmosphère. Cependant, ces liaisons sont affectées par les conditions atmosphériques comme le brouillard qui contribuent à une atténuation importante de la puissance des faisceaux lumineux.

Le but de notre travail consiste à étudier et évaluer l'impact de différentes conditions météorologiques sur les performances des systèmes SAC-OCDMA (Spectral Amplitude Coding-Optical Code Division Multiple Access), utilisant le code LSC (Latin Square Code), dans un canal FSO (Fres Space Optics). L'étude consiste à déterminer pour chaque cas, la distance maximale entre l'émetteur et le récepteur FSO à un BER acceptable de  $10^{-9}$ . Nous avons tracé plusieurs courbes de BER en fonction de différents paramètres affectant les performances de la liaison.

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre introduit une présentation générale de la liaison de transmission FSO, en donnant la définition des différents types de sources lumineuses, la technologie de modulation, les différents types de récepteurs optiques, ainsi qu'une description du canal FSO avec ces avantages et ces limites.

Le deuxième chapitre présente le principe de fonctionnement de la technologie SAC-OCDMA en donnant, les techniques de codage et de décodage d'amplitude du spectre, ainsi que les différents codes et détecteurs utilisés. Il présente également les divers bruits qui limitent les performances du système.

Le troisième chapitre présente l'étude du système SAC-OCDMA dans un canal FSO. Pour cela, deux logiciels ont été utilisés, Matlab pour l'étude numérique et l'Optisystem pour la simulation. En effet, l'évaluation du BER du système à montrer qu'il dépend des différents types de bruit, de la portée, des paramètres du code utilisé et de la puissance reçue au niveau du récepteur qui dépend principalement des paramètres d'atténuation des différentes conditions météorologiques.

Le manuscrit est terminé par une conclusion générale résumant l'ensemble du travail effectué.

# **CHAPITRE01**

**Les systèmes de communication  
optique en espace libre**

## **1.1. INTRODUCTION**

La technologie de communication optique a été principalement conçue pour transmettre des données et des informations à des vitesses très élevées.

Dans ce chapitre, nous allons brièvement présenter les différents composants optoélectroniques qui constituent la liaison optique en espace libre. Pour chacun de ces éléments constitutifs, nous décrivons le rôle et le fonctionnement. Nous commençons, par la présentation de l'émetteur (laser, modulateur), nous abordons par la suite, les principales caractéristiques du récepteur. Enfin, nous présentons le concept de la technologie FSO, ainsi que ses avantages et ses limites.

## **1.2. HISTORIQUE**

Les communications optiques, sous des formes diverses, ont été utilisées depuis des milliers d'années. Les Grecs de l'Antiquité brillant leurs boucliers pour envoyer des signaux pendant la bataille. Dans l'ère moderne, les sémaphores et télégraphes solaires sans fil appelé héliographes ont été élaborés, en utilisant des signaux codés pour communiquer avec leurs destinataires. En 1880, l'allemand Graham Bell parvint à transmettre de la voix grâce à un appareil appelé "photophone", utilisant un faisceau lumineux comme moyen de transport. C'est ainsi qu'en juin de cette même année, il réussit la première transmission téléphonique mondiale sans fil, entre deux immeubles séparés de 213 mètres. Néanmoins, ce fut finalement le téléphonique filaire qui a retenu l'attention et son invention de photophone fut mis de côté durant plusieurs dizaines d'années. Ce système (c.a.d le photophone) resurgit durant la Seconde Guerre Mondiale, avec le luminophore de Carl Zeiss Jena, qui a été utilisé pour la défense anti-aérienne. Mais c'est l'invention du laser dans les années 60 qui a remis au bout du jour cette technologie, particulièrement dans le domaine spatial [1].

## **1.3. CHAINE DE TRANSMISSION OPTIQUE EN ESPACE LIBRE (FSO)**

La transmission optique en espace libre (FSO) est une technologie récente qui nécessite une visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur pour transmettre des

données sans erreurs. Cette liaison utilise des technologies comparables à celles de la fibre optique mais, au lieu d'utiliser un canal filaire (fibre optique), les données prennent la voie de l'air à un très haut débit, pouvant dépasser 1 gigabit par seconde (Gbps). Le signal est numérisé et transmis par un rayon de lumière infrarouge dans une ligne de visée précisée [1].

### **1.3.1. Émetteur optique**

L'émetteur optique est un dispositif composé de divers éléments (source optique, modulateur...). Il sert à délivrer un signal optique sur lequel sont inscrites les données qu'on désire envoyer au support de transmission [2]. Sa fonction est de convertir les impulsions électriques en signaux lumineux.

Les émetteurs optiques doivent posséder certaines conditions :

- Fonctionnement à température ambiante.
- Capacité de moduler la lumière émise à haute fréquence.
- Puissance d'émission importante.
- Grande durée de vie.

#### **1.3.1.1. Les sources optiques**

Les sources optiques sont des composants actifs dont la fonction fondamentale est de convertir une énergie électrique en une énergie optique. La nécessité d'utiliser des bandes de plus en plus larges impose le choix de sources optiques. Ces dernières peuvent être une diode laser (DL) ou bien une diode électroluminescente (LED) [2], ces deux sources sont réalisées à partir de jonction PN polarisée en direct, dont le principe d'émission est dû à la recombinaison des paires électron-trou.

##### **a) Les diodes électroluminescentes**

La diode LED (Light Emitting Diode) est une source incohérente et polychromatique, elle présente un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes [4]. Elle délivre une puissance optique de

plusieurs centaines de microwatts et offre des débits inférieures à 5Mbits/s sur fibre multimode.

**b) Les diodes lasers**

Une diode Laser est un composant optoélectronique à base de matériaux semi-conducteurs qui gère la lumière en se basant sur trois processus fondamentaux qui sont l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très grande distance, et elle est caractérisée par une faible largeur spectrale.

Les diodes laser sont utilisées dans les liaisons de communication optique en espace libre, car elles ont des fréquences plus élevées qui augmentent le taux de modulation, et leur faisceau peut couvrir des distances plus longues [3].

**c) La différence entre la diode LED et la diode Laser.**

Le tableau suivant résume les points de différence entre les deux types de diode.

<b>La diode LED</b>	<b>La diode LASER</b>
Les LED sont de petite taille, ont une durée de vie plus longue, sont fiables et nécessitent peu d'énergie.	Les LASER sont de plus grande taille, ont une durée de vie plus longue, sont moins fiables et nécessitent plus de puissance que les LED.
Génération de photon par émission spontanée.	Génération de photon par émission stimulée.
Les LED produisent un faisceau lumineux divergent et incohérent.	Le LASER produit un faisceau lumineux monochromatique et cohérent.
Leur réponse est rapide	Leur réponse est plus rapide que la LED

**Tableau 1.1.** Tableau comparatif entre la LED et le LASER

### 1.3.1.2. Techniques de modulation

La modulation est une fonction nécessaire pour transmettre les informations dans les systèmes optiques. Pour la réaliser, deux méthodes sont utilisées : la modulation directe et la modulation externe.

#### a) La modulation directe

La modulation directe est une technique simple et très peu coûteuse, mais elle présente aussi plusieurs inconvénients. Cette technique est très inefficace au-dessus de 2.5 Gb/s. Pour les hauts débits, le signal modulé directement subit une dégradation. En effet, la modulation directe conduit à un signal présentant une modulation parasite de fréquence appelée chirp. La modulation du courant induit une modulation de l'indice de réfraction dans le semi-conducteur et par conséquent une modulation de fréquence de la lumière émise.

La figure suivante représente le schéma de la modulation directe. Le générateur émet une séquence de données numériques (séries de 1 et 0) à un débit précis, traduisant l'information à transmettre. Le laser est alimenté à un circuit de modulation de courant qui permet de moduler la puissance du laser. La lumière modulée représente le signal à transmettre [5].

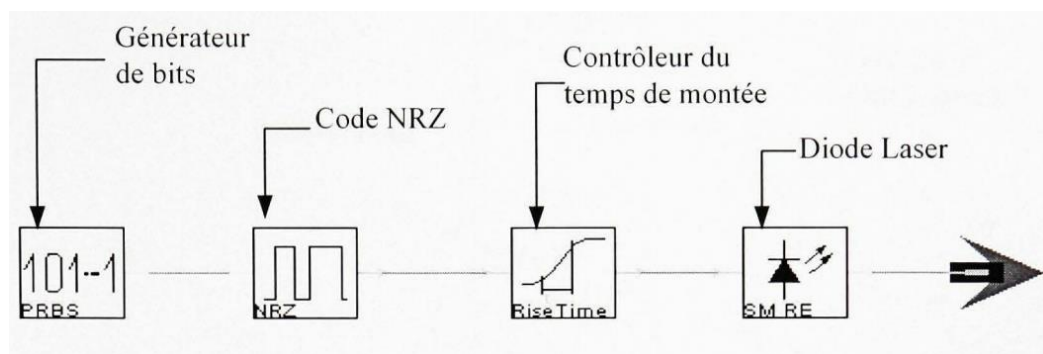
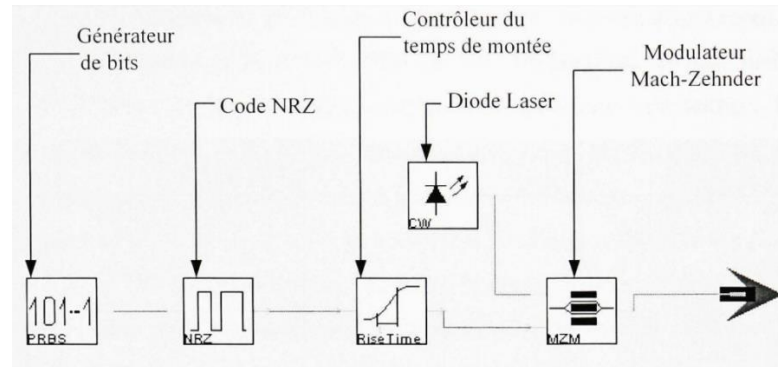


Figure 1.1 Schéma de la modulation directe.

#### b) La modulation externe

Contrairement à la modulation directe, la modulation externe est obtenue en modulant le faisceau lumineux à la sortie du laser opéré en courant continu, et non le

courant d'alimentation du laser. Ainsi le signal optique transmis est moins affecté par le phénomène de chirp. La figure suivante présente le schéma de la modulation externe [5].



**Figure1.2** Schéma de la modulation externe.

Dans les systèmes de communications optiques, plusieurs types de modulateurs sont utilisés. Nous présentons ici le modulateur de Mach-Zehnder et le modulateur à électro-absorption, les deux types de modulateur optique les plus utilisés dans les systèmes de transmission optique [5].

- **Le modulateur de Mach-Zehnder (MZM)**

Dans le modulateur Mach-Zehnder, le signal optique entrant est envoyé à deux chemins optiques différents, comme le montre la figure 1.3. L'application d'une tension à l'un des chemins optiques produit une variation d'indice de réfraction en fonction de la tension appliquée introduisant un déphasage dans le chemin de déplacement d'onde. Les deux chemins optiques se recombinent après une certaine distance, provoquant l'interférence des ondes optiques. Ce type d'agencement est connu sous le nom d'interféromètre. Les signaux individuels interfèrent de manière constructive ou destructive en fonction de leurs différences de phase relatives qui déterminent l'amplitude d'un signal optique de sortie [6].



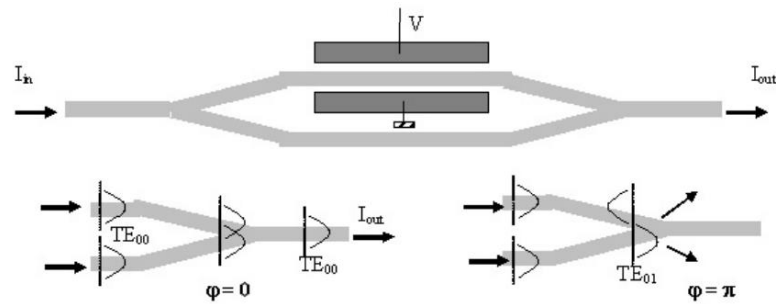


Figure 1.3 Principe de fonctionnement du modulateur Mach-Zehnder intégré

- **Le modulateur à électro-absorption**

Le matériau qui constitue le modulateur à électro-absorption devient absorbant lorsqu'il est soumis sous l'action d'un champ électrique. Un des avantages de ces modulateurs est leur petite taille. Dans les applications pour les réseaux métropolitains, ils peuvent être intégrés de façon monolithique à une diode laser fonctionnant en continu. Mais contrairement au modulateur de Mach-Zehnder, les modulateurs à électro-absorption génèrent de plus grandes pertes d'insertion (minimum 10 dB) [6].

### 1.3.2 Amplificateurs optiques

Afin d'éviter que l'information transmise ne soit noyée dans le bruit, il est important que la puissance qui arrive au récepteur soit suffisamment élevée. L'amplification optique est une solution idéale pour pallier à ce problème. Les amplificateurs optiques permettent non seulement de compenser les pertes, mais nous évitent d'utiliser les régénérateurs électroniques de signal qui sont une solution très coûteuse [4].

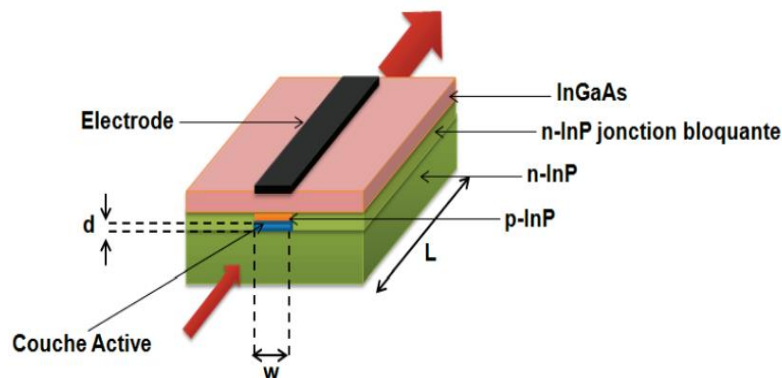
L'amplificateur optique repose sur le principe de l'émission stimulée. Lorsqu'un signal passe à travers un amplificateur, il est amplifié grâce à un apport externe d'énergie appelé pompage qui vient créer une inversion de population. Le pompage peut être réalisé à l'aide de photons ou d'électrons. Un photon incident provoque la recombinaison électron-trou et il y a naissance d'un deuxième photon de même

direction, de même phase et de même fréquence. Cette émission stimulée conduit à l'amplification du signal.

Plusieurs types d'amplificateurs optiques peuvent être utilisés dans les liaisons optiques [7].

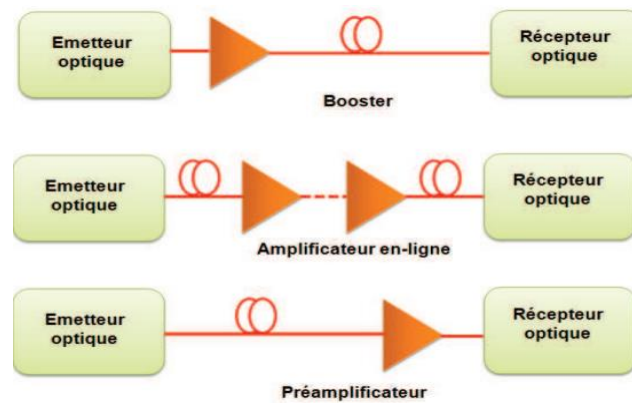
### 1.3.2.1. Amplificateur optique à semi-conducteur (SOA)

Un SOA est un dispositif optoélectronique qui peut, dans des conditions d'exploitation appropriées, amplifier un signal lumineux incident. Une structure de base d'un SOA est illustrée à la figure 1.4. Son élément principal est la région active qui fournit le gain optique lorsque l'amplificateur est pompé électriquement. Le pompage est nécessaire pour atteindre l'inversion de population et par conséquent l'émission stimulée. Un guide d'onde intégré est utilisé pour confiner l'onde du signal à la région active [7].



**Figure 1.4** : structure de base d'un amplificateur optique à semi-conducteurs. L, d et w sont respectivement la longueur, l'épaisseur et la largeur de la zone active.

Selon sa position dans la liaison, un SOA peut être utilisé comme amplificateur de puissance (booster amplifieur), pour augmenter la puissance du laser émetteur, comme amplificateur en ligne, pour compenser les pertes de transmission ou comme préamplificateur pour améliorer la sensibilité du récepteur. Ces applications sont présentées sur la figure suivante [7].



**Figure 1.5 :** Applications de base d'un SOA dans les systèmes de télécommunications optiques selon sa position dans la liaison.

### 1.3.2.2. Amplificateurs à fibre dopée (EDFA)

L'amplificateur à fibre dopée aux ions Erbium  $Er^{3+}$  (E.D.F.A. : Erbium Doped Fiber Amplifier) est considéré comme un dispositif clé dans tous les réseaux de télécommunication optiques. Il permet d'amplifier simultanément des longueurs d'ondes et ainsi compenser les pertes subies lors de la propagation. Un amplificateur EDFA est en général composé d'une fibre optique monomode dont le cœur est dopé aux ions  $Er^{3+}$ . Ces derniers sont pompés optiquement à l'aide d'une diode laser ( $980 \leq \lambda \leq 1480 \text{ nm}$ ) afin d'exciter les particules actives vers le niveau métastable, dans le souci de créer une inversion de population. Lorsque les photons du signal utile se propagent à travers cette portion du canal optique, les particules actives peuvent se désexciter en produisant des photons identiques en tout point de vu aux photons incidents ( $1520 \leq \lambda \leq 1570 \text{ nm}$ ) [7].

### 1.3.3 Canal de transmission

La liaison ici, est une liaison optique en espace libre (FSO) dont le canal de propagation est le milieu atmosphérique. C'est un milieu très complexe et dynamique pouvant affecter les caractéristiques du faisceau laser émis. Les liaisons FSO sont ainsi soumises à des contraintes pénalisantes imposées par le milieu de propagation atmosphérique qui ne constitue pas un milieu idéal en raison de la variation spatio-temporelle de ses caractéristiques physiques et de la diversité de ses constituants.

Ces contraintes entraînent une extinction du signal optique au cours de sa propagation et donc une limitation de la portée. L'extinction atmosphérique est causée par un certain nombre de phénomènes sélectifs en longueurs d'onde : l'absorption moléculaire caractérisée par une forte dépendance spectrale, la diffusion moléculaire (diffusion Rayleigh), l'extinction (absorption et diffusion) par les particules en suspension (aérosols), en précipitation (pluie, neige, etc.), et la turbulence atmosphérique due aux variations spatio-temporelles de l'indice de l'air (scintillations, fluctuation spatiale du faisceau...) [7].

#### **1.3.4. Récepteurs optiques**

De même que pour les modules d'émission, l'interface d'un module de réception est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation possible. Ce rôle est tenu par le photo-détecteur qui se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. La première propriété requise pour un photo-détecteur est la sensibilité à la longueur d'onde utilisée, la deuxième la rapidité et la troisième, l'apport minimum de bruit. Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photo-détecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser.

Le photo-détecteur est un semi-conducteur de jonction PN polarisée en inverse permet la conversion du signal optique reçu (les photons) en signal électrique par l'effet photoélectrique [3]. Les photodiodes peuvent être classées en deux catégories : celles qui n'ont aucun gain interne PN et PIN, et celles qui ont un gain interne Avalanche (APD).

##### **1.3.4.1. La photodiode PIN (Positive Intrinsic Négative)**

Ce sont également des dispositifs à semiconducteurs qui possèdent une région intrinsèque (faiblement dopée) prise en sandwich entre une région de type P et une région de type N (figure 1.6). Lorsqu'il est polarisé en inverse, ce composant émet un courant proportionnel à la puissance optique incidente. Parce qu'elles sont peu coûteuses, simples à utiliser et de performance satisfaisante, les PIN sont les plus utilisées [6].

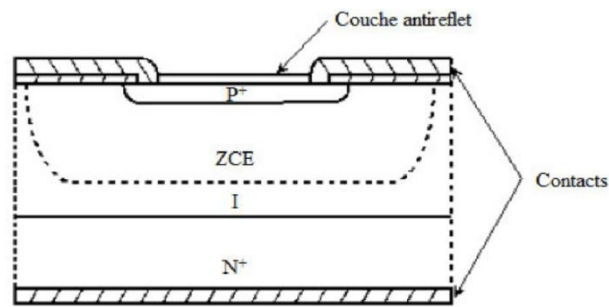


Figure 1.6 : Coupe transversale d'une diode PIN.

#### 1.3.4.2. La photodiode 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 [8].

La photodiode d'avalanche est une PIN dans laquelle est réalisée une amplification de puissance, cela permet d'extraire un signal électrique fort même pour une puissance lumineuse affaiblie. Les APD sont aussi utilisées grâce à leurs performances, leur gain important et leur réponse rapide, mais elles sont plus coûteuses, difficiles à utiliser et nécessitant une polarisation inverse très forte.

### 1.4. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES LIAISONS FSO

Pour certaines applications, les liaisons FSO offrent plusieurs avantages supplémentaires par rapport à ceux offerts par les liaisons fixes traditionnelles ou à ceux offerts par les liaisons à fibres optiques, mais elles présentent aussi certains inconvénients [1] :

#### 1.4.1. Les avantages

- Large bande ou débit de données élevé.
- Equipements petits et simples.
- Fonctionnement sans licence.
- Coût avantageux par rapport aux autres systèmes optiques.
- Flexibilité et rapidité d'installation et de déploiement.

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

#### **1.4.2. Les inconvénients**

- 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.
- La portée est limitée par les conditions météorologiques (pluie, brouillard, neige).
- Effet du rayonnement solaire.
- Dispersion du faisceau.
- Présence des obstructions physique entre l'émetteur et le récepteur.

### **1.5. LES APPLICATIONS DES SYSTEMES FSO**

Les systèmes FSO sont utilisés dans les applications suivantes [1] :

- Transmission optique satellitaire dans l'espace.
- 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.
- Liaison d'urgence : installation d'une liaison d'urgence en cas de panne d'une liaison.
- Réseau dense.

### **1.6. LES SOURCES D'ATTENUATION EN FSO**

#### **1.6.1 Atténuation atmosphérique**

Le canal atmosphérique est constitué de divers gaz et autres particules minuscules comme aérosols, poussière, fumée, etc., en suspension dans l'atmosphère. Le signal

transmis se dégrade donc en fonction de la quantité d'interférences qu'il rencontre. Cette perte de signal est connue sous le nom d'atténuation atmosphérique et résulte du fait que le signal est soit absorbé soit diffusé par plusieurs propriétés différentes de l'air.

L'atténuation atmosphérique est une partie de l'énergie des ondes électromagnétiques perdues lors de la propagation dans l'atmosphère. En général, l'atténuation est donnée par la loi de BEER [9] :

$$Att = \exp(-\beta * L)$$

Où :

- $Att$  : atténuation atmosphérique.
- $\beta$  : coefficient d'atténuation total:  $\beta = \beta_{abs} + \beta_{diffusion}$
- $L$  : distance entre récepteur et émetteur.
- $\beta_{abs}$ : coefficient d'absorption moléculaire de l'aérosol.
- $\beta_{diffusion}$ : coefficient de diffusion moléculaire de l'aérosol.

### 1.6.2 Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques dans le canal FSO peuvent être globalement classées en trois catégories, nommément temps clair, nuages et pluie. Des conditions météorologiques claires sont caractérisées par une longue visibilité et une atténuation relativement faible [9].

Temps nuageux les conditions vont de la brume ou du brouillard à de gros nuages et se caractérisent par de faibles visibilité, humidité élevée et forte atténuation. La pluie est caractérisée par la présence de gouttelettes de pluie de tailles variables, et elle peut produire des effets graves en fonction de taux de précipitations.

Il est très difficile de prévoir les performances des systèmes FSO en raison de la nature relativement imprévisible de l'atmosphère. Afin de faire des prévisions précises de la performance d'un système dans une certaine zone, il est nécessaire

de prendre des relevés météorologiques très précis dans la zone dans laquelle le système doit être utilisé pendant une période de temps prolongée [9].

### **1.6.3 Perte de divergence de faisceau**

Lorsque le faisceau optique se propage dans l'atmosphère, il se répand en raison de la diffraction. Il peut en résulter une situation dans laquelle l'ouverture du récepteur ne peut pas collecter une fraction du faisceau transmis et entraîner une perte de divergence de faisceau [9].

## **1.7. CONCLUSION**

Le but de notre travail est d'étudier un système de communication optique (SAC-OCDMA) sous un canal FSO, il était indispensable de présenter une synthèse des systèmes de transmission optique. Dans ce chapitre, nous avons décrit de façon générale les différents composants optoélectroniques qui peuvent être conçus pour un système de communication FSO à savoir : émetteur optique, canal optique atmosphérique, les amplificateurs et récepteur optique.



# **CHAPITRE 2**

**Les systèmes SAC-OCDMA**

## **2.1. INTRODUCTION**

Les systèmes d'accès multiple par répartition en code optique (OCDMA) ont joué un rôle important dans la communication optique en raison de leurs avantages. Le codage spectral d'amplitude (Spectral Amplitude Coding : SAC) est l'une des techniques développées pour les systèmes OCDMA qui ont fait l'objet d'une grande attention en raison de la réduction des interférences d'accès multiple (IAM), de la simplicité et de son faible coût de réalisation.

Dans ce chapitre, nous parlerons dans un premier temps des principes de base de la technique SAC-OCDMA : l'encodage et le décodage du signal. Ensuite, nous présenterons les deux catégories de familles de code en citons quelques exemples. Nous analyserons également les différents types de bruit présents dans ce genre de système. Enfin, nous présenterons la méthode de calcul du BER.

## **2.2. SYSTEMES SAC-OCDMA**

Dans la technique d'accès SAC-OCDMA (Spectral Amplitude Coding-Optical Code Division Multiple Access) chaque utilisateur a son propre code spectral (qui constitue sa signature ou son empreinte).

### **2.2.1 Encodage d'un signal SAC-OCDMA**

Le processus d'encodage affecte un code spectral unique aux données de chaque utilisateur en partageant la bande optique disponible. Les différents codes ne sont pas forcément orthogonaux entre eux. Comme l'illustre la figure suivante, à partir d'un spectre d'une source large bande, à chaque utilisateur est associé un code constitué à partir d'une combinaison de plusieurs longueurs d'onde bien spécifique est différent des codes des autres utilisateurs. Ici, le code de l'utilisateur 1 est «01110 » et le code de l'utilisateur 2 est « 11001 » [10].

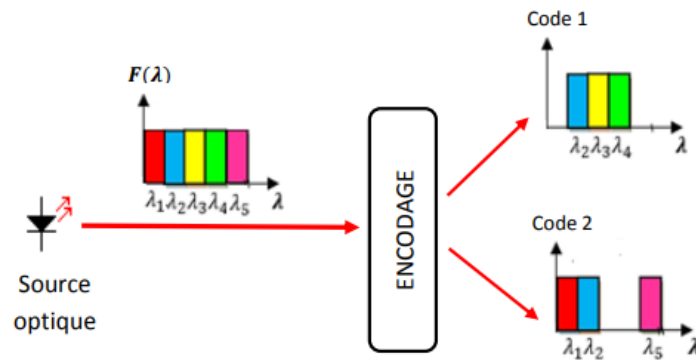


Figure 2.1 : Encodage SAC-OCDMA.

Parmi les techniques d'encodage des systèmes SAC-OCDMA, on trouve :

### 2.2.1.1. Encodage avec masque d'amplitude

Cette première méthode a été proposée en 1990, le principe de fonctionnement est basé sur deux réseaux de diffraction (voir figure 2.2). Le rôle du premier est de séparer angulairement les différentes composantes fréquentielles. Un masque d'amplitude est inséré dans un plan orthogonal à l'axe de propagation et permet de supprimer les composantes spectrales voulues. Une lentille associée au deuxième réseau de diffraction recombine les composantes spectrales restantes [10]

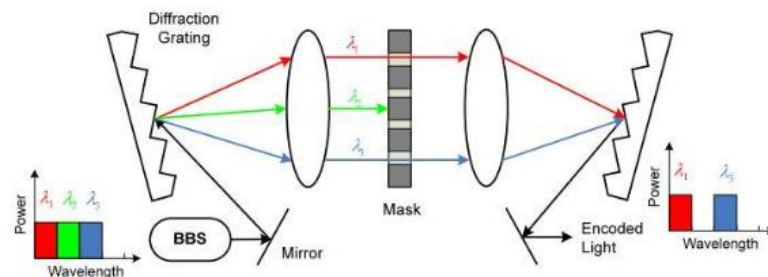
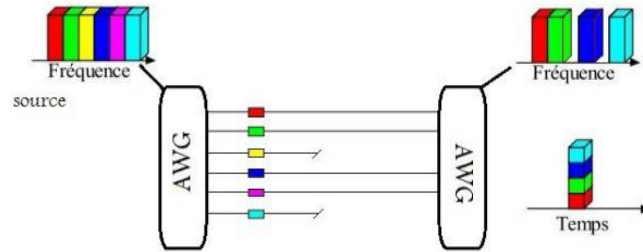


Figure 2.2 : Encodage SAC-OCDMA avec un masque d'amplitude.

### 2.2.1.2. Encodage avec AWG (Arrayed Waveguide Grating ou réseau sélectif planaire)

Le principe est d'utiliser une cascade de deux AWGs  $1 \times N$ . À la sortie de chaque branche du premier AWG, nous retrouvons une tranche spectrale déterminée. En

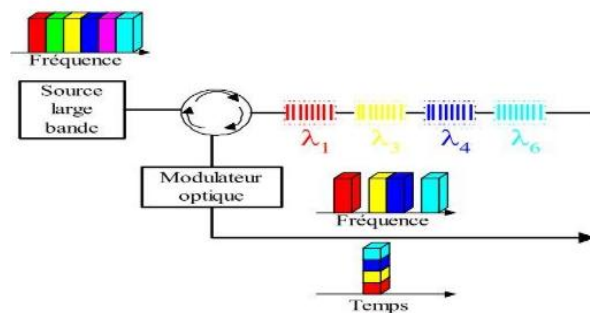
branchant uniquement certaines fibres aux  $N$  entrées du deuxième AWG, il est ainsi possible d'obtenir un code spectral [10].



**Figure 2.3 :** Encodage SAC-OCDMA à base d'AWG

### 2.2.1.3. Encodage avec réseaux de Bragg

Le principe physique d'un réseau de Bragg consiste en une variation périodique de l'indice de réfraction (du cœur de la fibre) afin de créer des phénomènes d'interférences et ainsi d'obtenir un composant sélectif spectralement. Il est donc possible de réaliser un montage SAC-OCDMA à base de réseaux de Bragg. Chacun des réseaux de Bragg permet de supprimer une bande de fréquences qui n'est pas contenue dans le code SAC-OCDMA [10].

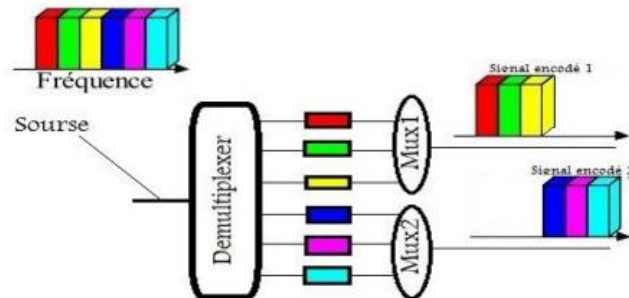


**Figure 2.4 :** Encodage SAC-OCDMA avec réseaux de Bragg

### 2.2.1.4. Encodage à l'aide de démultiplexeurs et multiplexeurs optiques

C'est la technique la plus utilisée à ce jour, son principe étant assez simple. Le spectre large bande de la LED est divisée en plusieurs longueurs d'ondes de largeur

égale à la l'aide d'un démultiplexeur. A partir des sorties de ce dernier, chaque utilisateur pourra rassembler les longueurs d'onde qui constituent sa signature spectrale à l'aide d'un multiplexeur. Le nombre d'entrées du multiplexeur est égal au nombre de longueurs d'onde qui constituent la signature spectrale [10].



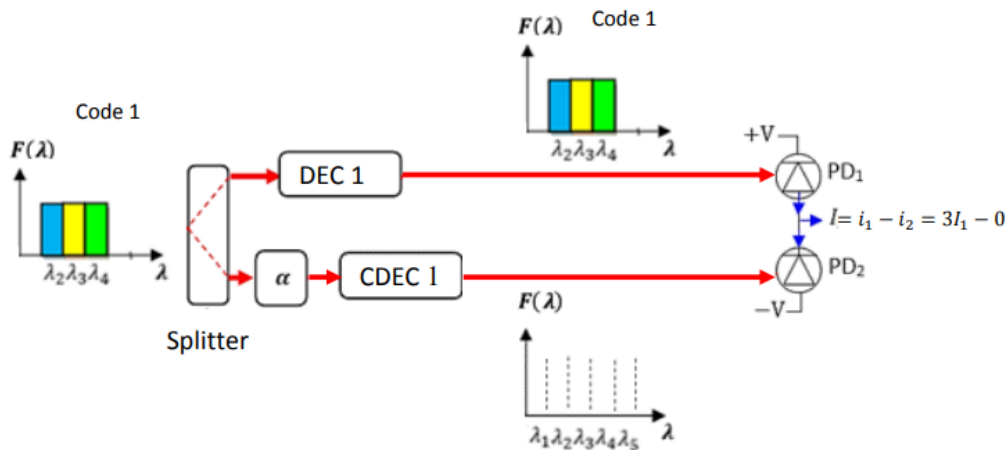
**Figure 2.5 :** Encodage SAC-OCDMA avec un démultiplexeur et de deux multiplexeurs.

### 2.2.2. Décodage d'un signal SAC-OCDMA

A la réception les signaux de tous les utilisateurs sont réunis. Le but d'un système de décodage SAC-OCDMA pour l'utilisateur est double. Premièrement, il faut qu'il détecte les données qui lui sont destinées. Deuxièmes, il faut que le système de détection rejette les signaux des autres utilisateurs considérés comme interférents. Il existe plusieurs méthodes dont on cite :

#### 2.2.2.1. Détection complémentaire ou balancée

Dans cette structure (figure 2.6), le récepteur est constitué d'un splitter (1×2) où la branche supérieure comporte le décodeur de l'utilisateur désiré (DEC1) ayant le même spectre que celui du code de l'utilisateur désiré. La branche inférieure comporte un décodeur (CDEC1) dont le spectre est complémentaire à celui du code de l'utilisateur désiré [11].



**Figure 2.6 :** Principe de la détection complémentaire.

L'utilisation d'une photodiode équilibrée permet d'obtenir la soustraction des photocourants issus des deux photodiodes distinctes. Un atténuateur de paramètre  $\alpha$  est également inséré pour ajuster la détection équilibrée avec précision. Il est calculé par l'équation suivante [11] :

$$\alpha = \frac{\lambda_c}{w - \lambda_c} \quad (2.1)$$

Où  $\lambda_c$  : représente la corrélation croisée entre les codes d'une même famille.

$W$  : le poids du code (nombre de 1 qu'il contient).

De cette manière, les effets des interférences d'accès multiples dues aux autres utilisateurs seront atténués au niveau du détecteur tout en favorisant l'utilisateur désiré.

#### 2.2.2.2. Détection directe

Dans le cas où les codes utilisés n'ont aucune tranche fréquentielle commune entre eux ( $\lambda_c = 0$ ), la technique de détection utilisée est la technique dite directe, c'est un cas particulier de la détection équilibrée avec  $\alpha = 0$ . Dans ce cas une seule branche du décodeur est nécessaire comme le montre la figure suivante [11] :

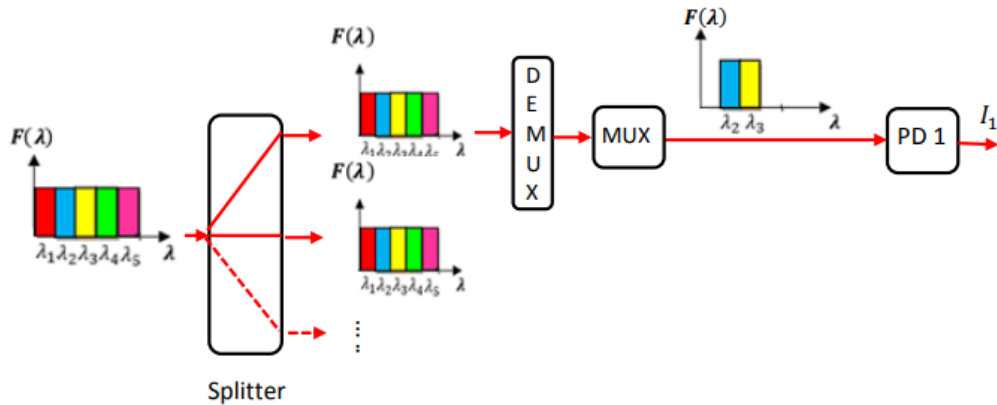


Figure 2.7 : Principe de la détection directe.

### 2.2.2.3. Détection AND

Dans cette méthode, le signal reçu passe à travers un coupleur 1x2. Dans les bras supérieurs, on trouve un décodeur dont la réponse spectrale est identique à celui du code utilisé à l'émission. Dans le deuxième bras, un décodeur AND est inséré comme il est illustré à la figure 2.8. A sa sortie, on obtient un code résultant de l'intersection des différents codes. L'utilisation d'une photodiode balancée permet d'obtenir la soustraction des photo-courants issus des deux photodiodes distinctes [10].

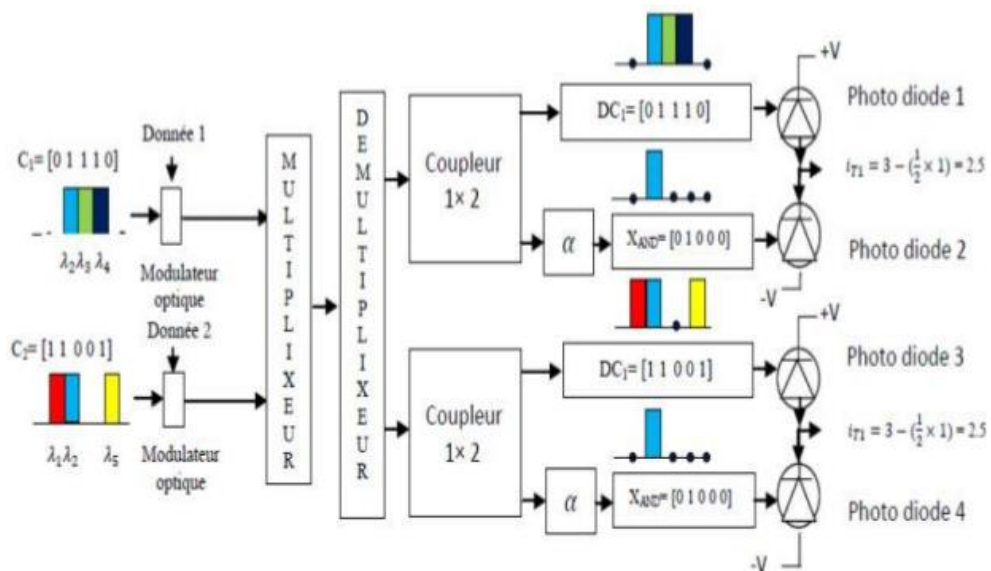


Figure 2.8 : Principe de la détection AND

## 2.3. LES CODES EN SAC-OCDMA

Il existe plusieurs familles de codes qui peuvent être utilisés dans la technique SAC-OCDMA.

### 2.3.1. Les paramètres utilisés dans les codes

Nous ferons souvent référence à une famille de codes en la désignant par son nom et l'ensemble  $(L, w, \lambda_c)$  ou de manière plus générale  $(L, w, \lambda_c, K)$ . La longueur du code est notée  $L$ . Il s'agit du nombre de «1» et de «0» dans le code. Le poids du code, noté  $w$ , est simplement le nombre de «1» contenu dans ce code. La corrélation croisée désignée par  $\lambda_c$ , est la somme du résultat d'une opération logique AND entre deux codes différents pris parmi une famille de codes. Avec une détection balancée on doit utiliser une famille de code ayant une corrélation croisée  $\lambda_c$  constante.

Il y a trois conditions nécessaires qu'une famille de code doit respecter pour pouvoir être utilisée dans la technique SAC-OCDMA : Avoir une longueur  $L$  constante pour tous les codes de la famille ; avoir un poids  $w$  constant et avoir une corrélation croisée  $\lambda_c$  constante pour tous les codes de la famille [11].

### 2.3.2. Les différents codes disponibles

La capacité de multiplexage, la taille des séquences de code, leur poids, la complexité des systèmes de détection associés et les performances des codes en termes de fonctions d'auto et d'intercorrélation déterminent le choix des codes appropriés à la réalisation d'un système optique d'accès multiple. L'interférence d'accès multiple, engendrées par l'inter-corrélation entre les séquences de codes, sont aussi un paramètre déterminant participant aux choix de la famille de code à implémenter, du type de codeurs/ décodeurs et du système de détection [11].

#### 2.3.2.1. Codes à inter-corrélation non nulle

Plusieurs codes à inter-corrélation non nulle ont été étudiés, telle que : le code OOC (Optical Orthogonal Code), MPC (Modified Prime Code), MFH (Modified Frequency Hopping), MQC (Modified Quadratic Congruence), le code KS (Khazani-Syed), RD



(Random Diagonal), et le code MS (Multi-Service) etc. Cependant, ces codes souffrent de plusieurs limites, comme codes trop long et le problème des IAM.

### 2.3.2.2. Codes à inter-corrélation nulle

Pour éliminer les interférences d'accès multiples (MAI) dans les systèmes SAC-OCDMA, les codes à inter-corrélation nulle ont été développés. Pour ces codes, il n'y a pas de superposition des «1» entre les codes des différents utilisateurs, ce qui conduit à la suppression des IAM. Plusieurs codes ont été cités dans la littérature, tels que : le code ZCC (Zéro Cross Corrélation), MNZCC (Modifie New Zéro Cross-Corrélation) , MD (Multi Diagonal), MMS (Modifie Multi Service), et LSC (Latin Square Code).

## 2.4 BRUIT EN SAC-OCDMA

Dans les systèmes SAC-OCDMA, les trois bruits principalement observés lors de la détection d'un signal non cohérent sont :

- Le bruit thermique
- Le bruit de grenaille (shot noise)
- Bruit d'intensité induit par la phase (PIIN)

### 2.4.1 Bruit thermique

Ce bruit est dû à l'agitation thermique des charges dans la jonction de la photodiode. Il suit une statistique gaussienne, ce bruit introduit une variance  $\sigma_{th}^2$  sur la tension à la sortie du photo-détecteur donnée par [12] :

$$\sigma_{th}^2 = 4K_B T_n B / R_l \quad (2.2)$$

Avec :

$K_B$ : la constante de Boltzmann

$T_n$  : la température en degré Kelvin

$B = \Delta f$  : bande passante du récepteur

$R$  : la résistance de charge du système de photo-détection.

La puissance de ce bruit ne varie pas avec le courant reçu. Il est donc le bruit dominant à basse puissance optique.

### 2.4.2 Le bruit de grenaille (shot noise)

Ce bruit est dû au caractère aléatoire de la création de pair électron-trou dans la photodiode. Il obéit à une statique de poisson. La variance  $\sigma_{sh}^2$  de ce bruit est définie par la relation :

$$\sigma_{sh}^2 = 2 \cdot e \cdot B \cdot I \quad (2.3)$$

Avec :

$e$  : la charge d'électron =  $1.6 \cdot 10^{-19}$

$I$  : le courant du  $N^{ieme}$  utilisateur à la réception.

La puissance de ce bruit est proportionnelle au courant  $I$  et augmente de manière linéaire en fonction de la puissance optique reçue [12].

### 2.4.3 Bruit d'intensité induit par la phase (PIIN)

Ce bruit est dû à la nature quadratique de la détection. Or, le signal émis par une source large bande est la somme d'une infinité de champs électriques dont l'amplitude et la phase sont aléatoires. Son effet est proportionnel à la puissance du photo-courant généré et sa variance s'écrit sous la forme suivante [12]:

$$\sigma_{PIIN}^2 = I^2 \cdot B \cdot \tau_c \quad (2.4)$$

$\tau_c$  : temp de concordance de source.

## 2.5 LE TAUX D'ERREURS BINAIRE

Une qualité de transmission numérique est simple à évaluer ; il suffit 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). Le taux d'erreurs binaires (BER : Bite Error Rate) est le rapport du nombre d'erreurs sur celui de bits transmis lors de la mesure [12].

$$BER = \frac{\text{nombre d'erreurs détectées}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (2.5)$$

Un système de transmission optique est généralement considéré sans erreur, si ce BER est inférieur à une valeur d'au plus  $10^{-9}$ ,  $10^{-12}$  ou  $10^{-15}$  suivant les systèmes présentés.

Dans cette partie, nous présentons le calcul du BER pour un système SAC-OCDMA utilisant la détection directe pour des codes à inter-corrélation nulle. Comme mentionné précédemment, pour ces codes, seuls les effets des bruits de grenaille et thermique sont pris en considération (le bruit PIIN est ignoré puisque on a une absence de chevauchement de spectres d'utilisateurs différents).

Pour le calcul du BER les hypothèses suivantes sont considérées [12] :

- Chaque source présente un spectre étalé sur la largeur de bande

$$\left[ \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2}, \nu_0 + \frac{\Delta\nu}{2} \right]$$

Où  $\nu_0$  est la fréquence optique centrale et  $\Delta\nu$  est la largeur spectrale de bande de la source optique en hertz.

- Chaque composante spectrale de puissance a la même largeur spectrale.
- A la réception, chaque utilisateur a la même puissance.
- Chaque flux de bits provenant de chaque utilisateur est synchronisé.

Le taux d'erreur binaire en utilisant l'approximation Gaussienne peut être déterminé par en utilisant le rapport signal sur bruit (SNR : Signal to Nois Ratio), comme suit [12]

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{SNR}{8} \right) \quad (2.6)$$

Le SNR total résultant du processus de conversion, à la sortie de la photodiode de réception, peut être écrit sous forme de la densité spectrale de puissance (DSP) ( $I^2$ ) divisée par la somme de la variance provenant de différentes sources de bruit

$$\sigma^2 = \sigma_{sh}^2 + \sigma_{th}^2 \quad (2.7)$$

Par conséquent, le SNR total peut être écrit comme suit :

$$SNR = \frac{I^2}{\sigma_{sh}^2 + \sigma_{th}^2} \quad (2.8)$$

Où  $\sigma_{sh}^2 = 2eBI$  ,  $\sigma_{th}^2 = \frac{4k_B T_n B}{R_L}$ , respectivement.

Le courant incident ( $I$ ) en équation (2.16) est donné par :

$$I = R \int_0^\infty S(\nu) d\nu \quad (2.9)$$

$S(\nu)$  et  $R = \frac{\eta e}{h\nu_c}$  en équation (2.9) représentent respectivement, la DSP dans la bande latérale unique de la source optique, et la sensibilité/réactivité de la Photodiode [2].

Où :  $\eta$ : efficacité quantique

$e$ : la charge d'électron,

$h$ : constante de Planck,

$\nu_c$ : la fréquence centrale.

La DSP d'une source optique au niveau du décodeur peut être écrite comme suit :

$$s(\nu) = \frac{p_{re}}{\Delta\nu} \sum_{p=1}^p d_p \sum_{n=1}^L c_i(n) rect(n) \quad (2.10)$$

Avec :  $rect(n)$  est donné par :

$$rect(n) = U \left[ \nu - \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2L} (-L + 2i - 2) \right] - U \left[ \nu - \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2L} (-L + 2i) \right] \quad (2.11)$$

Où  $U(\nu)$  est la fonction d'échelon unitaire.

$p_{re}$ : la puissance reçue.

$\Delta\nu$ : Bande passante de la source optique.

$d_p$ : représente les données binaires envoyées par un abonné individuel pendant une période de bit unique.

$C_i(n)$ : Représentent le  $n^{ième}$  élément du code du  $i^{ième}$  utilisateur [12].

## **2.6. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept développé pour le système SAC-OCDMA. Nous avons détaillé l'encodage lors de l'émission et le décodage lors de la réception tout en donnant les différentes méthodes utilisées. Nous avons également présenté les différents bruits dans le système SAC-OCDMA. A la fin de ce chapitre, nous avons donné la méthode de calcul du BER utilisé comme critère de performance dans le chapitre 3.

# **CHAPITRE 3**

## **Résultats et simulations**

### 3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus par la simulation du système SAC-OCDMA utilisant le code LSC (Latin Square Code) pour un canal FSO. L'analyse est effectuée en termes de BER et diagrammes de l'œil en utilisant les logiciels OptiSystem et Matlab. Le logiciel OptiSystem est un outil innovant qui permet de réaliser des chaînes de transmission optiques à l'aide des composants et des générateurs de signaux contenus dans sa bibliothèque. Le système est analysé pour les différentes conditions météorologiques de Brouillard telles que : Brouillard dense, Brouillard modéré, Brume et Temps clair. Et les différents paramètres telles que : débit binaire, angle de divergence de l'émetteur, diamètre d'ouverture de l'émetteur et celui du récepteur. L'étude consiste à déterminer la portée maximale entre l'émetteur et le récepteur FSO pour une valeur de BER acceptable ( $10^{-9}$ ), pour un nombre donné d'utilisateurs actifs.

### 3.2. LE CODE LSC

Pour notre étude et simulation, nous avons utilisé le code LSC. Ce code prend en compte la réduction de la longueur du code tout en maintenant une corrélation croisée nulle. La construction du code LSC peut être résumée par les étapes suivantes [4] :

#### **Étape 1 :**

Construire une matrice carrée latine,  $M$ , d'ordre  $W$ . Les éléments de cette matrice sont des nombres distincts (entre 0 et  $W-1$ ) disposés de telle sorte que chaque nombre n'apparaisse qu'une seule fois dans chaque ligne et chaque colonne. Par exemple, pour  $W = 3$ ,  $M$  peut être exprimé sous la forme suivante :

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

En général, chaque élément de la matrice  $M$  peut être déterminé par :

$$M(i,j) = (iW + j) \bmod W; 0 \leq j \leq (W-1), 0 \leq i \leq (W-1) \quad (3.2)$$

**Étape 2 :**

Les séquences LSC de base sont générées en se basant sur l'équation suivante :

$$C_B(i, k) = \begin{cases} 1 & ; k = M(i, j) + jW, 0 \leq j \leq (W - 1), 0 \leq i \leq (W - 1) \\ 0 & ; \text{sinon} \end{cases} \quad (3.3)$$

Pour  $W = 3$ , les séquences LSC de base sont représentées par la matrice suivante :

$$C_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dans ce cas, la longueur minimale du code est 9 et le nombre d'utilisateurs minimal est 3. Ainsi, le poids du code, la longueur minimale du code ( $L_B$ ) et le nombre minimal d'utilisateurs ( $N_B$ ) peuvent être liés comme suit [4] :

$$\begin{cases} L_B = W^2 \\ N_B = W \end{cases} \quad (3.5)$$

**Étape 3 :**

La technique de mappage peut être utilisée pour augmenter le nombre d'utilisateurs tout en maintenant un poids fixe. Ceci peut être réalisé en mettant en diagonale,  $m$  fois, le code matriciel de base,  $C_B$ . La matrice finale de code  $C$  est donc donnée comme suit :

$$M = \begin{bmatrix} C_B^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_B^{(2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_B^{(3)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_B^{(m)} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Ici  $C_B^{(x)}$  est le  $x^{\text{ième}}$  élément de mappage ( $x = 1, 2, \dots, m$ ) et chaque «0» dans la matrice de mappage est une matrice nulle avec la même taille que  $C_B$ . Pour un nombre de mappage  $m$  donné, la longueur du code et le nombre d'utilisateurs sont donnés par [4] :



$$\begin{cases} L = mL_B \\ N = mN_B \end{cases} \quad (3.7)$$

Par exemple, pour augmenter le nombre d'utilisateurs actifs à 6 ( $N = 6$ ) tout en maintenant  $W = 3$ , la matrice  $C_B$  donnée par l'équation (3.4) doit être répétée deux fois ( $m=2$ ). La matrice finale de code devient :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

### 3.3 CALCUL DU BER POUR LE CODE LSC DANS UN CANAL FSO

Selon les propriétés du code LSC, la technique de détection directe est exprimée comme ci-dessous :

$$\sum_{i=1}^L C_k(i) C_l(i) = W\delta(k-l) = \begin{cases} W & \text{pour } k = l \\ 0 & \text{pour } k \neq l \end{cases} \quad (3.9)$$

la somme de la densité spectrale de puissance au photo-détecteur du  $l^{\text{ème}}$  récepteur peut être exprimée sous la forme

$$\int_0^{+\infty} G_d(v) dv = \int_0^{+\infty} \frac{P_{sr}}{\Delta v} \sum_{k=1}^N d_k \sum_{i=1}^L C_k(i) C_l(i) u \left[ \frac{\Delta v}{L} \right] dv \quad (3.10)$$

En remplaçant les équations (3.9) dans l'équation (3.10), on obtient

$$\int_0^{+\infty} G_d(v) dv = \frac{P_{sr}}{\Delta v} \left[ W \frac{\Delta v}{L} \right] = \frac{P_{sr} W}{L} \quad (3.11)$$

Le photo-courant,  $I$ , à la sortie du photo-détecteur est donné par :

$$I = \Re \int_0^{+\infty} G_d(v) dv = \Re \frac{P_{sr} W}{L} \quad (3.12)$$

La variance du bruit est exprimée par :

$$\sigma^2 = 2 \frac{eB\Re P_{sr}W}{L} + 4 \frac{K_B T_n B}{R_L} \quad (3.13)$$

En considérant une transmission équiprobable des bits «1» et «0», pour chaque utilisateur, le SNR moyen est donc donnée par :

$$SNR = \frac{I^2}{\sigma^2} = \frac{\left(\frac{\Re P_{sr}W}{L}\right)^2}{2 \frac{eB\Re P_{sr}W}{L} + 4 \frac{K_B T_n B}{R_L}} \quad (3.14)$$

En remplaçant cette dernière équation dans l'équation (2.6) nous obtenant le BER du système :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\left(\frac{\Re P_{sr}W}{L}\right)^2}{\frac{eB\Re P_{sr}W}{L} + 2 \frac{K_B T_n B}{R_L}}} \right) \quad (3.15)$$

Pour un canal FSO la puissance reçue  $P_{sr}$  est affectée par les conditions géométrique et atmosphérique. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$P_{sr} = P_t \left( \frac{D_2}{(D_1 + \theta_t L)} \right)^2 \tau_t 10^{\left(\frac{-\alpha L}{10}\right)} \tau_r \quad (3.16)$$

Où :

$P_t$ : est la puissance émise

$D_1$  et  $D_2$  : sont le diamètre d'ouverture de l'émetteur et du récepteur,

$\theta_t$  : est l'angle de divergence d'émission

$L$  : est la longueur de la liaison,

$\tau_t$ : est l'efficacité optique de l'émetteur,

$\tau_r$  : est l'efficacité optique du récepteur

$\alpha$  : est le facteur d'atténuation atmosphérique en dB/km.

### 3.4. ETUDE DES PERFORMANCES DU SYSTEME

La gêne la plus importante est les mauvaises conditions météorologiques qui affectent les performances du système FSO. Elles entraînent la diminution du SNR

et l'augmentation du BER. Dans le but d'évaluer les performances du système SAC-OCDMA dans un canal FSO, nous allons étudier et analyser le BER en prenant en compte les différentes atténuations dues aux conditions météorologiques en plus des effets des paramètres géométriques.

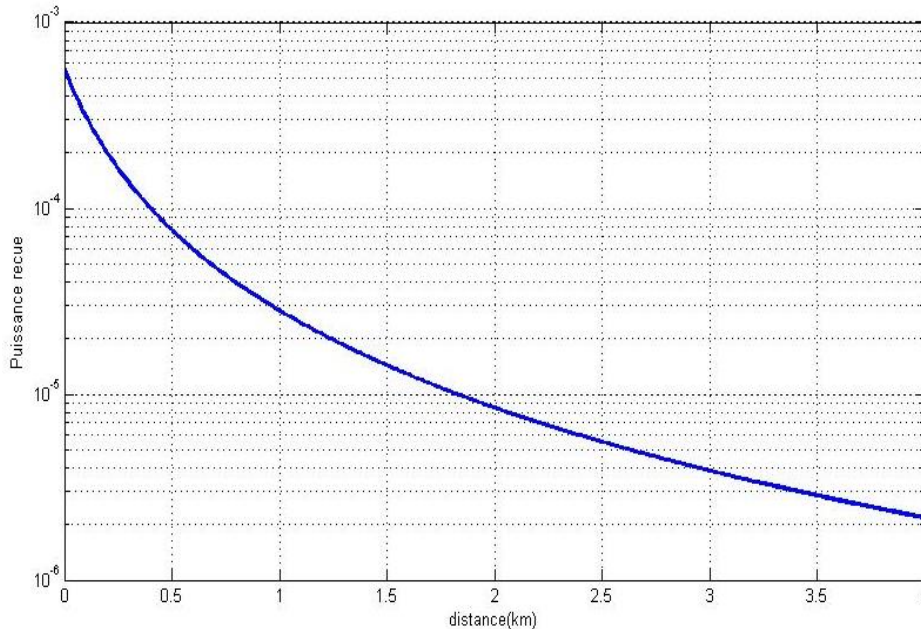
Dans cette section, nous analysons, par MATLAB, les performances du système SAC-OCDMA basé sur le code LSC dans un canal FSO. Les formalismes mathématiques donnés dans la section précédente sont maintenant appliqués à savoir l'équation de la puissance (3.16) et celle du BER (3.15), tout en utilisant les paramètres du système donnés par le tableau suivant :

Symbole	Paramètre	Valeur
$R$	Débit binaire	1Gbps
$\eta$	Efficacité Quantique de Photodétecteur	0,6
$P_t$	Puissance transmise	10 dBm
$B$	Bande passante électrique	466.5 Mbps / 0.75GHz
$\lambda_0$	Longueur d'onde centrale	1550 nm
$T_n$	Température du récepteur	300 k
$R_t$	Résistance de charge du récepteur	1030 $\Omega$
$e$	Charge de l'électron	$1,6 \times 10^{-19}$ C
$h$	Constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ Js
$K_b$	Constante de Boltzmann	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K
$\theta_{div}$	Angle de divergence de l'émetteur	1 mrad
$D_t$	Diamètre d'ouverture de l'émetteur	30 cm
$D_r$	Diamètre d'ouverture du récepteur	10 cm
$K$	Nombre d'utilisateur	03
$W$	Poids du code LSC	03

**Tableau 3.1 :** Paramètres utilisés dans l'analyse numérique par Matlab.

Avant de tracer les courbes du BER, nous traçons d'abord celle de la puissance reçue en fonction de la distance pour voir sa variation. Nous remarquons de la figure

(3.1) que pour des valeurs fixes des diamètres de l'émetteur et du récepteur et de l'atténuation, la puissance diminue pour une augmentation de la distance.



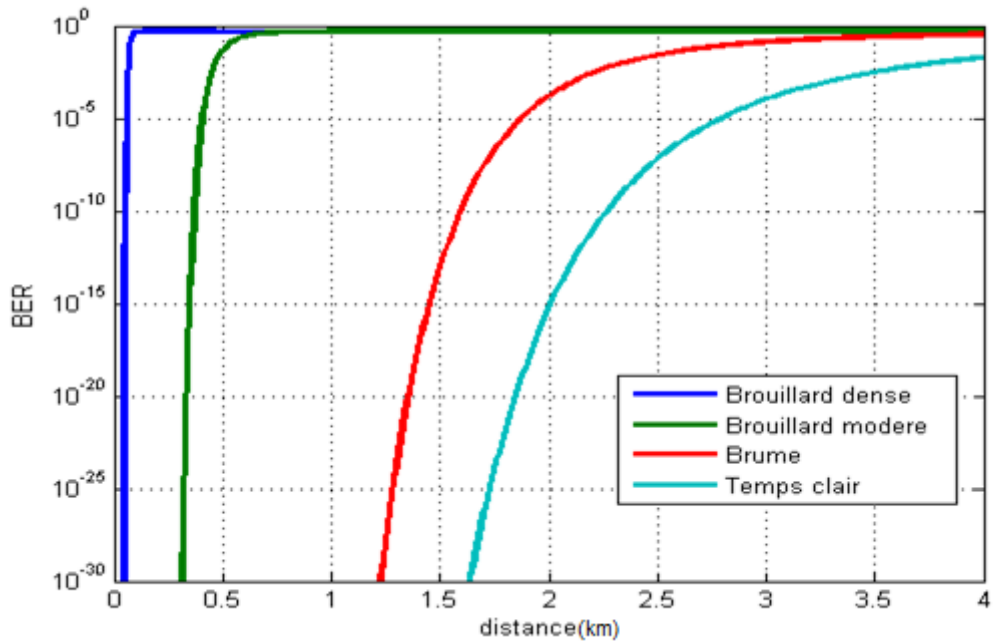
**Figure 3.1 :** Puissance reçue en fonction de la distance.

### (a) Effet du brouillard

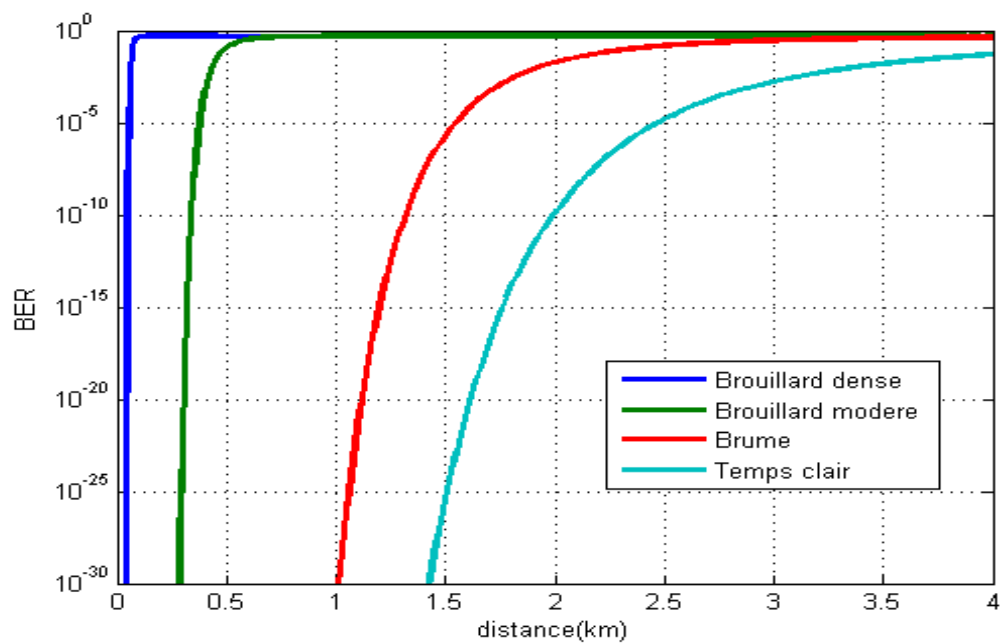
Le brouillard à un facteur d'atténuation le plus critique parmi tous les facteurs des autres phénomènes météorologiques. L'atténuation des différentes versions du brouillard dépend de la visibilité, Le tableau suivant donne les atténuations des différentes versions du brouillard en fonction de leur visibilité.

Phénomènes météorologiques	Visibilité (m)	Atténuation (dB/km)
Brouillard dense	50	339.7920
Brouillard modéré	500	33.9792
Brume	2800	2.6743
Temps clair	18100	0.2429

**Tableau 3.2 :** Atténuation des différents types du brouillard.



(a)



(b)

Figure 3.2 : BER en fonction de la distance pour différents cas de brouillard

(a) Débit=622 Mbps (b) Débit=1 Gbps

La figure 3.2 représente la variation du BER en fonction de la portée pour différents types de brouillard (brouillard dense, brouillard modéré, brume et en temps clair). Cela pour deux valeurs différentes du débit (622 Mbps et 1 Gbps).

Il est clairement montré à partir de cette figure que lorsque la portée de la liaison augmente, les performances du système SAC-OCDMA sont détériorées dans le canal FSO. Cela est dû aux différentes atténuations citées dans le chapitre précédent. Nous remarquons également, que plus l'atténuation due au brouillard augmente (selon le type de brouillard), plus le BER augmente, donc performance dégradée.

Pour un  $BER=10^{-9}$  (BER nécessaire pour les systèmes de communication), nous obtenons les portées maximales suivantes pour différents types de brouillard.

Phénomènes météorologiques	Portée max pour 622Mbps	Portée max pour 1Gbps
Brouillard dense	65.79	64.46
Brouillard modéré	384	374
Brume	1339	1280
Temps clair	1958	1845

**Tableau 3.3 :** Portée max pour différents types du brouillard.

### (b) Effet du débit binaire

La figure (3.3) représente le BER en fonction de la distance pour différentes valeurs de débit binaire. Nous avons considéré quatre valeurs différentes à savoir 200 Mbps, 622 Mbps, 1 Gbps et 10 Gbps respectivement, pour une distance variant de 0 à 4 km. Nous remarquons que la portée maximale diminue en augmentant le débit, ceci est dû aux faites que l'expression du BER est inversement proportionnelle à la bande passante électrique de la photodiode qui dépend linéairement du débit binaire.

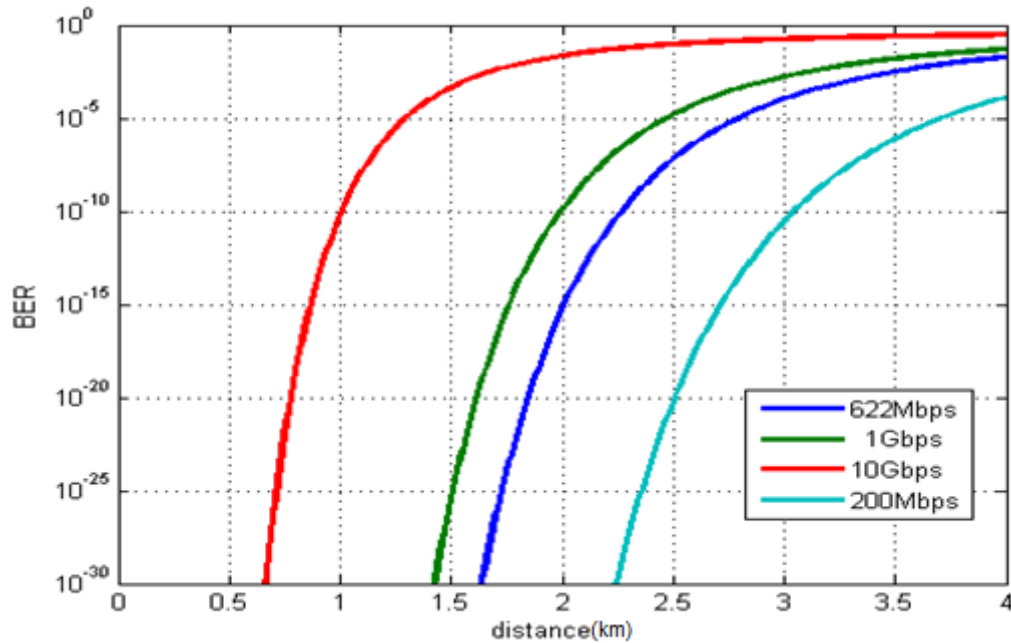


Figure 3.3 : BER en fonction de la distance pour différentes valeurs de débit binaire

Pour un BER de  $10^{-9}$ , le système SAC-OCDMA utilisant le code LSC pourrait fonctionner suffisamment bien jusqu'à 3.1 km pour 200 Mbps et jusqu'à 2.3 km pour 622 Mbps, alors que le système utilisant 1 Gbps et 10 Gbps ne pouvait fonctionner suffisamment que jusqu'à 2 km et 1.1 km respectivement. Ces valeurs sont obtenues pour le cas d'une atténuation de 0.2429 dB/Km correspondante à un temps clair qui sera le cas considéré pour les figures qui suivent. En considérant d'autres environnements, ces distances seront diminuées

### (c) Effet de l'angle de divergence

La figure (3.4) représente le BER en fonction de la distance pour différentes valeurs d'angle de divergence de l'émetteur FSO à un débit binaire de 1 Gbps. Nous remarquons que plus l'angle de divergence du faisceau augmente plus le BER augmente, cela est le résultat de la diffraction du faisceau qui peut engendrer qu'une partie du signal ne sera pas collectée par l'ouverture du récepteur.

Pour ce cas considéré (temps clair, débit= 1Gbps) et pour une valeur acceptable de BER, le système SAC-OCDMA peut atteindre une portée de 2850 m pour une divergence de faisceau de 0,25 *mrad*, 2050 m pour 0,5 *mrad*, 1650 m pour 0,75 *mrad* et 1250 m pour 1 *mrad* respectivement. Il y a donc une relation réciproque entre le BER, la distance et la divergence du faisceau de l'émetteur. Si nous augmentons la divergence du faisceau de l'émetteur FSO, le BER augmente également et donc la portée max diminue.

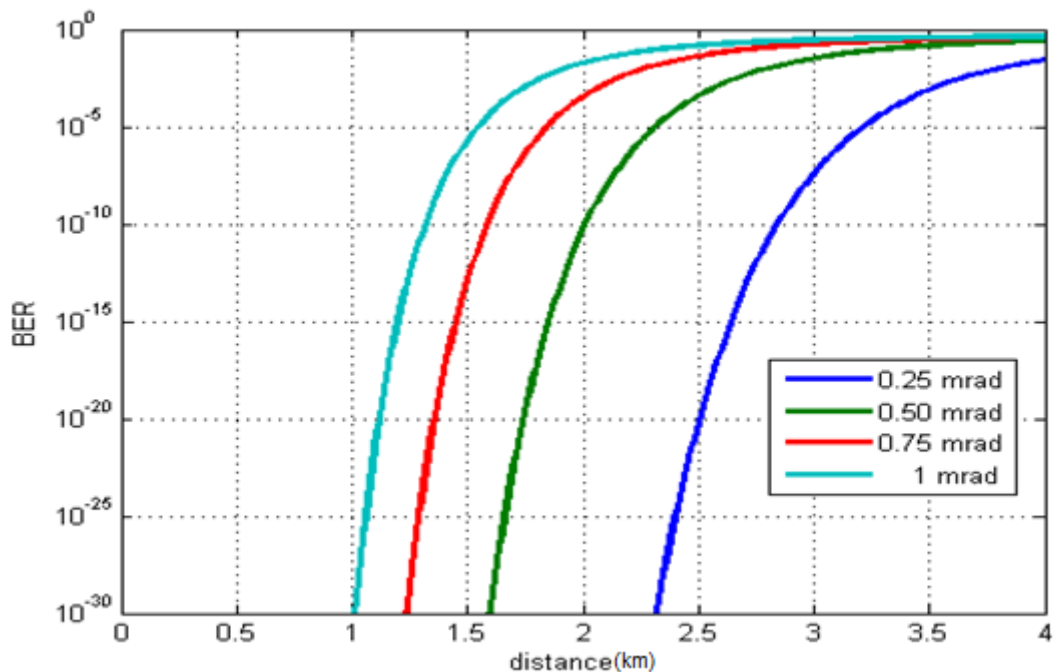


Figure 3.4 : BER en fonction de la distance pour différents angles de divergence.

#### (d) Effet du diamètre de l'émetteur

La figure (3.5) représente le BER en fonction de la distance pour différentes valeurs de diamètre de l'émetteur FSO à un débit binaire de 1 Gbps et une distance allant jusqu'à 4 km. Nous avons considéré quatre diamètres différents de l'émetteur : 10cm, 30cm, 50cm et 70cm. Nous avons obtenu respectivement, pour une distance



de 2500m, par exemple, les valeurs de BER suivantes :  $10^{-28}$ ,  $10^{-17}$ ,  $10^{-11}$  et  $10^{-7}$ . Nous pouvons dire d'après ces résultats que si le diamètre de l'émetteur FSO augmente, le BER augmente aussi, ce qui dégrade les performances du système.

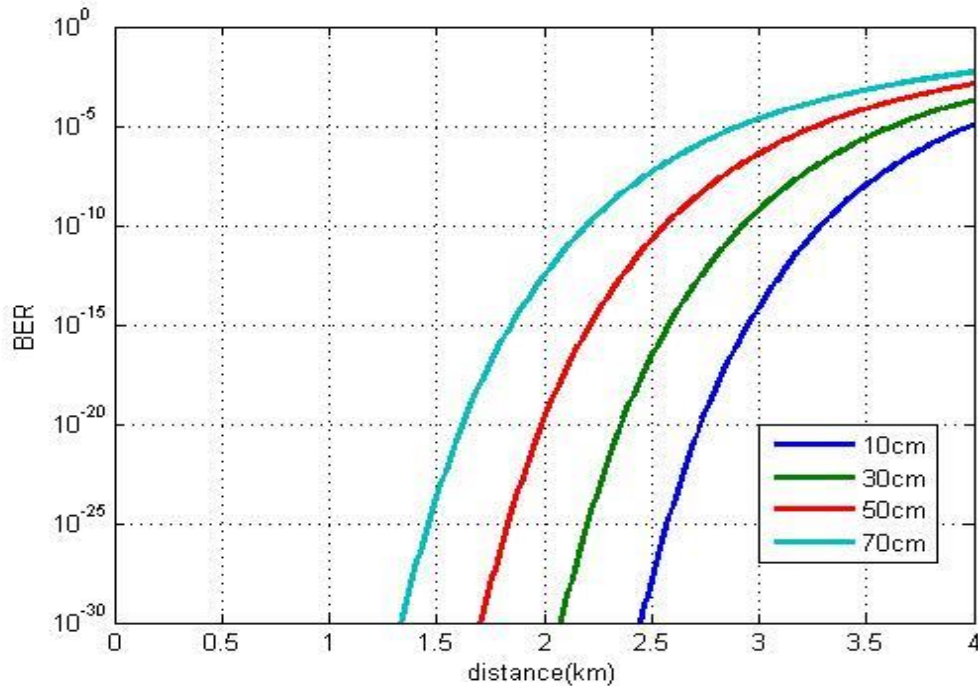


Figure 3.5 : BER en fonction de la distance, pour différentes valeurs de diamètre de l'émetteur

### (e) Effet du diamètre du récepteur

La figure (3.6) représente le BER en fonction de la distance pour différentes valeurs de diamètre du récepteur FSO à un débit binaire 1 Gbps en considérant les diamètres de récepteur suivants : 2cm, 4cm, 7cm et 10cm. Nous observons que plus le diamètre augmente plus les valeurs de BER diminuent. Donc le diamètre du récepteur a un effet inverse à celui du diamètre de l'émetteur. Nous avons obtenu, pour une distance de 2500m par exemple, les valeurs respectives suivantes de BER :  $10^{-1}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$  et  $10^{-22}$ . Cela peut être expliqué par le fait que plus le diamètre du récepteur est grand, plus qu'il puisse collecter le maximum du signal optique.

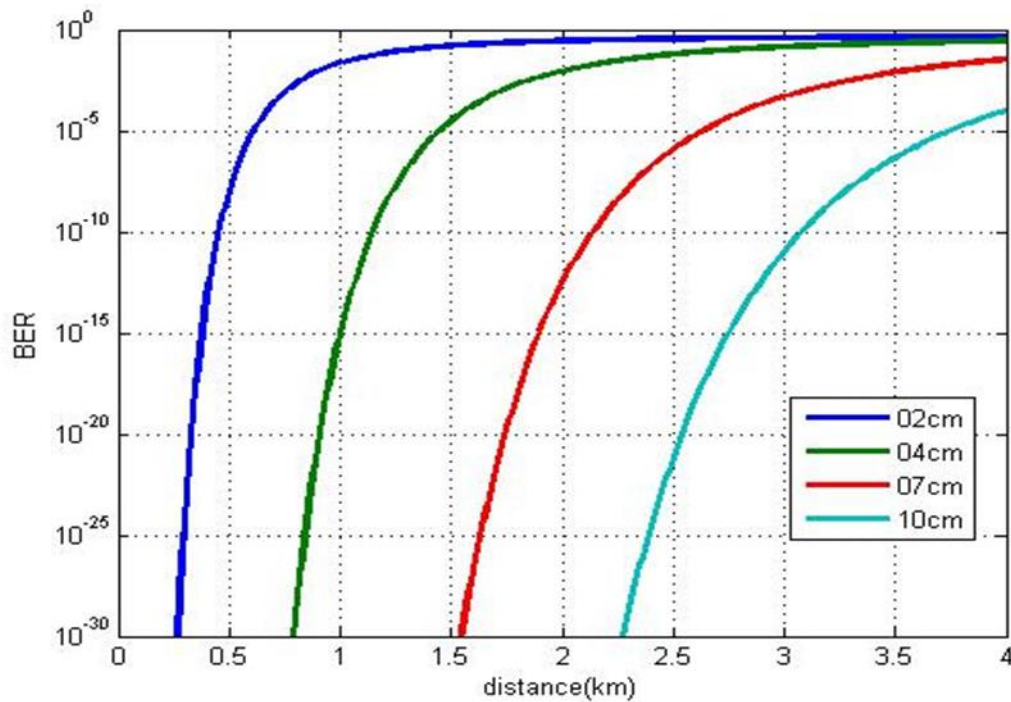


Figure 3.6 : BER en fonction de la distance pour différentes valeurs du diamètre de récepteur

### (f) Effet du nombre d'utilisateurs

La figure (3.7) représente le BER en fonction de la distance pour différents nombres d'utilisateurs utilisant le code LSC à un débit binaire de 1 Gbps. Pour une valeur fixe du  $BER=10^{-9}$ , nous avons obtenus les valeurs (0.5, 0.6, 0.8, 1.35) Km de distances maximales que peut atteindre le signal SAC-OCDMA pour les valeurs respectives de nombre d'utilisateurs (3, 9, 15 et 21). Il y a donc une relation directe entre la distance et le nombre d'utilisateurs. Si nous augmentons le nombre d'utilisateurs, le BER augmente également.

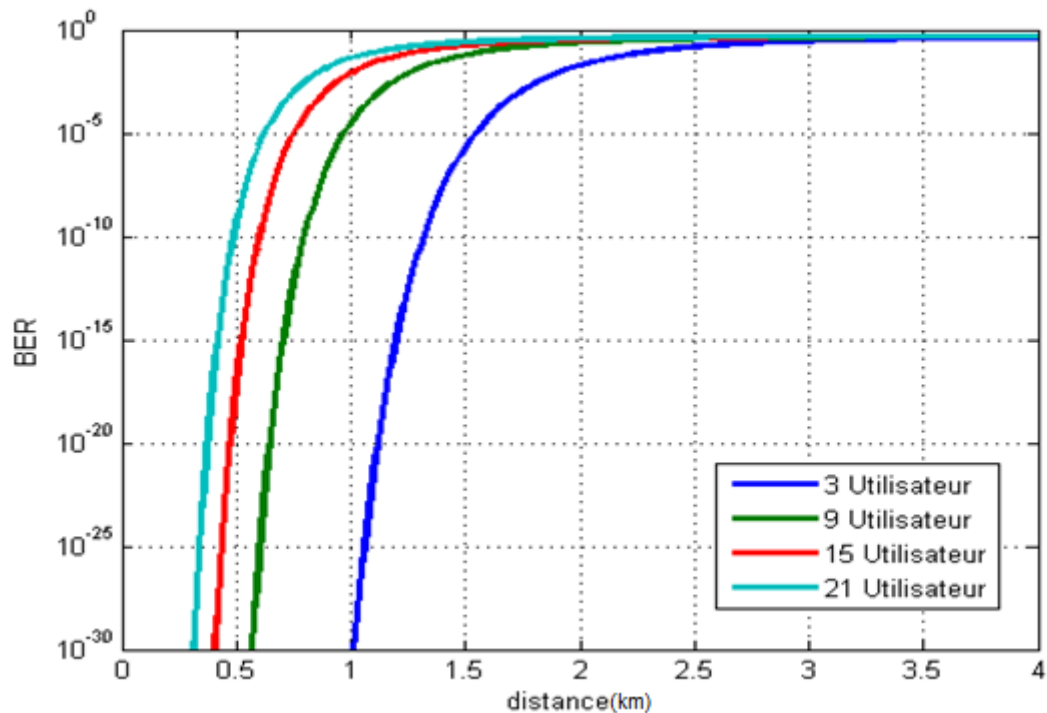


Figure 3.7 : BER en fonction de la distance pour différent nombre d'utilisateurs

### (g) Effet de la puissance émise

La figure (3.8) représente le BER en fonction de la distance pour différentes puissance émise utilisant le code LSC à un débit binaire de 1 Gbps. Pour une valeur fixe du BER=10<sup>-9</sup>, nous avons obtenus les valeurs (3.7, 2.2, 1.1, 0.5) Km de distances maximales que peut atteindre le signal SAC-OCDMA pour les valeurs respectives de puissance (-5, -10, -15 et -20) dbm. Il y a donc une relation directe entre la distance et la puissance émise. Si nous augmentons la puissance, le BER diminué et donc la portée max augmente.

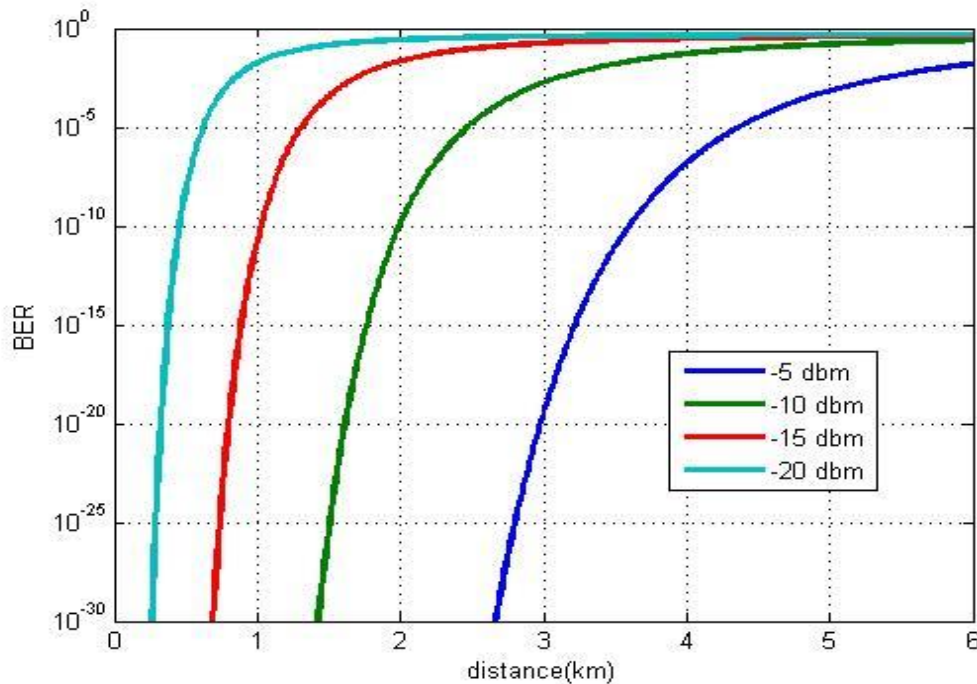


Figure 3.8 : BER en fonction de la distance pour différentes puissance émise

## 3.5 SIMULATIONS PAR OPTYSYSTEM

### 3.5.1 Présentation du logiciel Optisystem

OptiSystem "Optical communication System design software", est un logiciel de simulation développé par une société canadienne, pour permettre aux chercheurs et ingénieurs de modéliser et simuler des systèmes de télécommunications optiques afin de concevoir, essayer et optimiser toute liaison optique. Cet outil est doté d'une interface interactive alliant des outils numériques à des fonctionnalités graphiques et d'une interface utilisateur. Il possède un nouvel environnement de simulation très puissant et une définition hiérarchique de composants et systèmes. Ses capacités peuvent être facilement augmentées grâce à l'ajout de composants d'utilisateur et d'interfaces sans failles à une gamme d'outils couramment utilisés [13].

### 3.5.2 Le schéma bloc de simulation du système SAC-OCDMA sur un canal FSO

La figure suivante représente le schéma de simulation, effectué par OptiSystem, d'un system SAC-OCDMA à trois utilisateurs sous un canal FSO que nous avons utilisé.

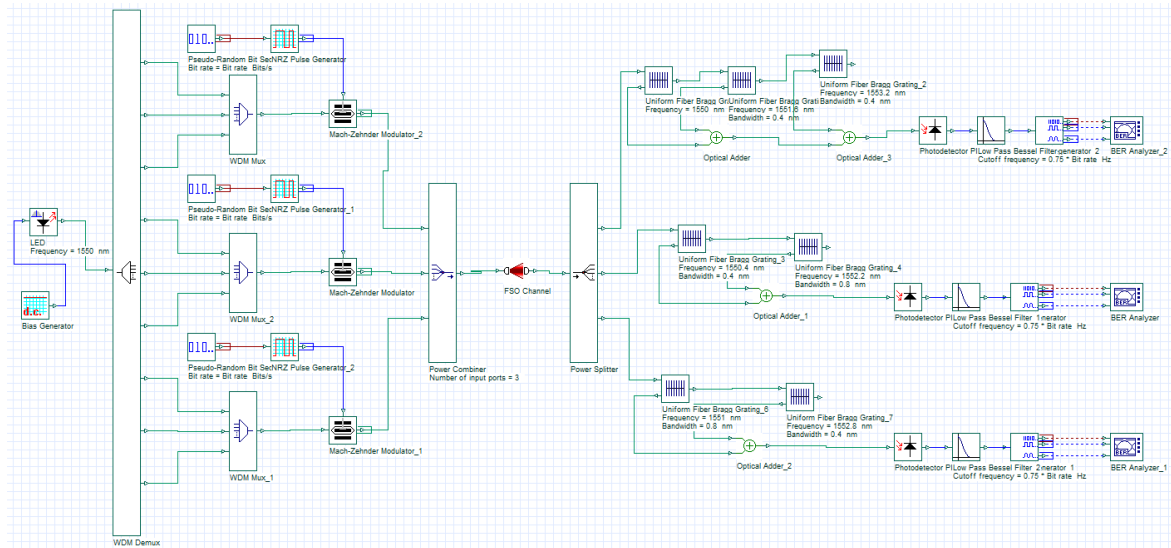
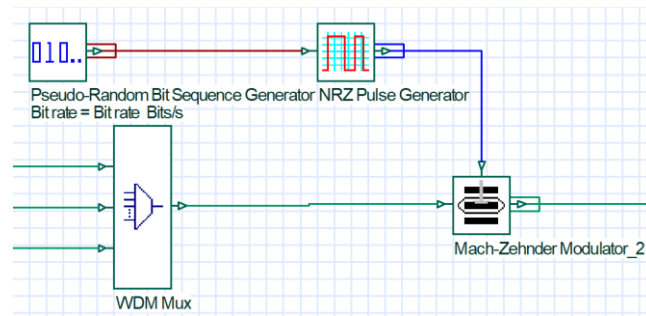


Figure 3.9 :Schéma bloc du système SAC-OCDMA sous un canal FSO

Le schéma de la figure suivante représente la partie émission pour un seul utilisateur. Cette partie a pour objectif d'inscrire l'information électrique sur un signal lumineux. La donnée binaire est générée à l'aide d'un générateur de séquence binaire pseudo-aléatoires PRBS et codé par un code non-retour à zéro (NRZ). En suite, le code optique de chaque utilisateur est formé en combinant les longueurs d'ondes concernées. Par la suite, la séquence de l'utilisateur est modulé optiquement par le code optique à l'aide d'un modulateur de type Mach-Zehnder.

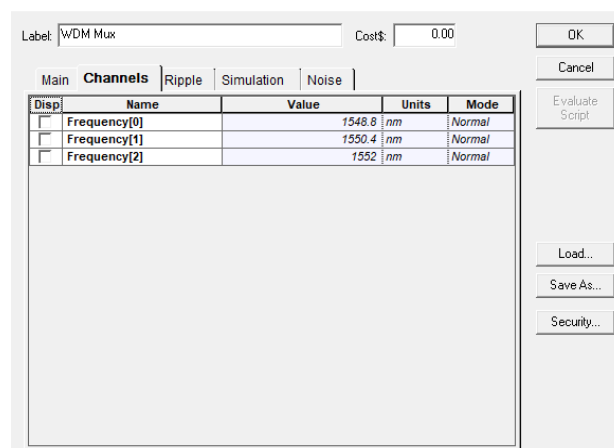


**Figure 3.10** : partie émission pour un seul utilisateur dans le system SAC-OCDMA

Pour le système SAC-OCDMA, le spectre est partagé, pour attribuer un code différent à chaque utilisateur. Une source incohérente semble être un bon candidat en raison de sa nature à large bande, qui est une caractéristique nécessaire pour avoir plus de longueurs d'onde. Un démultiplexeur permet de partager un signal optique en plusieurs longueurs d'onde, le nombre de longueurs d'onde étant égal à la longueur du code utilisé. Pour le codage SAC-OCDMA, un multiplexeur permet de combiner les longueurs d'ondes correspondantes aux  $W$  chips 1 de chaque code de l'utilisateur.

Pour la configuration, dans le menu WDM Demux, nous avons inséré toutes les longueurs d'ondes selon la longueur du code.

Dans le menu WDM Mux, nous avons inséré les  $W$  longueurs d'ondes souhaitée (ici  $W$  est égale à 3), avec une largeur de bande ( $\Delta\nu=0,4$  nm). Le menu WDM Mux est présenté dans la figure suivante, où les longueurs d'ondes du code sont introduites pour l'utilisateur 1.



**Figure3.11** : Inscription des longueurs d'onde dans le WDM Mux pour l'utilisateur 1.

Le signal formé par la combinaison des données de tous les utilisateurs est ensuite transmis via le canal FSO. Ce signal est affecté par différents phénomènes dans le canal atmosphérique comme le brouillard, pluies, neige.... Les valeurs d'atténuations et la portée en plus d'autres paramètres, sont à régler lors de la configuration du canal FSO par OptiSystem comme le montre la figure suivante.

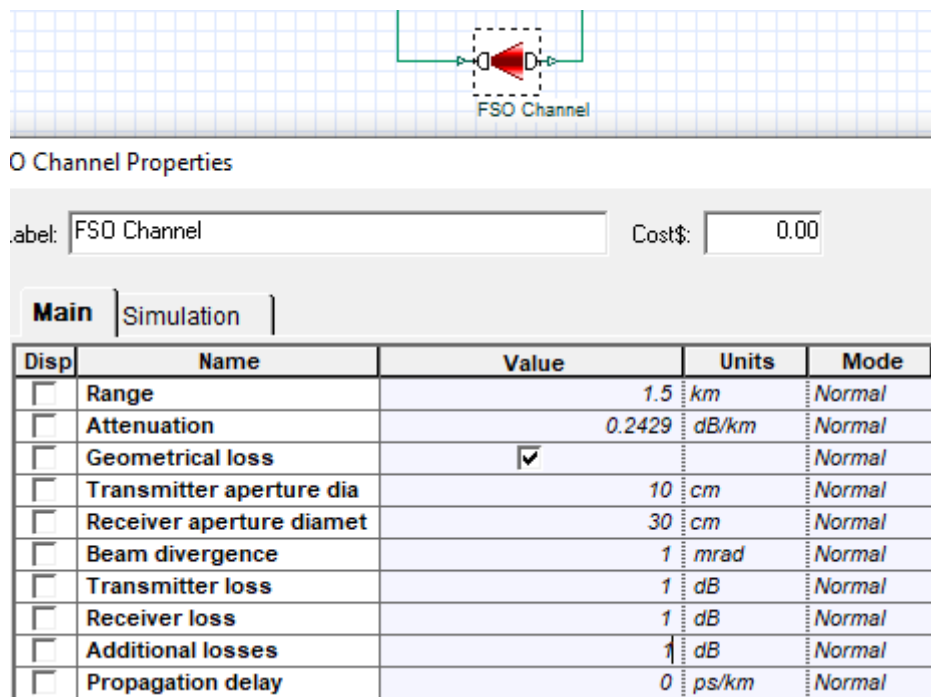


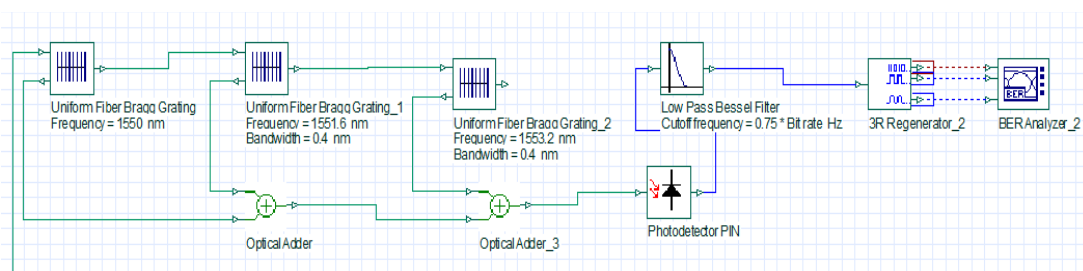
Figure 3.12 : Configuration du canal FSO.

Plusieurs paramètres donc sont à tenir en compte lors de la configuration du canal FSO :

- Range (porté) : la distance entre l'émetteur et le récepteur FSO.
- Atténuation (atténuation) : elle est due aux différentes conditions météorologiques (Brouillard, pluie, neige, scintillation...).
- Geometrical loss (atténuation géométrique) : elle dépend du diamètre d'ouverture de l'émetteur et du récepteur et l'angle de divergence de faisceau.
- Transmitter loss : perte au niveau de l'émetteur.
- Receiver loss : perte au niveau du récepteur.

- Additional losses (pertes additionnelles): autres atténuations affectant la propagation du signal.
- Propagation delay : délais de propagation.

En arrivant au récepteur, Le signal est envoyé à un diviseur de puissance. Ensuite, pour chaque utilisateur trois fibres de bragg uniforme (FBG : Fibre Bragg Grating) montés selon la technique de détection directe sont utilisé, comme le montre la figure suivante :



**Figure 3.13** : le module de détection pour un seul utilisateur.

L'utilisation de trois FBG revient au poids du code  $W=3$ , dont chaque FBG correspond à une longueur d'onde utilisé pour coder les «1» du code. Pour l'utilisateur 2 et 3, nous avons utilisé seulement deux FBG, un est configuré pour couvrir deux longueurs d'ondes successives.

Le signal ainsi produit pour chaque utilisateur est envoyé à un détecteurs optique PIN pour détecter et convertir le signal optique en signal électrique. Le détecteur crée à la sortie un courant d'intensité proportionnelle à la densité du signal optique reçu. Pour supprimer le bruit, le signal détecté est ensuite envoyé à un filtre passe-bas.

Pour analyser le signal, nous utilisons l'analyseur de diagramme de l'œil pour tracer le diagramme de l'œil à l'extrémité du récepteur et mesurer également la valeur minimale du BER.

### 3.5.3. Paramètres de simulation

La figure 3.14 montre les paramètres globaux nécessaires pour la simulation OptiSystem, tels que :



- Time window : la fenêtre de visualisation temporelle.
- Number of samples : Le nombre d'échantillons total de la séquence à transmettre.
- Sample rate : la fenêtre de visualisation fréquentielle.

Ces paramètres sont calculés en utilisant :

- Le débit binaire.
- La longueur de la séquence de bit.
- Le nombre d'échantillons par bit

Simulation			
Name	Value	Units	Mode
Simulation window	Set bit rate		Normal
Reference bit rate	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
Bit rate	1000000000	Bits/s	Normal
Time window	1.28e-007	s	Normal
Sample rate	1024000000000	Hz	Normal
Sequence length	128	Bits	Normal
Samples per bit	1024		Normal
Number of samples	131072		Normal
signalbitrate	1000000000	Bits/s	Normal

Figure 3.14 : Paramètres globaux utilisés sous OptiSystem.

Pour la simulation du système, nous avons utilisé les paramètres et les valeurs de composants suivants :

- Région d'exploitation de la longueur d'onde : [1548.8 nm-1552 nm]
- Longueur d'onde centrale de la diode laser : 1550 nm.
- Débit binaire du signal : 1 Gbits/s.
- Format du signal : Non-retour à zéro (NRZ).
- Canal FSO :
  - ✓ Diamètre d'ouverture de l'émetteur 30 cm
  - ✓ Diamètre d'ouverture du récepteur 10 cm
  - ✓ Divergence de l'émetteur 1mrad
  - ✓ Atténuation 0.2429 dB/Km (temps clair)
  - ✓ Portée : 1500m
- Fréquence de coupure du filtre : 0.75-débit binaire.

### 3.5.4. Critères d'évaluation des performances

Pour évaluer les performances du système SAC-OCDMA dans un canal FSO, trois facteurs de qualité sont disponibles sous le logiciel OptiSystem :

- Le BER : La valeur acceptable doit être inférieure ou égale à  $10^{-9}$
- Le facteur Q : doit être supérieur ou égale à 6.
- Le diagramme de l'œil : l'ouverture verticale doit être maximale.

Le BER et le facteur Q sont reliés par l'équation suivante

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.17)$$

Où le facteur Q est estimé par le logiciel selon l'équation (3.18). Où  $i_0$  et  $i_1$  représentent respectivement les courants associés aux bits «1» et «0» et  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  les écarts type respectives.

$$Q = \frac{i_1 - i_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.18)$$

### 3.5.5. Génération du code LSC

Pour le codage, nous avons utilisé la technique de multiplexage et démultiplexage. Pour notre travail, nous avons utilisé le code LSC caractérisé par une inter-corrélation nulle.

Le tableau suivant représente le code LSC pour un poids  $w = 3$ , et un nombre d'utilisateur égal à 3. Les longueurs d'onde correspondantes choisies sont également présentées dans le même tableau.

Numéro du chip	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Longueur d'onde(nm)	1548.8	1549.2	1549.6	1550	1550.4	1550.8	1551.2	1551.6	1552
Utilisateur1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
Utilisateur2	0	1	0	0	0	1	1	0	0
Utilisateur3	0	0	1	1	0	0	0	1	0

**Tableau 3.4 :** Code LSC pour trois utilisateurs avec  $w = 3$  et les longueurs d'onde correspondantes.

### 3.5.6. Résultats et discussions

Le bloc 'BER analyser' nous permet de calculer le seuil de décision, 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 et les taux d'erreurs binaire correspondants à l'utilisateur 1 obtenus en variant à chaque fois un paramètre pour observer son effet sur la qualité de transmission.

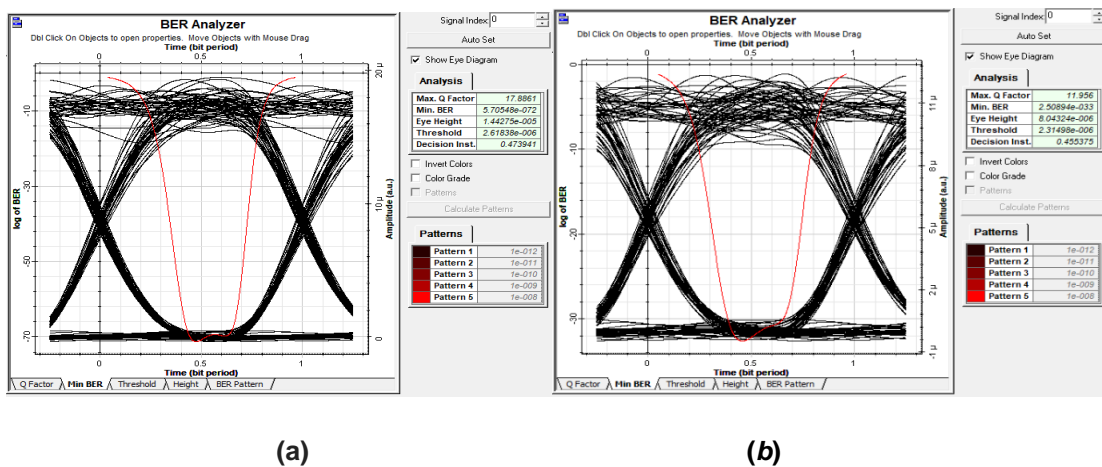


Figure3.15: Diagrammes de l'œil et le BER du premier utilisateur pour différents débits (a) 622 Mbits/s, (b) 1Gbits/s

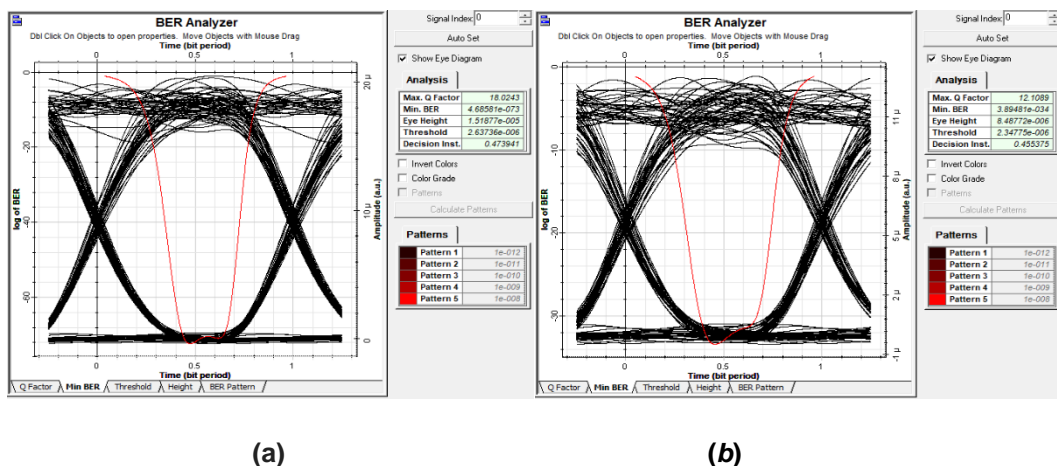


Figure3.16 : Diagrammes de l'œil et le BER du premier utilisateur pour différent angles de divergence (a) 0.25 mrad, (b) 1 mrad

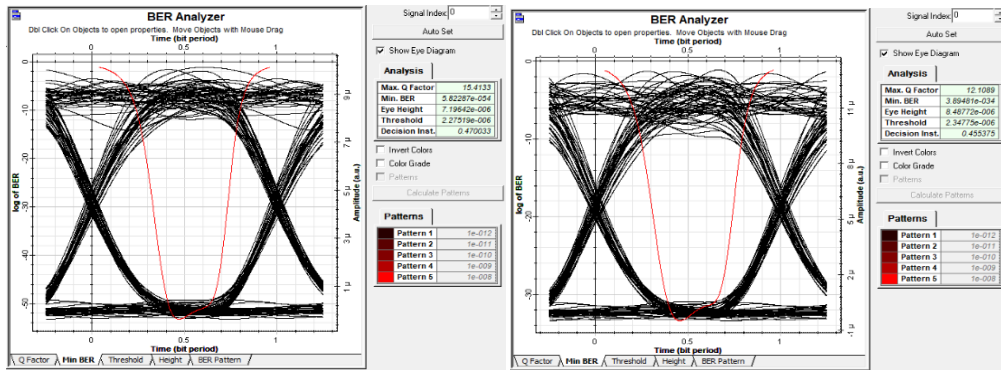


Figure 3.17 : Diagrammes de l'œil et le BER du premier utilisateur pour différents diamètres de l'émetteur (a)10cm, (b)70 cm

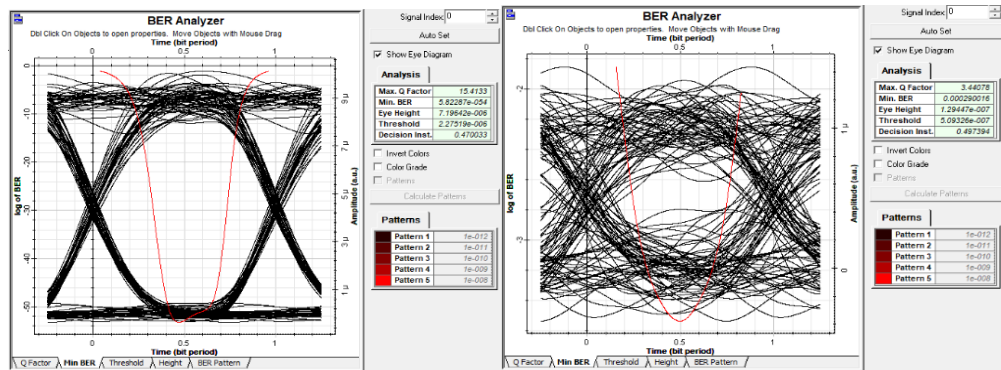


Figure 3.18 : Diagrammes de l'œil et le BER du premier utilisateur pour différents diamètres du récepteur(a) 10 cm, (b)2 cm

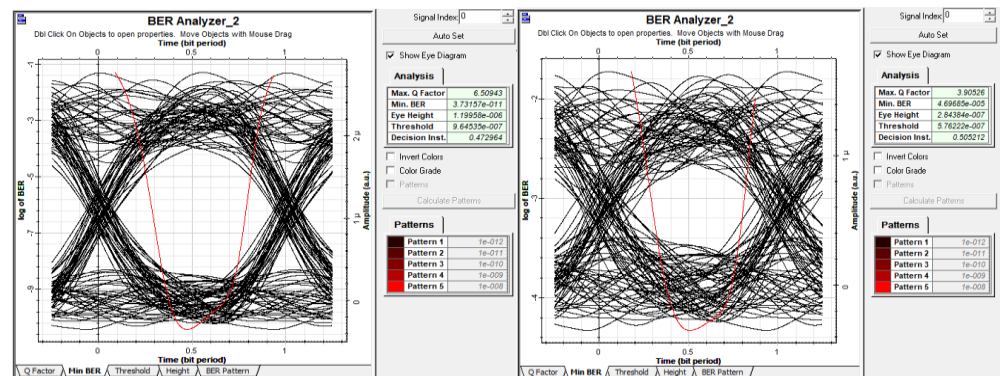


Figure 3.19 : Diagrammes de l'œil et le BER du premier utilisateur pour différentes distances du canal (a) 1500m, (b)3000m

D'après les diagrammes de l'œil et les BER présentés pour les différents paramètres (figures 3.15 jusqu'à 3.19). Nous remarquons, que le système présente des diagrammes à grande ouverture verticale de l'œil. En effet, l'œil indique une bonne résistivité du système étudié au bruit et l'ouverture horizontale indique la sensibilité à un décalage de l'instant d'échantillonnage. Nous remarquons également que l'augmentation du débit, distance, angle de divergence, diamètre de l'émetteur en plus de la diminution du diamètre du récepteur influe sur la qualité de transmission, cela est observé par une diminution de l'ouverture de l'œil du diagramme accompagné d'une augmentation du BER.

Pour améliorer les performances du système, nous pouvons utiliser un amplificateur optique. Comme déjà expliqué dans le chapitre 1, ce dernier peut être utilisé selon sa position dans la liaison, comme amplificateur de puissance, comme amplificateur en ligne, ou comme préamplificateur. Pour un canal FSO, on a juste deux cas le premier et le dernier.

La figure (3.20) suivante représente le schéma de simulation en utilisant un amplificateur EDFA utilisé comme amplificateur de puissance pour fournir une puissance d'entrée adéquate au canal FSO avant que la perte élevée ne soit subie.

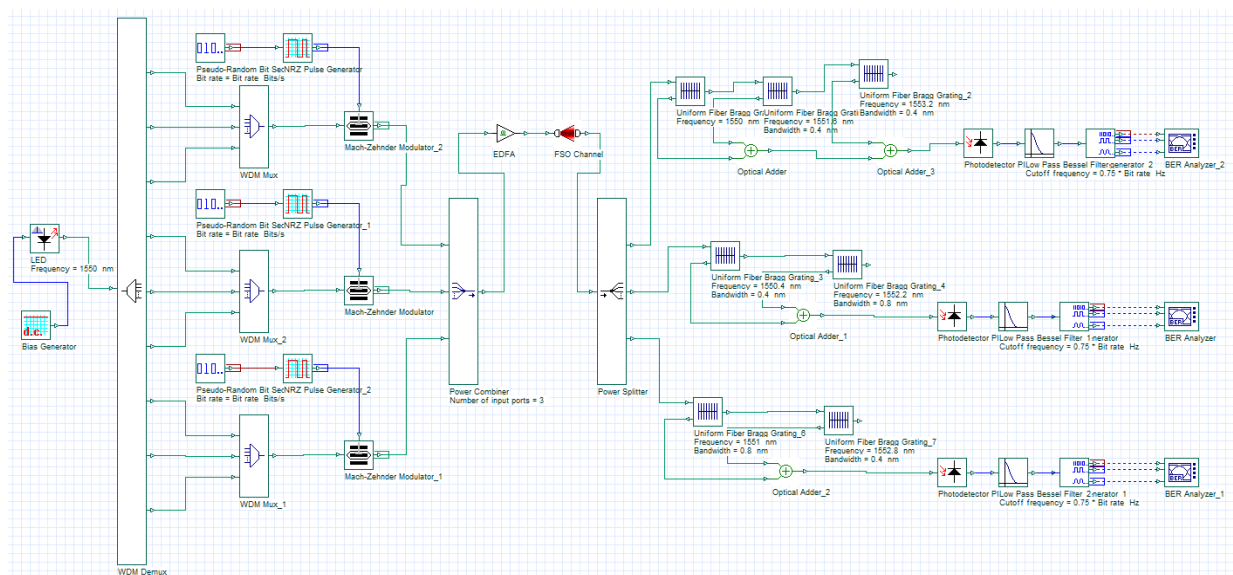


Figure 3.20 : Schéma bloc du système SAC-OCDMA sous un canal FSO en utilisant un amplificateur EDFA

Les figure (3.21) suivante représente les diagrammes de l'œil du système avec et sans EDFA pour un débit de 1GHz et une distance de 2Km. Nous pouvons clairement observer l'amélioration des performances (diminution du BER et augmentation de l'ouverture de l'œil).

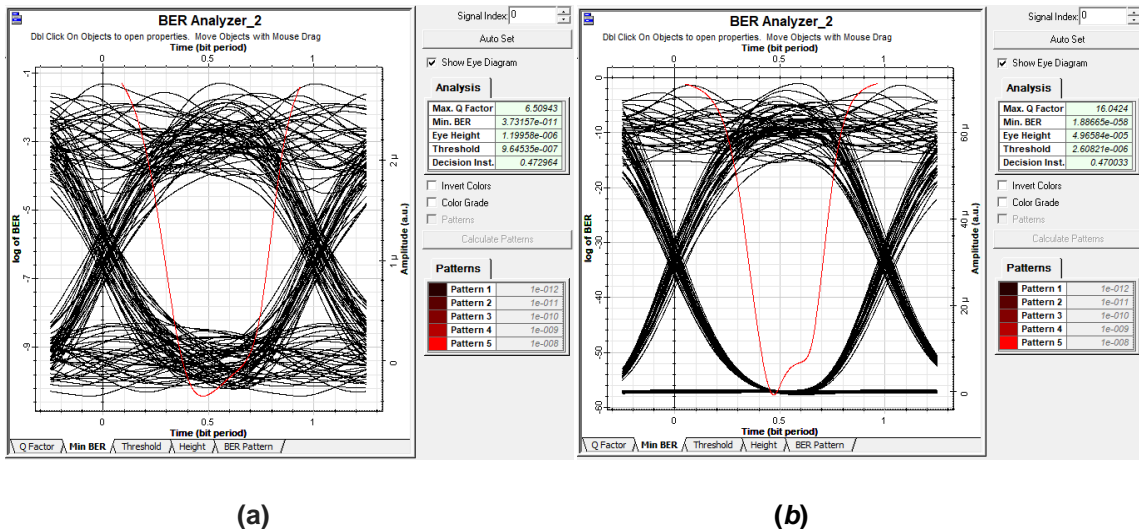


Figure 3.21 : Diagrammes de l'œil et le BER du système pour un débit 1GHz et une distance de 2Km(a) sans EDFA, (b) avec EDFA

La figure (3.22) suivante représente les diagrammes de l'œil et le BER du système pour un débit de 1GHz et une distance de 2Km pour différents cas de brouillard (Brouillard dense, Brouillard modéré, Brume, Temps clair)

Nous remarquons pour les deux premiers cas, que le système donne de mauvais résultats. Par contre, pour les deux cas derniers, le système donne de bons résultats (diagrammes à grande ouverture verticale de l'œil avec un BER qui dépasse la valeur  $10^{-9}$ ). Cela peut être expliqué par l'effet du brouillard à cette distance de 2Km qui limite la visibilité du système. Pour les deux premiers cas, nous pouvons obtenir des résultats acceptables pour de courtes distances.



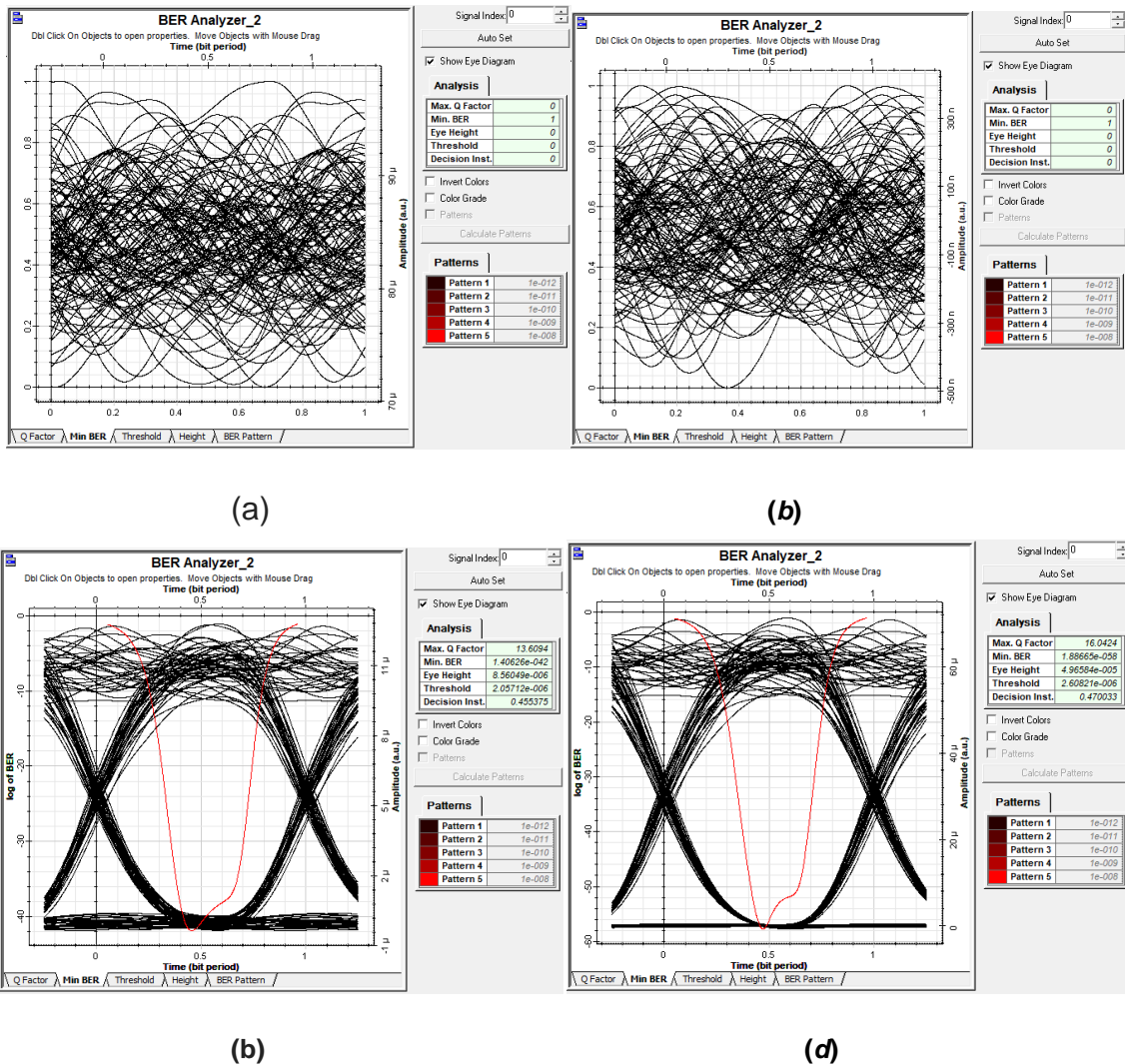


Figure 3.22 : Diagrammes de l'œil et le BER du système pour un débit 1GHz et une distance de 2Kmpour différents cas de brouillard. (a) Brouillard dense, (b) Brouillard modéré, (c) Brume, (d) Temps clair

### 3.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus lors de l'étude des performances du système SAC-OCDMA dans un canal FSO. L'étude a été réalisée en utilisant le code LSC et en tenant compte de l'effet de différents paramètres tels que : débit binaire, nombres d'utilisateur, diamètre de l'émetteur et du récepteur FSO, la divergence, l'atténuation et la distance. D'après les résultats,

nous pouvons dire que la portée maximale de transmission augmente avec l'augmentation du diamètre du récepteur et de la puissance émise. Cependant, elle diminue avec l'augmentation du débit, du facteur d'atténuation, de la divergence du faisceau, du diamètre de l'émetteur ainsi qu'avec le nombre d'utilisateurs dans le système de communication SAC-OCDMA sur le canal FSO. Nous avons vu également que l'utilisation d'un amplificateur EDFA améliore bien les performances du système.



# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

L'augmentation des besoins de transmission des données a introduit les techniques d'étalement de spectre, telles que la CDMA optique qui représente une des solutions possibles pour le partage des ressources dans les réseaux optiques. L'objectif de notre travail concerne l'évaluation des performances d'une liaison optique incohérente par répartition de codes spectrales optiques (SAC-OCDMA) dans un canal FSO. Les séquences de codes utilisés dans ce cas sont ceux obtenues par le code LSC caractérisé par une inter-corrélation nulle ce qui a permis d'utiliser un détecteur direct pour les restituer au niveau du récepteur.

Nous avons tracé le taux d'erreur binaire (BER) en fonction de différents paramètres de la liaison FSO et pour différentes situations météorologiques. En plus, l'estimation de la portée maximale à partir d'un BER acceptable a été effectuée. Un programme Matlab a été élaboré à cet effet. Ensuite, afin d'effectuer une simulation dans un contexte proche à la réalité, une modélisation et une évaluation des performances du système SAC-OCDMA dans un canal FSO ont été réalisées sous l'effet des phénomènes météorologiques à l'aide du logiciel Optisystem. Les résultats sont obtenus en termes de BER et de diagramme de l'œil.

Pour conclure, nous pouvons dire que ce travail nous a permis de vérifier les connaissances acquises au cours de notre formation, et grâce à un travail continu nous avons pu atteindre notre objectif et répondre au cahier des charges. Nous espérons que notre travail soit la base de toute une série d'améliorations que nous n'avons pas la possibilité de faire en raison de contraintes de temps. Nous proposons, par exemple, d'étendre notre étude pour autres types de codes et autres techniques de détection.

# **Bibliographies**

# BIBLIOGRAPHIES

- [1] F.Ben Ahmed,B.Kanoun. ‘Analyse des performances d’une communication optique en espace libre’, Thèse de doctorat écolesupérieure des communications de Tunis, 2015.
- [2] R.Kamilia, T.thinhinane. ‘Analyse des performances des codes SAC-OCDMA dans la liaison de télécommunications optiques’, Thèse de doctorat UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA, 2019.
- [3] Verneuil.J.’Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s. Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR. Limoges : Université de Limoges. 2003. 297.
- [4] F. OUAMBO, Baudelaire ‘Optimisation d’un banc de test amplifié à 10 gb/s pour l’étude des technologies avancées de transmission par fibre optique’Mémoire de masterprésentéa l’école de technologie supérieure, Montréal. 2008.
- [5] M. ElGibari ‘Conception optique et hyperfréquence d’un modulateur électro-optique sur polymère : optimisation de transitions ultra-large bande pour l’électrode de commande’. Thèse de doctorat Université de Nantes, 2009. Français
- [6] Victor Girondin. ‘Étude et modélisation d’un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio’. Thèse de doctorat Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016.
- [7] Hamidreza KHALEGHI. ‘Influence des amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sur la transmission cohérente de signaux optiques à format de modulation multi-porteuses (CO-OFDM)’. Thèse de doctorat École Nationale d’Ingénieurs de Brest (ENIB) e 30 Novembre 2012
- [8] Philippe Surmely.‘La fibre optique : Technologies et applications’, MASSON, SNEL S.A. Rue Saint-Vincent 12-4020 Liège juin 1995, Vol.223, 1995, ISBN édition 2-225-84822-3.
- [9] Altowij, A. A. ‘Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications’. Thèse de doctorat intech open science open minds.(2012)
- [10] ChaabaneChaouche Hicham, ‘Calcule exact du SNR et BER pour les systèmes SAC-OCDMA’, mémoire de master Université Dr Tahar Moulay – SAIDA, 2017
- [11] R. Sara E. Amina, ‘Encodage 3D pour les systèmes CDMA optique’, mémoire de master Université Dr. Tahar Moulay–Saida, 2018.
- [12] 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
- [13] OptiSystem Tutorials - Volume 1 Optical Communication System Design Software Version 13

## Résumé

Dans un système de communication optique par accès multiple en répartition de code (OCDMA) utilisant un codage spectral d'amplitude (SAC), il est difficile ou impossible d'effectuer une transmission avec un taux d'erreur binaire supérieur à  $10^{-9}$ . L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'effet de différents paramètres de la liaison FSO sur les performances du système SAC-OCDMA, utilisant le code LSC, en présence de différentes situations météorologiques. Pour cela, la portée maximale du système SAC-OCDMA, pour un BER= $10^{-9}$ , est déterminée pour différents cas de valeurs de paramètres. En plus et dans le but d'effectuer une simulation réelle, une modélisation du système SAC-OCDMA dans un canal FSO a été effectuée sous le logiciel Optisystem en tenant compte des différentes pertes dues au canal.

## Abstract

In a code division multiple access (OCDMA) optical communication system using amplitude spectral coding (SAC), it is difficult or impossible to perform transmission with a bit error rate greater than  $10^{-9}$ . The objective of this dissertation is to study the effect of different parameters of the FSO link on the performance of the SAC-OCDMA system, using the LSC code, in the presence of different meteorological situations. For this, the maximum range of the SAC OCDMA system, for a BER =  $10^{-9}$ , is determined for different cases of parameter values. In addition, and in order to perform a real simulation, a modeling of the SAC-OCDMA system in an FSO channel was carried out under the Optisystem software, taking into account the various losses due to the channel.

## ملخص

في نظام الاتصال البصري بتقسيم الشفرات (OCDMA) الذي يستخدم التشفير الطيفي السعة (SAC) ، يكون من الصعب أو المستحيل إجراء الإرسال بمعدل خطأ بتات أكبر من  $10^{-9}$ . الهدف من هذه الرسالة هو دراسة تأثير المعلومات المختلفة لرابط FSO على أداء نظام SAC-OCDMA ، باستخدام كود LSC ، في وجود حالات أرساد جوية مختلفة. لهذا، يتم تحديد النطاق الأقصى لنظام SAC OCDMA، لـ  $BER = 10^{-9}$ ، للحالات المختلفة لقيم المعلمات. بالإضافة إلى ذلك ومن أجل إجراء محاكاة حقيقية، تم إجراء نمذجة لنظام SAC-OCDMA في قناة FSO في إطار برنامج Optisystem، مع مراعاة الخسائر المختلفة بسبب القناة.