

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Mémoire de Fin d'Étude**

Présenté à

**L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued**

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

**En Télécommunications**

**Présenté par Encadrement :**

Mr: Ammari Belgacem

Mr: Madjouri Abdelkader

Mr: Harizi Abdelaziz

# **Thème**

**Analyse des performances d'une communication optique en  
espace libre**

Devant le jury composé de :

Melle. Boukaous chahra

Mr. Hettiri Massoud

**Année Universitaire 2015/2016**

## **Remerciement**

Louange à notre Seigneur "ALLAH" qui nous a dotés de la faculté de raisonnement.

Allah qui nous a donné la force et le courage afin de parvenir à élaborer ce modeste travail.

Puis à nos parents et nos familles, nous tenons à exprimer nos expressions de remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides et soutien

Nous remercions le professeur M. Majouri pour sa direction de cette mémoire, le grand soutien et pour ses orientations académiques et ses conseils judicieux et son grand cœur.

Nous tenons aussi à exprimer nos expressions de remerciement aux membres de jury pour leurs grands cœurs et le soutien qui nous a été touché profondément avec les précieux conseils.

**Dédicaces**

A nos parents,

A nos familles,

Et à tous nos amis

Nous dédions ce modeste travail.

## Sommaire

- i- Remerciement**
- ii- Dédicaces**
- iii- Sommaire**
- iv- Résumé**
- v- Liste figures et tableaux**
- vi- Introduction général**

1	Les liaisons optiques en espace libre.....	10
1.1	Introduction.....	10
1.2	Historique.....	10
1.3	Comparaison entre technologie.....	12
1.4	Applications.....	13
1.5	Avantages.....	13
1.6	Inconvénients.....	14
1.7	Les Éléments d'un système de télécommunication en espace libre.....	14
1.7.1	Émetteur.....	14
1.7.2	Récepteur.....	15
1.7.3	Environnement de transmission optique.....	16
1.8	Caractéristiques d'un système transmission optique en espace libre.....	16
1.8.1	La longueur d'onde.....	16
1.8.2	La divergence du faisceau.....	17
1.8.3	Le diamètre d'ouverture.....	17
1.8.4	La distance de la transmission.....	17
1.9	Conclusion.....	17
2	Environnement transmission optique.....	18
2.1	Introduction.....	18
2.2	Aérosols.....	18
2.3	La visibilité.....	19
2.4	L'atténuation atmosphérique.....	19
2.5	L'absorption.....	19
2.6	La diffusion atmosphérique.....	20
2.6.1	La diffusion de Rayleigh.....	20

# Analyse des performances d'une communication optique en espace libre

---

2.6.2	La diffusion de Mie .....	21
2.7	L'atténuation non sélective (la pluie).....	22
2.8	La turbulence.....	23
2.8.1	Structure de l'indice de réfraction .....	24
2.8.2	Scintillation.....	25
2.8.3	L'étalement du faisceau.....	25
2.9	L'atténuation totale .....	26
2.10	Conclusion.....	27
<b>3</b>	<b>Résultats de simulations et discussions.....</b>	<b>28</b>
3.1	Introduction.....	28
3.2	Atmosphérique .....	28
3.2.1	Design du système.....	29
3.2.2	Effet de brouillard.....	30
3.2.3	Effet de la pluie .....	31
3.2.4	Effet de la turbulence.....	33
3.2.5	Interprétation .....	35
3.3	Satellitaire .....	36
3.3.1	Design du système.....	36
3.3.2	Résultat de simulation et analyse.....	37
3.3.3	Interprétation .....	39
3.4	Comparaison.....	39
3.5	Conclusion.....	40
4	Conclusion général.....	41
5	Bibliographie.....	42

## Résumé

Dans la transmission en espace libre, avec une longueur d'onde bien choisit et une optimisation de la distance, on peut surmonter les problèmes atmosphériques pour avoir une liaison fiable, qui contribue dans l'infrastructure de la télécommunication en général et qui entre en orchestra avec les autres technologies qui sont en avance actuellement pour reprendre aux besoins très gourment du marché.

## Summary

In optical transmission in free space, with a wavelength well-chosen and optimization of the distance, we can overcome the atmospheric problems for an optical transmission link, which helps in the infrastructure of telecommunications in general and enter with others technologies which are in advance now for the needs of market.

## ملخص

في إطار الاتصال عبر الفضاء الحر باختيار طول موجة مناسب وتقدير في المسافات الملائمة يمكننا تجاوز العراقيل الجوية للحصول على روابط اتصال مثالية تساهم مع التقنيات القديمة في الهياكل القاعدية للاتصال استجابة للطلب المتزايد في سوق الاتصالات اللاسلكية

## **Liste Figures**

Figure 1 – Télégraphe optique de Mangin .....	11
Figure 2: Représentation schématisée du photophone de Graham Bell .....	12
Figure 3- Comparaison entre les différentes technologies .....	13
Figure 4- Système télécommunication en espace libre .....	14
Figure 5 : comparaison différents diffusions pour différents tailles particules .....	20
Figure 6- Design système atmosphérique .....	29
Figure 7- Design système satellitaire .....	36

## **Liste Tableaux**

Tableau 1 : Représentation des particules (Rayon et Concentration) .....	19
Tableau 2- différents Atténuations selon visibilité .....	30
Tableau 3- Resultat Simulation -Effet de brouillard .....	30
Tableau 4- Récapitulatif Simulation effet de Brouillard .....	31
Tableau 5- différents atténuation selon la pluie .....	31
Tableau 6- Résultats simulation effet de la pluie .....	32
Tableau 7- Récapitulatif simulation effet de la pluie .....	33
Tableau 8- Différents atténuations effet de la turbulence .....	33
Tableau 9- Resultats simulation effet de la turbulence .....	34
Tableau 10- Recapitulatif simulation effet de la turbulence .....	34
Tableau 11- Paramètres liaison satellitaire .....	37
Tableau 12- Resultats simulations liaison satellitaire .....	38
Tableau 13- Recapitulatif simulation liaison satellitaire .....	39

## Introduction général

La simplicité de mise en œuvre des communications optiques en espace libre, son faible coût par rapport aux liaisons fibrées, ainsi que les capacités importantes en termes de débit, contribuent à la mise en œuvre de tels systèmes de communication.

Aussi pour assurer des nouveaux services dans le monde des télécommunications tels que la téléphonie mobile 3G et 4G, les fournisseurs d'accès Internet et les opérateurs des réseaux mobiles ont besoin d'une nouvelle infrastructure pour leurs réseaux basées sur des liaisons à haut débit entre les stations de base . En d'autres termes, les réseaux qui existent déjà sont incapables d'assurer la qualité de service demandée aujourd'hui par le marché.

La disponibilité et la fiabilité d'une telle liaison dépend d'une variété de facteurs, y compris la fiabilité des équipements et la conception du réseau qui sont des facteurs bien connus et assez quantifiable, le plus grand défi est l'effet des paramètres climatiques et atmosphériques qui changent à travers le temps et selon la situation géographique.

Alors malgré les avantages que peuvent apporter les liaisons optiques en espace libre, les perturbations introduites par l'atmosphère limitent à la fois les distances de propagation et le débit.

Dans ce manuscrite, on dévoile tous sur ce type de liaison et on va essayer de mettre en évidence l'influence de l'atmosphère et de ses constituants sur la propagation d'un faisceau laser, en présentant une méthodologie permettant aux spécialistes dans le domaine d'évaluer en fonction des caractéristiques du système la possibilité d'installer une telle liaison.

Dans cette mémoire de fin d'étude et avec une méthodologie simple, dans trois chapitres on a essayé de faire le tout afin de guider notre travail à un but bien défini à une résultat final d'une méthode précise.

Dans le premier chapitre ces sont les introductions et les définitions présentés en trois étapes un tour historique puis une comparaison entre les technologies et en fin une vue détaillée sur les dispositifs utilisés et leur caractéristiques, ce qui permet de mettre une plateforme unique dans notre étude et qui fixe aussi nos objectifs de travail.

Le deuxième chapitre ce fixe sur l'environnement ou cette nouvelle technologie doit être appliqué, on détaille l'atmosphère lui-même dans leur constituants, on dévoile aussi les différents lois physique qui gère ses éléments en sorte qu'on arrive à faire une modélisation et présenter les

## Analyse des performances d'une communication optique en espace libre

---

équations qui manipulent ce système, certainement ils existent plusieurs éléments et plusieurs phénomènes qui se chevauchent entre eux, mais finalement la présentation d'une modélisation claire arrive à nous maitre dans le bon voie dans notre étude.

Le troisième et le dernier chapitre ouvre nos yeux et pose entre nos main une nouvelle technologie dans le monde des logiciels c'est « OptiSystem », un ensemble des applications conçus pour simuler tous les systèmes optiques et avec des cas spécifiques à notre étude on peut présenter nos modèles et faire ressortir des résultats.

## 1 Les liaisons optiques en espace libre

### 1.1 Introduction

Au même titre que les ondes radioélectriques, la lumière est une onde électromagnétique pouvant servir comme support de transmission des signaux porteurs d'information. En pratique, on varie la puissance optique émise par une source laser au rythme de l'information à transmettre.

Outre que la transmission fibrée, la transmission en espace libre, dans ces dernières années, a vu des progrès dans le domaine de la transmission des signaux numériques soit dans le vide (entre les satellites) ou atmosphérique (entre deux bâtiments en vue l'un de l'autre).

Cette technologie permet de faire des liaisons des distances allant de quelques mètres à quelques kilomètres dans l'atmosphère terrestre et plusieurs centaines de kilomètres dans l'espace.

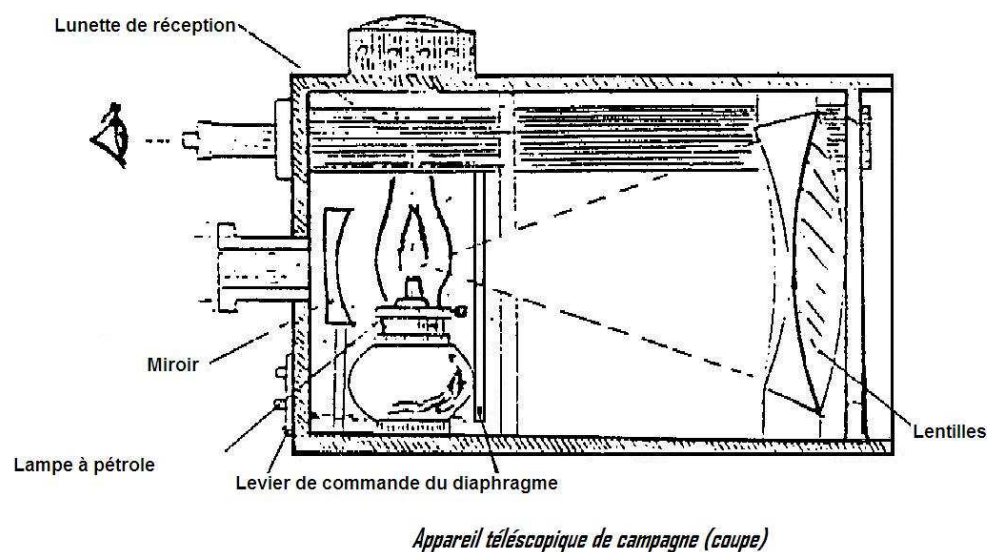
Dans ce chapitre, on va faire un tour historique décrivant la naissance de la transmission optique, la comparaison avec les technologies similaires, les avantages et les inconvénients, les applications existantes et aussi les caractéristiques d'une liaison

### 1.2 Historique

Il est hors de la portée de ce manuscrit de faire un historique complet des techniques que l'Homme a pu mettre en place afin d'établir des communications en utilisant des signaux optiques. Cependant, certaines avancées techniques suffisamment marquantes doivent être mentionnées, car elles renferment le principe des réseaux actuels de LOA. Il en est ainsi du télégraphe optique aérien de Claude Chappe basé sur le principe des sémaphores [1].

En 1844, on compte plus de 500 tours de Chappe reliant les plus importantes villes Françaises, créant l'un des tous premiers réseaux de communication optique.

Le télégraphe optique de Mangin peut quant à lui être présenté comme un exemple de système précurseur des systèmes de télécommunications optiques en espace libre actuels. Il reste en de nombreux points similaires aux systèmes modernes. Le télégraphe optique de Mangin utilise une lampe à pétrole comme source de lumière permettant de créer un faisceau de lumière parallèle et un obturateur qui transmet les données grâce au code Morse. Une lunette sert à l'alignement des appareils et à la réception des messages.



**FIGURE 1 – Télégraphe optique de Mangin[2]**

Avec l'invention du photophone en 1880, Alexandre Graham Bell [3] démontre l'efficacité de l'utilisation d'un signal optique (ici le rayonnement solaire) pour transmettre de l'information, la voix, en utilisant la modulation d'intensité. La distance sur laquelle il établit la liaison est de 200m [4].

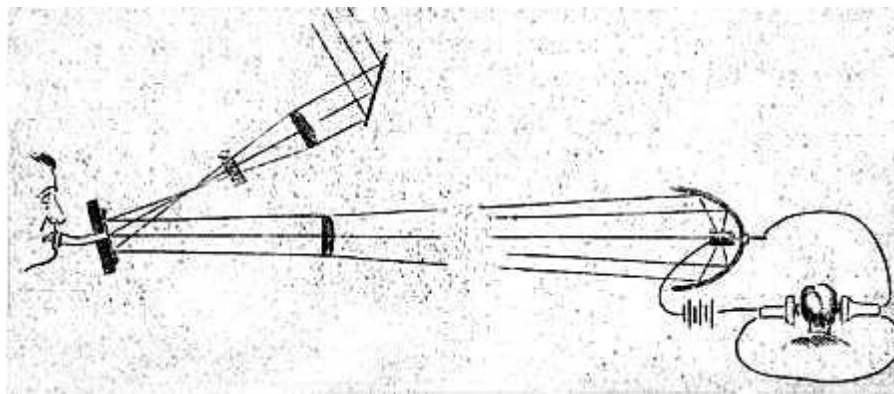
La variabilité de la source lumineuse (le soleil) et la courte distance de propagation limitée par la faible sensibilité du système de détection auront raison de son invention.

La communauté scientifique essaye, depuis les années 1960 et l'invention du laser, de mettre en place des communications en espace libre en utilisant un signal optique pour établir un lien de transmission en ligne de visée directe. Les premières applications sont développées pour des liaisons vers des satellites [5],[6].

Malheureusement, la durée de vie limitée des lasers, leur encombrement et leur puissance lumineuse insuffisante provoquent le déclin rapide de l'intérêt envers cette technologie.

L'apparition, dans les années 1980, des lasers à semi-conducteur ayant une durée de vie importante, un encombrement réduit et un rendement élevé, contribue à l'émergence des programmes de communication laser de la part de l'Europe et des Etats-Unis [7].

Les lasers, étant des sources directives à fortes puissances, permettent de travailler avec des rapports signal-à-bruit (SNR) élevés dès lors qu'il sont associés à des détecteurs modernes, ce qui faisait



**FIGURE 2 – Représentation schématisée du photophone de Graham Bell [8].**

Sous l'influence de la parole, le miroir se déforme et module l'intensité lumineuse provenant du soleil arrivant à la réception. Le récepteur en sélénium voit sa résistance varier en fonction de l'intensité lumineuse reçue et permet de récupérer l'information. Défaut au photophone de Bell. Nous verrons, que travailler avec des SNR élevés est la condition sine qua none pour atteindre des débits de communication élevés. De nombreux systèmes de télécommunications en espace libre (Free Space Optics, FSO) sont alors proposés pour de multiples scénarios : air-air, satellite-sous-marin, air-sous-marin, air-satellite ou satellite-satellite. Cependant, la plupart de ces projets sont abandonnés pour diverses raisons : temps de mise sur le marché (time to market) considéré comme trop long à cause du temps nécessaire au développement technologique, coût financier trop élevé, volonté politique de favoriser d'autres projets jugés prioritaires...

Depuis les années 1990, une forte demande en bande passante et la maturité technologique des composants développés pour les communications optiques fibrées relancent le développement des télécommunications en espace libre. Compte tenu des grandes variations de transmission induites par les conditions atmosphériques très changeantes (précipitations, aérosols, ...) et du besoin d'une grande disponibilité pour les applications visées, les premiers systèmes développés concernent des liaisons à courtes portées (typiquement quelques centaines de mètres).

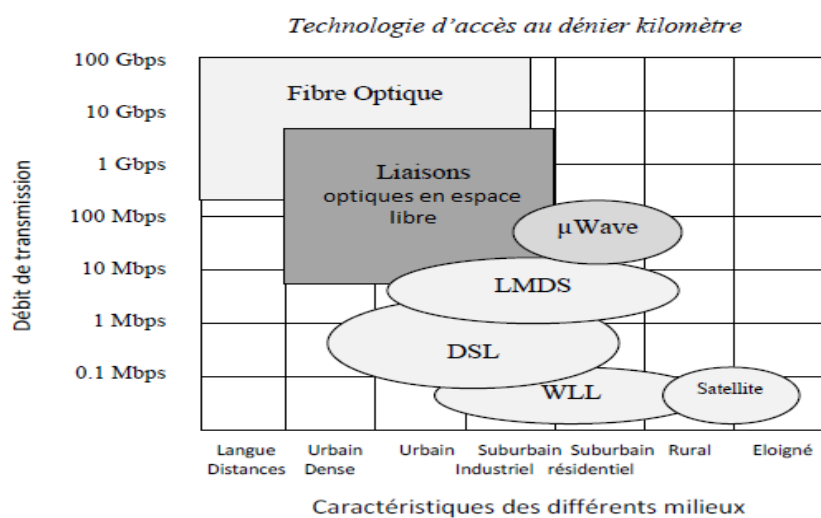
### **1.3 Comparaison entre technologie**

Les liaisons optiques atmosphériques reposent sur la propagation de la lumière en espace libre pour transmettre des informations entre émetteur et récepteur. Ces liaisons sont en générale de type point à point. Il existe aussi des liaisons point à multipoints mais comme il est difficile d'avoir un discours général englobant l'ensemble des cas nous aborderons seulement les liaisons uniques point-point.

# Analyse des performances d'une communication optique en espace libre

L'optique en espace permet de résoudre les inconvénients d'une connexion type fibrée, souvent longue et coûteuse à mettre en place. En outre, l'absence de la nécessité de licence et l'absence d'interférence, une sécurisation naturelle assurée et N'oubliant pas aussi le haut débit présentent des avantages par rapport aux liaisons hertziennes classiques.

De manière conceptuelle, une liaison optique en espace libre peut jouer en orchestre avec les deux techniques technologiquement en avances pour résoudre le grand défi de la télécommunication qui est l'élaboration des ressources en capacité .La figure suivante montre la position importante des liaisons optiques en espace libre.



**Figure 3-Comparaison entre les différentes technologies[9]**

## 1.4 Applications

Parmi les applications de la liaison optique en espace libre[10], citons ce qui suit :

- ☒ Réseau urbain
- ☒ Domaine informatique
- ☒ Spatial entre engins spatiaux
- ☒ Militaire
- ☒ Metro
- ☒ Trafic téléphonie entre antennes

## 1.5 Avantages

Parmi les avantages de la liaison optique en espace libre[11], citons ce qui suit :

- ☒ Distance jusqu' à 8 Km
- ☒ Haut débit
- ☒ Manque interférences
- ☒ Aucun danger pour la santé
- ☒ Taux erreur faible
- ☒ Déploiement et réalisation rapide
- ☒ Cout réduit
- ☒ Licence non nécessaire

## 1.6 Inconvénients

Ce qui suit présente les problèmes major de la liaison optique[12]

- ☒ Sensibilité aux conditions atmosphériques
- ☒ Les obstacles posent un problème
- ☒ Limitation dans la puissance

## 1.7 Les Éléments d'un système de télécommunication en espace libre

La communication en espace libre est une technologie qui utilise un faisceau laser pour envoyer les données numériques à haute bande passante d'un point à une autre à travers l'atmosphère.

Le système de transmission en espace libre comprend trois éléments émetteurs, canal et récepteur voir :

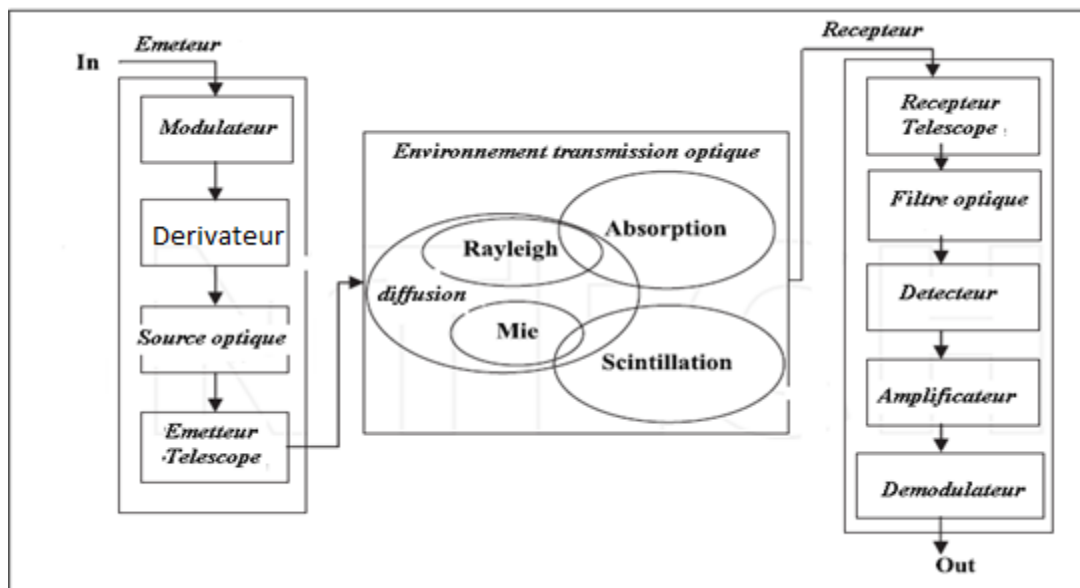


Figure 4-Système télécommunication en espace libre [13]

### 1.7.1 Émetteur

L'émetteur transforme le signal électrique en un signal optique et module le faisceau laser pour transférer des données vers le récepteur à travers le canal atmosphérique. Il est constitué de quatre parties :

## **1.7.1.1 Modulateur**

Au moyen de la modulation laser les données seront portées par un faisceau laser[10]. On cite parmi les techniques utilisées les techniques suivantes :

- ☒ OOK « On-Off Keying »
- ☒ PPM « Pulse Position Modulation »
- ☒ MPPM « Multi-pulse Position Modulation »

## **1.7.1.2 Dérivateur**

Circuit de commande transforme un signal électrique en signal optique.

## **1.7.1.3 Source optique**

La source optique peut être une diode laser ou diode électro munissent [14]

## **1.7.1.4 Télescope émetteur**

Elle recueille et dirige les rayonnements optiques vers le récepteur [15].

## **1.7.2 Récepteur**

Le récepteur reçoit le signal optique et le transforme en signal électrique .il est constitués de cinq parties.

### **1.7.2.1 Télescope récepteur**

Elle collecte et focalise les rayonnements optiques entrants. On note qu'une grande ouverture est souhaitable car elle recueille des rayonnements multiples [16].

### **1.7.2.2 Filtre optique**

En introduisant les filtres optiques pour filtrer la longueur d'onde désirée et rejeter les autres. Donc l'effet de l'éclairement solaire peut être considérablement réduit au minimum [17].

### **1.7.2.3 Détecteur**

Le détecteur est une photodiode, dispositif à semi-conducteur qui converti la lumière en signal électrique [18]. Le principe de fonctionnement se base sur la photo conductivité [19].

### **1.7.2.4 Amplificateur**

Il amplifie le signal électrique à l'usage avant le démodulateur.

### **1.7.2.5 Démodulateur**

Au moyen de démodulateur le signal retourne à son valeur initiale exploitable par l'utilisateur

## 1.7.3 Environnement de transmission optique

Le milieu de propagation de la lumière est une série des couches concentriques de gaz citons la troposphère, la stratosphère et la mésosphère .ces couches se distinguent par leurs températures leurs compositions gazeux et leurs altitudes.

On s'intéresse beaucoup plus sur la dernière couche ou il se passe généralement la transmission optique.

Dans le chapitre suivant, on traite en détaille les événements atmosphériques qui réagissent pendant la transmission.

## 1.8 Caractéristiques d'un système transmission optique en espace libre

Le système de transmission optique en espace libre se réfère à la transmission modulée visible ou infrarouge des faisceaux à travers l'atmosphère pour obtenir des communications à large bande. Cette technique nécessite ligne directe entre émetteur et récepteur. Les éléments d'un tel système doit être conçu avec prudence en tenant compte de :

- La longueur d'onde
- L'angle de la divergence du faisceau
- Les diamètres des ouvertures
- La distance de transmission

### 1.8.1 La longueur d'onde

Pour choisir la meilleur longueur d'onde de transmission optique en espace libre, nous devons tenir compte de plusieurs facteurs, tels que :

- La disponibilité des composants
- La sécurité des yeux
- La distance de transmission
- Le cout

La sécurité des yeux est l'une des restrictions les plus importantes au niveau de la puissance émise par un émetteur.

Les puissances de laser les plus élevées peuvent être utilisée en toute sécurité avec 1550 nm et avec prudence avec 850nm et 780 nm.

## 1.8.2 La divergence du faisceau

Il faut faire attention à la divergence du faisceau de transmission d'un laser, typiquement un angle de divergence d'1mrad à 8mrad provoque un éloignement de 1 m à 8 m à un kilomètre de distance.

## 1.8.3 Le diamètre d'ouverture

Un plus petit diamètre à l'ouverture de l'émetteur et un plus grand diamètre à l'ouverture de récepteur sont nécessaires pour établir un lien de communication à haut débit.

Aussi les diamètres des ouvertures doivent être adaptés aux conditions météorologiques, lorsque le faisceau laser se propage à une distance à partir de la source et si la cellule de la turbulence est plus grande que le diamètre du faisceau et le diamètre de l'ouverture au récepteur est faible le faisceau se vagabonde dans l'espace. Alors une grande ouverture réduit l'effet de la turbulence.

## 1.8.4 La distance de la transmission

La distance entre émetteur et récepteur un impact sur le rendement du système de transmission pour deux raisons.

- ☒ Dans les conditions météorologiques claires le faisceau diverge
- ☒ Les pertes augmentent avec la distance

Pour cela, on remarque que la plupart des systèmes atmosphériques fonctionnent de 25-5000m et les systèmes satellitaires arrivent à 2000km seulement.

## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a pris en général les caractéristiques d'un système de transmission optique en espace libre, on a abordé seulement les éléments contrôlables disponible au marché.

En rendant aux connaissances que les produits à 1550 nm sont les plus chères au marché par rapport aux anciennes technologies 850 nm et 780 nm.

Dans le prochain chapitre on abordera les éléments non contrôlables, ce sont les éléments existants dans l'environnement de l'espace lui-même.

## 2 Environnement transmission optique

### 2.1 Introduction

Les performances de tout système optoélectronique sont non seulement déterminées par ses caractéristiques techniques intrinsèques résultantes de la conception et de la technologie utilisée, mais également par son comportement dans son environnement. La disponibilité des liaisons optiques sans fils dépend d'une variété des facteurs, y compris la fiabilité des équipements et la conception du réseau, le plus grands défi inconnue est l'effet de l'atténuation atmosphérique (brouillard, pluie, neige ....etc.).

Même une atmosphère propre et claire, elle est composée des molécules d'oxygène, d'azote et d'autres constituants peuvent exister en particulier dans les régions continentales polluées. Ces particules et molécules peuvent diffuser et/ou absorber les photons lumineux qui se propageant dans l'atmosphère et par conséquent atténue le signal lumineux. Ce qui fait que la conception d'un système de télécommunications optique en espace libre nécessite une bonne connaissance des propriétés optiques de l'atmosphère.

Dans ce chapitre, nous allons voir l'influence de l'atmosphère terrestre comme milieu de propagation sur la transmission des signaux optique laser en mettant l'accent sur les phénomènes physiques qui sont l'absorption, la diffusion et la turbulence optique.

### 2.2 Aérosols

Les aérosols sont les ensembles de particules fines, solides ou liquides, d'une substance chimique ou un mélange, émis par les activités humaines ou naturelles comme les volcans, les incendies ....etc.

Les aérosols peuvent varier dans leurs distributions, leurs constituants et leurs concentrations. La plus grande concentration des aérosols se trouve dans la couche limite à 2 km de la surface terrestre.

La principale interaction entre les aérosols et un faisceau de lumière est la diffusion parce que les tailles des particules sont comparables à la longueur d'onde optique.

Type	Rayon ( $\mu\text{m}$ )	Concentration (1 / $\text{cm}^3$ )
Molécules d'air	$10^{-4}$	$10^{19}$
Aérosols	$10^{-2}$ à 1	$10$ à $10^3$
Brouillard	1 à 10	10 à 100
Nuage	1 à 10	100 à 300
Pluie	$10^{+2}$ à $10^{+4}$	$10^{-5}$ à $10^{-2}$
neige	$10^{+3}$ à $5 \times 10^{+3}$	-
grêle	$5 \times 10^{+3}$ à $5 \times 10^{+4}$	-

**Tableau 1 : Représentation des particules [20]**

## 2.3 La visibilité

La visibilité est déterminée par la distance maximale où un objet n'est plus distinguable par un observateur. Elle est mesurée avec une diffusion-mètre. Cette grandeur se présente en [m] ou en [Km].

Techniquement, c'est la distance où un signal optique de 550nm longueur d'onde se réduit à 0.02 de sa valeur initiale.

La faible visibilité diminue l'efficacité du système de transmission et elle réagit pendant une période spécifique dans l'année ou à des moments précis dans la journée.

## 2.4 L'atténuation atmosphérique

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 :

$$Att = \exp(-\beta * L) \dots\dots\dots 1 \quad [21]$$

Où :

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

## 2.5 L'absorption

L'absorption atmosphérique résulte de l'interaction entre les photons du rayonnement incident et les atomes ou les molécules de l'atmosphère[22]. Ceci conduit à la disparition des photons incidents, à l'élévation de la température[23]. Le nombre des photons du rayonnement se réduit tout au long le parcours. Le coefficient d'absorption dépend du type de particules et de leur concentration[13].

Il est possible de calculer le coefficient d'absorption avec la concentration des particules et la section transversale effective telle que :

$$\beta_{\text{abs}} = \alpha_{\text{abs}} * N_{\text{abs}} \dots 2 \text{ [21]}$$

Ou :

- $\alpha_{\text{abs}}$ : la section transversale effective des particules d'absorption [km<sup>2</sup>].
- $N_{\text{abs}}$ : la concentration des particules d'absorption [1/km<sup>3</sup>].

## 2.6 La diffusion atmosphérique

Elle résulte de l'interaction d'une partie du rayonnement incident avec les atomes et/ou les molécules dans le milieu de propagation, ce qui provoque une redistribution angulaire de cette partie avec ou sans modification de la longueur d'onde incidente

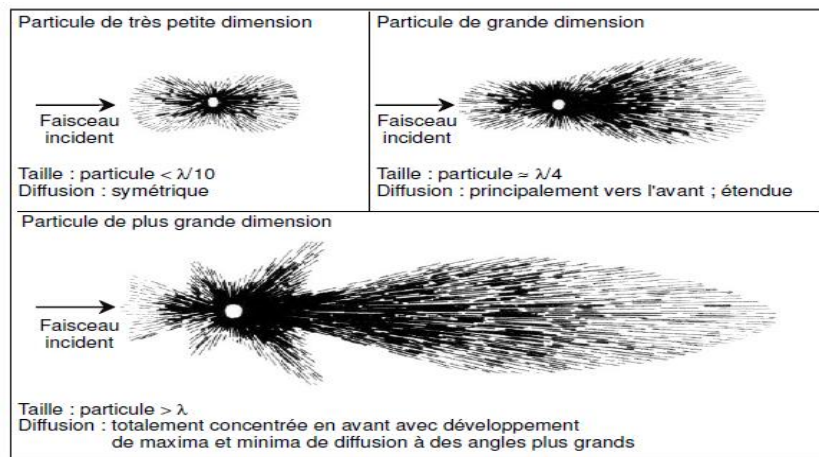


Figure 5 : comparaison différents diffusions pour différents tailles particules [24]

Il existe trois principaux types de diffusions :

- ☒ La diffusion de Rayleigh
- ☒ La diffusion de Mie
- ☒ La diffusion non sélective

### 2.6.1 La diffusion de Rayleigh

La diffusion de Rayleigh [25] se réfère à la diffusion par les gaz atmosphériques moléculaires de dimension beaucoup moins que la longueur d'onde de la lumière incidente. Le coefficient de diffusion de Rayleigh est donné par l'équation

$$\beta_m = \alpha_m * N_m \dots 3 \text{ [21]}$$

Ou:

- $N_m$ : La densité de nombre de molécules d'air
- $\alpha_m$ : La section efficace de diffusion Rayleigh.

La section de diffusion efficace de Rayleigh est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la longueur d'onde du faisceau incident ( $\lambda^{-4}$ ):

$$\alpha_m = \frac{8\pi^3(n^2-1)^2}{3N^2\lambda^4} \dots 4 \text{ [21]}$$

Où :

- $n$ : L'indice de réfraction.
- $\lambda$ : La lumière de longueur d'onde incidente.
- $N$ : La densité volumétrique des molécules.

La diffusion de Rayleigh est négligeable dans la gamme d'ondes infrarouge et elle est importante dans l'ultraviolet à la gamme d'onde visible.

## 2.6.2 La diffusion de Mie

La diffusion de Mie [26] se produit lorsque le diamètre des particules est égal ou supérieure à un dixième de la longueur d'onde incidente, elle est la principale cause de l'atténuation pour les longueurs d'onde conçus pour la communication en espace libre.

La transmission optique en espace libre est principalement plus atténuée par les gouttelettes d'eau, le brouillard et la brume en raison de la dominance de Mie.

Les niveaux d'atténuation sont trop élevés et ne sont pas souhaitables évidemment. L'atténuation due à la diffusion de Mie peut atteindre des valeurs de centaines de dB / km. Le coefficient de diffusion de Mie exprimé sous la forme :

$$\beta_a = \alpha_a * N_a \dots 5 \text{ [21]}$$

Ou:

- $\alpha_a$ : La section efficace de diffusion de Mie.
- $N_a$ : La densité de nombre de molécules d'air

La concentration et la composition de l'aérosol et la distribution de dimension varient dans l'espace et le temps, il est donc difficile de prévoir l'atténuation par les aérosols. Bien que leur concentration est étroitement liée à la visibilité optique. En raison du fait que la visibilité est un

## Analyse des performances d'une communication optique en espace libre

---

paramètre facile à obtenir, soit à partir des données de l'aéroport ou de la météo, le coefficient de diffusion  $\beta_a$  peut être exprimé en fonction de la visibilité et de la longueur d'onde par l'expression suivante :

$$\beta_a = \left(\frac{3.91}{v}\right) \left(\frac{0.55\mu}{\lambda}\right)^i \quad \dots 6 [21]$$

Ou :

- $v$ : La visibilité.
- $\lambda$ : Longueur d'onde.
- $i$ : La distribution de la taille des particules de diffusion qui varie généralement entre 0,7 à 1,6

Ou :

- $i = 1.6$  pour  $V > 50$  Km
- $i = 1.3$  pour  $6 \text{ Km} \leq V \leq 50 \text{ Km}$
- $i = 0.585 V^{1/3}$  1.6 pour  $V < 6$  Km

Puisque nous négligeons l'atténuation d'absorption alors :

$$\beta_{\text{dif}} = \beta_a$$

Donc l'atténuation atmosphérique sera :

$$\tau = \exp(-\beta_a * L) \text{ par contre en db } \tau = 4.34 \beta_a L$$

### 2.7 L'atténuation non sélective (la pluie)

La pluie est formée par la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. Elle est constituée de gouttes d'eau dont la forme et le nombre sont variables dans le temps et l'espace. Leur forme dépend de leur taille. Elles sont considérées comme des sphères de rayons allant jusqu'à 1 mm et sous la forme de sphéroïdes aplatis[27].

Les particules de brume sont très petites et restent plus longtemps dans l'atmosphère, mais les gouttes de pluie sont très grandes et ne restent plus longtemps dans l'atmosphère. Ceci est la première raison pour que l'atténuation par la pluie soit inférieure à la brume. Le coefficient de diffusion de pluie peut être calculé à l'aide de :

$$\beta_{\text{pluie dif}} = \pi a^2 N_a Q_{\text{dif}} \left(\frac{a}{\lambda}\right) \quad \dots 7 [21]$$

Où :

- a: Le rayon des gouttes.
- $N_a$ : La distribution de gouttes de pluie.
- $Q_{dif}$ : L'efficacité de la diffusion.
- $\lambda$ :longueur d'onde.

La distribution des gouttes de pluie peut être calculée avec l'équation :

$$N_a = \frac{R}{1.33(\pi a^3)V_a} \quad \dots 8 [21]$$

Où :

- R: le taux de précipitations.
- $V_a$ : la précipitation de la vitesse limite.

La vitesse de pluie est aussi donné par :

$$V_a = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} \quad \dots 9 [21]$$

Où :

- $\rho$ : la densité de l'eau.  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$
- g: constante gravitationnelle=  $9.8 \text{ cm/s}^2$
- $\eta$ : la viscosité de l'air.  $\eta = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm.s}$

L'atténuation de pluie peut être calculée en utilisant la loi de BEER que :

$$\tau = \exp(-\beta_{\text{pluie dif}} L) \quad \dots 10 [21]$$

## 2.8 La turbulence

Comme le sol se réchauffe par le soleil, l'air se réchauffe aussi, certaines cellules d'air ou poches d'air se réchauffent plus que les autres cela provoque des changements dans le milieu[28].

Lorsqu'une onde électromagnétique à une longueur d'onde visible ou infrarouge se propage à travers un milieu turbulent, l'amplitude et la phase du champ électrique subissent des fluctuations. Ces fluctuations sont la conséquence des variations de l'indice de réfraction[29].

Diverses approches théoriques ont été développées pour décrire ces fluctuations. Elles se basent généralement sur une résolution analytique de l'équation de propagation. Malheureusement, il n'est pas simple de résoudre rigoureusement l'équation de propagation dans le cas général[30],[31].

Cette difficulté intrinsèque a poussé à l'élaboration d'un nombre important de théories heuristiques principalement pour les régimes de fortes perturbations[32].

Commençant par un milieu isotrope[33], l'indice de réfraction dans un milieu de température T et pression P est donnée par la formule :

$$n - 1 \approx 79 \times \frac{P}{T} \quad \dots 11 [21]$$

Où :

- P: La pression atmosphérique [mbar].
- T: La température en degrés Kelvin [K].

## 2.8.1 Structure de l'indice de réfraction

L'indice de réfraction  $C_n^2$  est le paramètre le plus important qui détermine l'intensité de la turbulence. Le modèle le plus connue pour présenter cet indice est le modèle de Hufnagel-Valley[34] :

$$C_n^2(h) = 0.00594(v/27)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-\frac{h}{1500}) + A_0 \exp(-\frac{h}{100}) \quad \dots 12 [21]$$

Où :

- h : l'altitude en [m].
- v : la vitesse du vent à haute altitude [m / s].
- $A_0$  : l'intensité de la turbulence au niveau du sol,  $A_0 = 1.7 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ .

La turbulence a deux effets principaux :

- ☒ Scintillation.
- ☒ Etalement du faisceau.

## 2.8.2 Scintillation

Scintillation peut être la plus notable pour les systèmes des transmissions optiques en espace libre. Dans les longues distances, la scintillation fait subir l'onde à des fluctuations d'intensité, même sur la propagation relativement courte[35], L'indice de scintillation,  $\sigma_i^2$  décrit une fluctuation présentée par :

$$\sigma_i^2 = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad \dots 13 [21]$$

Où :

- $I = |E|^2$ : est l'irradiante du signal (ou intensité).

La force de scintillation peut être mesurée en fonction de la variation de l'amplitude du faisceau  $\sigma_i$  donnée par :

$$\sigma_i^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad \dots 14 [21]$$

Ici,  $k = 2\pi / \lambda$  est le nombre d'onde et cette expression suggère que des longueurs d'onde d'une variance plus faible.

## 2.8.3 L'étalement du faisceau

L'étalement du faisceau décrit l'élargissement de la taille du faisceau. Ici, nous décrivons le cas d'un étalement du faisceau pour un faisceau gaussien, à une distance L de la source, lorsque la turbulence est présente. Ensuite, on peut présenter l'étalement du faisceau dans la moyenne des temps tel que présenté dans l'équation[36].

$$I(l, r) = \frac{2P_0}{\pi \omega_{eff}^2(l)} \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_{eff}^2(l)}\right) \quad \dots 15 [21]$$

Où :

- $P_0$  : la puissance totale du faisceau.
- $r$ : la distance radiale à partir du centre du faisceau.

Le faisceau connaîtra une dégradation de la qualité en conséquence la moyenne de taille du faisceau dans le temps sera  $w_{eff}(l) > w(l)$ . Pour quantifier la quantité d'étalement du faisceau, on décrit le faisceau moyen efficace de taille comme

$$\omega_{eff}(l)^2 = \omega(l)^2 (1 + T) \quad \dots 16 [21]$$

Où :

- $w(l)$  : la taille du faisceau que

Après une distance de propagation :

$$\omega(l)^2 = \left[ \omega_o^2 + \left( \frac{2L}{k\omega_o} \right)^2 \right] \dots 17 [21]$$

$w_0$  : la taille du faisceau initial à  $L = 0$ ,

$T$  : l'étalement supplémentaire du faisceau causé par la turbulence.

Avec :

$$T = 1.33\sigma_i^2 \Lambda^{5/6} \dots 18 [21]$$

Tandis que le paramètre  $\Lambda$  est donnée par :

$$\Lambda = \frac{2L}{k\omega^2(l)} \dots 19 [21]$$

Comme on le voit dans d'autres chiffres de la turbulence de fond  $w_{\text{eff}}(l)^2$  dépend de la force de turbulence et le chemin du faisceau . De toute façon, en raison du fait que  $w_{\text{eff}}(l) > w(l)$  l'onde subisse une perte au centre du faisceau sera égal :

$$L_{BE} = 20 \log_{10}(\omega(l)/\omega_{\text{eff}}(l)) (dB) \dots 20 [21]$$

## 2.9 L'atténuation totale

L'atténuation atmosphérique du système de transmission est généralement dominée par la brume, le brouillard et également dépendant de la pluie. L'atténuation totale est une combinaison d'atténuation atmosphérique dans l'atmosphère et la perte géométrique[37].

L'atténuation totale pour le système de transmission est en effet très simple :

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{d_2^2}{(d_1 + (\theta L))^2} \times \exp(-\beta L) \dots 21 [21]$$

Où :

- $P_t$ : Puissance transmise [mw].
- $P_r$ : Puissance reçue [mw].
- $\theta$ : Divergence du faisceau [mrad].
- $\beta$ : Coefficient de diffusion totale [ $1 / \text{km}$ ].
- $d_1$  : Diamètre d'ouverture émetteur.
- $d_2$  : Diamètre d'ouverture récepteur.

En regardant cette équation, les variables qui peuvent être contrôlés sont les tailles des ouvertures, la divergence faisceau et la distance. Le coefficient de diffusion est incontrôlable dans un environnement extérieur.

Dans les situations atmosphériques réelles, pour les disponibilités à 99,9% ou mieux, le concepteur peut choisir des normes convenables pour l'émetteur, une grande ouverture au niveau de la réception, petite ouverture de l'émetteur et petite divergence du faisceau. Autre variable qui peut être contrôlé est la distance de liaison, qui doit être d'une courte distance pour veiller à ce que l'atténuation atmosphérique en total non influente.

## 2.10 Conclusion

Les systèmes de communication en espace libre sont affectés par l'affaiblissement atmosphérique qui limite leur performance et leur fiabilité. L'atténuation atmosphérique par le brouillard, la brume, la pluie, et la turbulence a un effet néfaste. La majeure partie de la dispersion produite est due à la diffusion de Mie. Cette diffusion est due au brouillard et la brume aérosols existants à l'atmosphère. Cette diffusion est calculée grâce à la visibilité. L'atténuation à un brouillard épais peut atteindre des valeurs de centaines de dB. La diffusion de la pluie (diffusion non-sélective) est indépendante de la longueur d'onde.

La perte géométrique dépend la conception des composants tels que la divergence du faisceau, les deux diamètres d'ouverture émettrice et réceptrice.

L'atténuation totale dépend de l'atténuation atmosphérique et les pertes géométriques. Afin de réduire l'atténuation totale, le système doit être conçu de telle sorte que l'effet de la perte géométrique et l'atténuation atmosphérique est faible.

## 3 Résultats de simulations et discussions

### 3.1 Introduction

Pour faire la simulation, on a utilisé une étude faite à la république de l'Yémen vue la ressemblance atmosphérique. Le logiciel utilisé dans cette étude est OptiSystem. C'est un ensemble des applications conçus pour simuler tous les systèmes optiques.

Dans ce chapitre, on simulera les deux systèmes :

- Système de transmission atmosphérique
- Système de transmission satellitaire

### 3.2 Atmosphérique

Le système de transmission optique en espace libre utilise le faisceau laser pour transférer les données à travers l'atmosphère. Les mauvaises conditions atmosphériques ont des effets néfastes sur les performances de transmission en espace libre. Ces effets pourraient se traduire par une transmission avec une qualité insuffisante et par fois l'échec dans la communication. Ainsi, la mise en service d'un tel système nécessite l'étude des conditions météorologiques et faire la conception d'un modèle local prédictif pour prendre les mesures nécessaires lors de la conception et la réalisation.

L'étude des conditions météorologiques d'un modèle locale nous aident à déterminer les effets d'atténuation atmosphériques sur la communication optique en espace libre qui se produit au rayon laser dans cette zone. Dans cette partie de ce travail, nous allons discuter les effets de l'atténuation atmosphérique au cours de la pluie et les jours brumeux et la turbulence atmosphérique pendant les jours clairs sur la performance du système de transmission optique en espace libre.

## 3.2.1 Design du système

La liaison se compose d'un émetteur et récepteur optique, filtre de Bessel et analyseur de taux d'erreur binaire (BER) pour analyser le résultat. Au niveau d'entrée un laser est utilisé pour fournir la source de la lumière à la liaison. La liaison de simulation est représentée sur la figure ci-dessous.

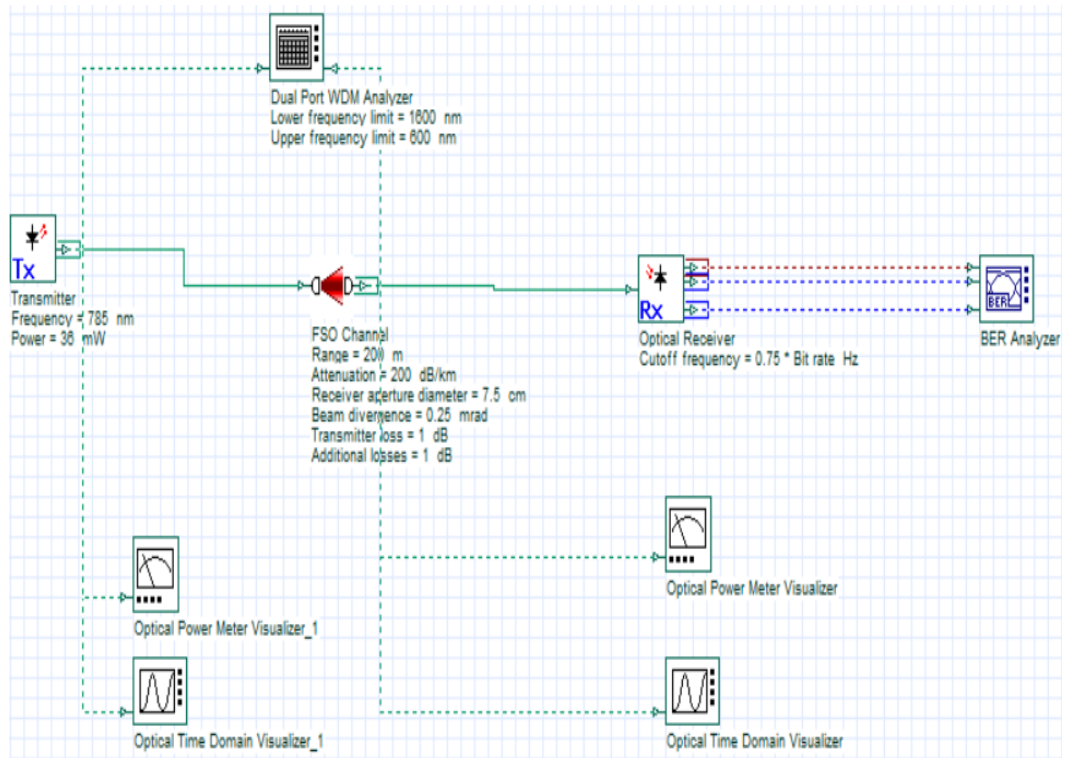


Figure 6- Design système atmosphérique

## 3.2.2 Effet de brouillard

Faire la simulation en changeant chaque fois l'atténuation selon la distance et la longueur d'onde le résultat 4.1.1 montre les différents diagrammes d'œil et le taux d'erreur binaire (BER) avec facteur de qualité (QFACT) seront enregistré

Visibilité	Longueur d'onde	5 km	0.5km
		Atténuation (db)	Atténuation (db)
Faible	780nm	17.6	2.4
	850nm	16.8	2.2
	1550nm	12.1	1.2
Moyenne	780nm	1.7	1.1
	850nm	1.5	0.99
	1550nm	0.69	0.46

Tableau 2- différents Atténuations selon visibilité

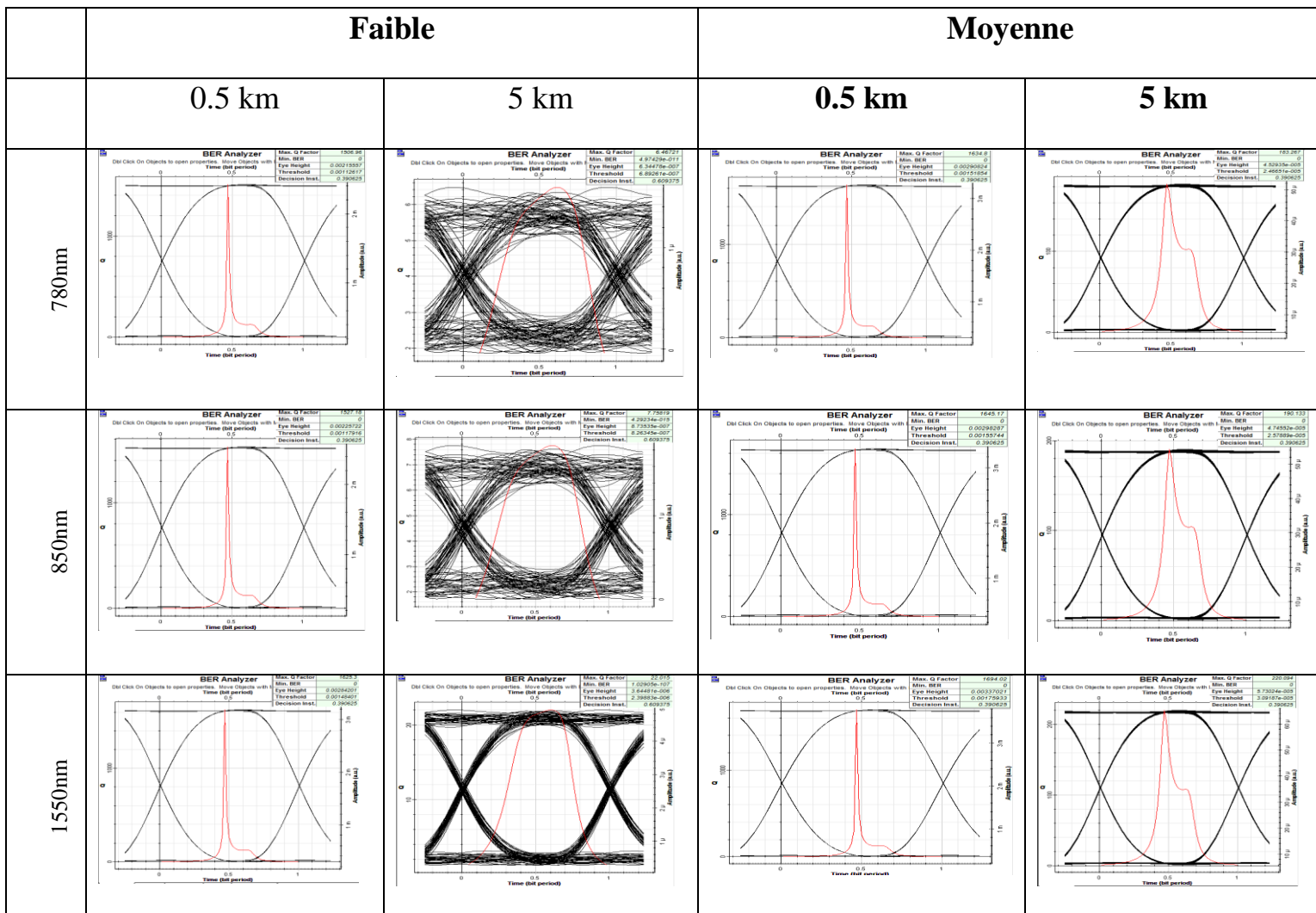


Tableau 3-Résultat Simulation -Effet de brouillard

## Différents valeurs de BER et QFACT

	Faible		Moyenne	
	0.5 km	5 km	0.5 km	5 km
<b>780nm</b>	BER=0 QFAT=1506.96	BER=4.97429 10 <sup>-11</sup> QFAT=6.46721	BER=0 QFAT=1637.800	BER=0 QFAT=183.267
<b>850nm</b>	BER=0 QFAT=1527.18	BER=4.29234 10 <sup>-15</sup> QFAT=7.75819	BER=0 QFAT=1645.170	BER=0 QFAT=190.133
<b>1550nm</b>	BER=0 QFAT=1625.30	BER=1.02905 10 <sup>-107</sup> QFAT=22.015	BER=0 QFAT=1694.020	BER=0 QFAT=220.094

Tableau 4- Récapitulatif Simulation effet de Brouillard

### 3.2.3 Effet de la pluie

Faire la simulation en changeant chaque fois l'atténuation selon la distance et le type de pluie le résultat 4.1.2 montre les différents diagrammes d'œil en prend avec précision le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur de qualité (QFACT).

	Atmosphérique Atténuation (db)	
	0.5 Km	5Km
Pluie légère	0.036	0.18
Pluie moyenne	0.24	0.37
Pluie dense	045	0.69

Tableau 5- différents atténuation selon la pluie

# Analyse des performances d'une communication optique en espace libre

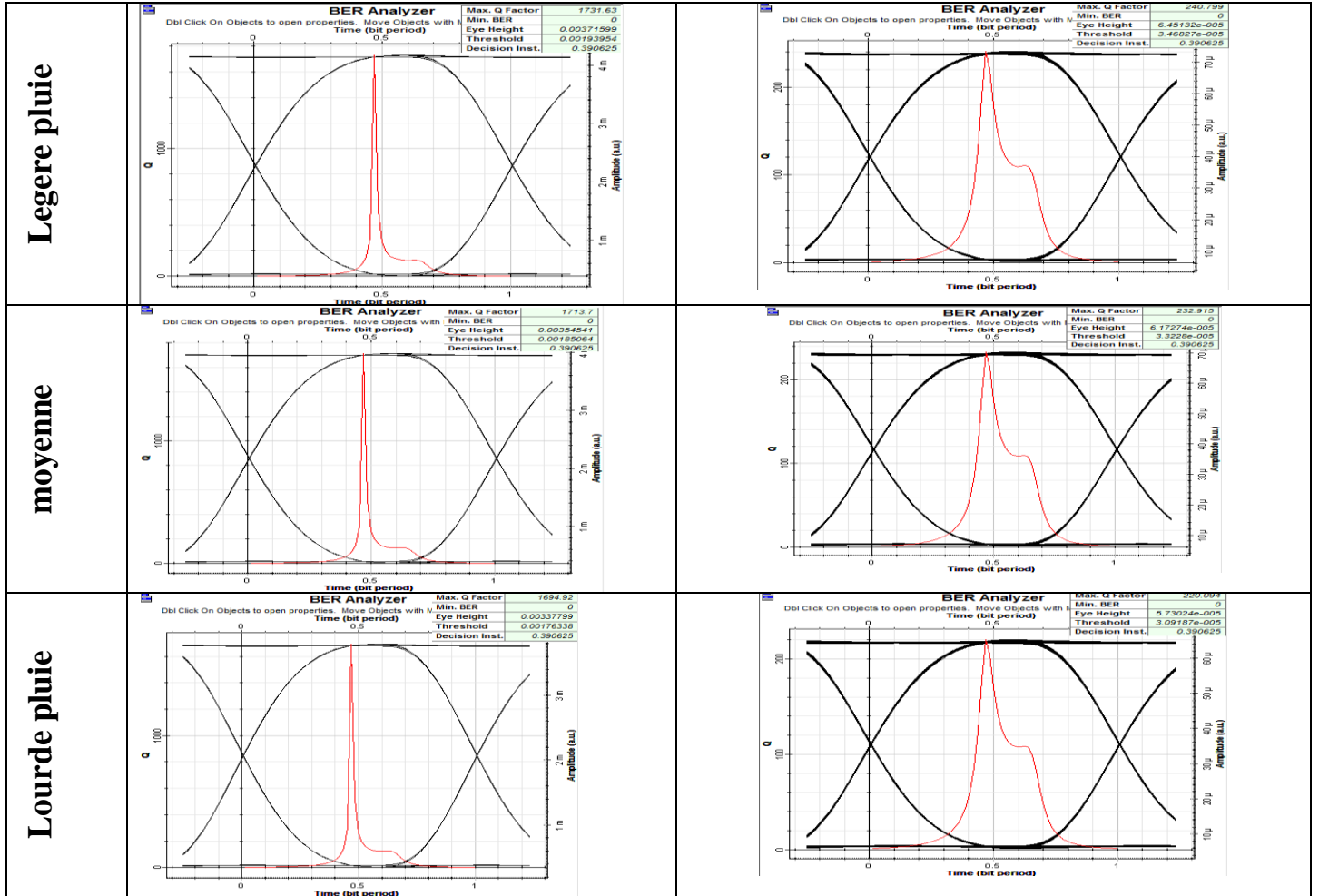


Tableau 6-Résultats simulation effet de la pluie

### Différents valeurs de BER et QFACT

	<b>0.5 Km</b>	<b>5 Km</b>
<b>Légère pluie</b>	BER=0 QFAT=1731.63	BER=0 QFAT=240.799
<b>Moyenne</b>	BER=0 QFAT=1713.70	BER=0 QFAT=232.915
<b>Lourde pluie</b>	BER=0 QFAT=1694.92	BER=0 QFAT=220.094

Tableau 7-Récapitulatif simulation effet de la pluie

#### 3.2.4 Effet de la turbulence

Faire la simulation en changeant chaque fois l'atténuation selon la distance et la longueur d'onde le résultat 4.1.3 montre les différents diagrammes d'œil en prenant avec précision le taux d'erreur binaire (BER) et le facteur de qualité (QFACT).

<b>Distance</b>	<b>Longueur d'onde</b>	<b>Atténuation (db)</b>
<b>0.5 km</b>	<b>780nm</b>	<b>0.045</b>
	<b>850nm</b>	<b>0.038</b>
	<b>1550nm</b>	<b>0.012</b>
<b>5 Km</b>	<b>780nm</b>	<b>2.35</b>
	<b>850nm</b>	<b>2.05</b>
	<b>1550nm</b>	<b>0.73</b>

Tableau 8-Différents atténuations effet de la turbulence

# Analyse des performances d'une communication optique en espace libre

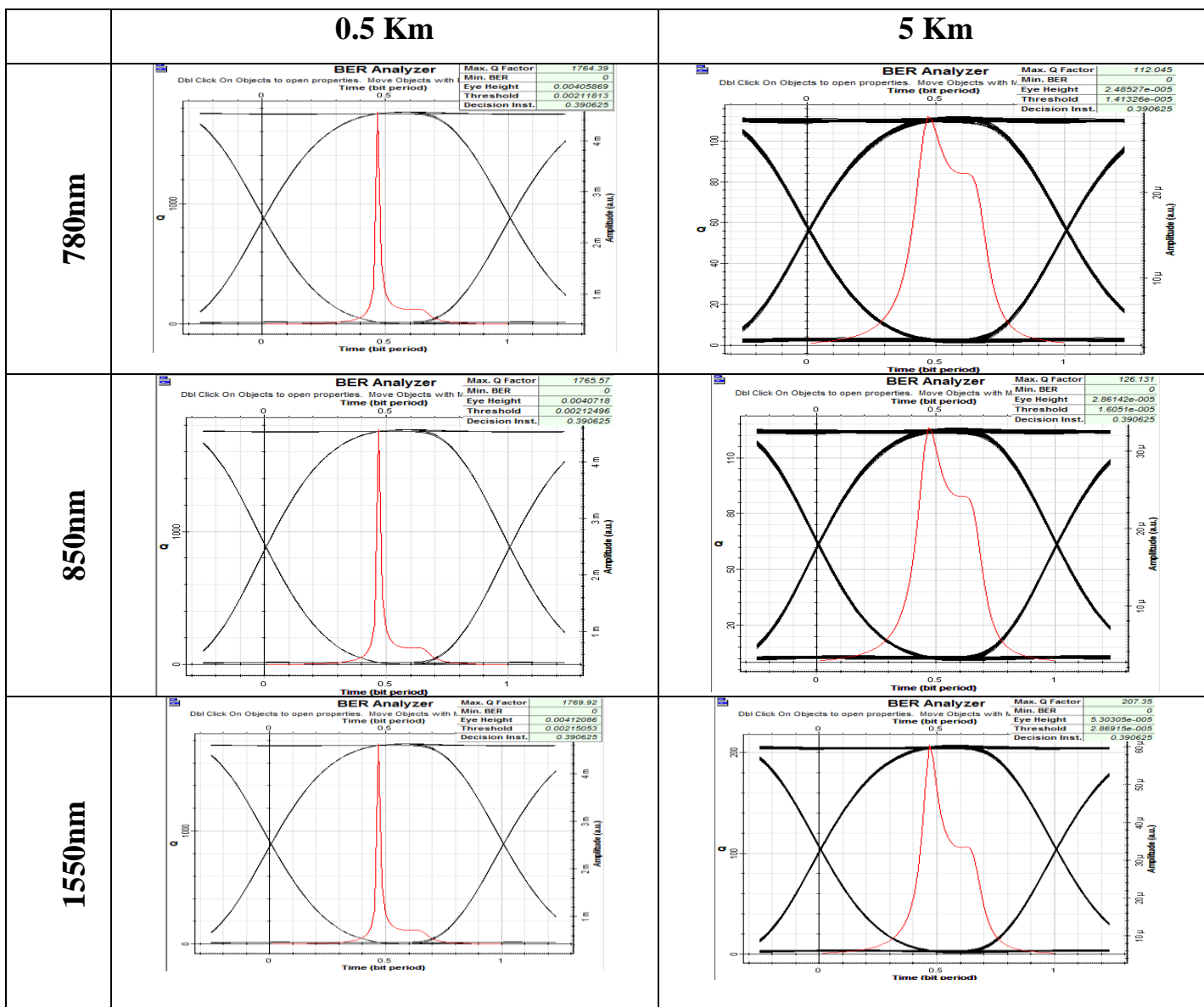


Tableau 9-Résultats simulation effet de la turbulence

	0.5 Km	5 Km
780nm	<b>BER=0</b> <b>QFAT=1764.39</b>	<b>BER=0</b> <b>QFAT=112.045</b>
850nm	<b>BER=0</b> <b>QFAT=1765.57</b>	<b>BER=0</b> <b>QFAT=126.131</b>
1550nm	<b>BER=0</b> <b>QFAT=1769.92</b>	<b>BER=0</b> <b>QFAT=207.350</b>

Tableau 10-Récapitulatif simulation effet de la turbulence

### 3.2.5 Interprétation

Le système de transmission optique en espace libre peut être comme une solution fiable pour une large bande et à courte distance. Il y a quelques facteurs qui doivent être pris en considération lors de la conception de ce système comme les facteurs contrôlables et les facteurs incontrôlables. Les facteurs contrôlables comprennent la longueur d'onde, la plage de transmission, la divergence du faisceau, les pertes au niveau de l'émetteur et de récepteur et la sensibilité du détecteur. Les facteurs incontrôlables comprennent la visibilité, le taux de précipitations, le rayon des gouttes de pluie, l'atténuation atmosphérique et la scintillation.

L'atténuation atmosphérique peut être l'absorption ou la diffusion. Donc, nous pouvons ignorer l'effet d'absorption à la longueur d'onde identifiée comme fenêtres atmosphériques. Le système de transmission en espace libre doit être capable de transmettre une puissance suffisante pendant le mauvais état de la météo. La diffusion de Mie représente la principale influant sur ce système. Les principales causes de la diffusion de Mie sont le brouillard et les brumes. La diffusion de Rayleigh, nous pouvons l'ignorer à la longueur d'onde visible et infrarouge que son effet sur les longueurs d'onde ultraviolettes est énorme. Cette diffusion se produit lorsque la taille des molécules est inférieure à la longueur d'onde du faisceau laser.

La diffusion non-sélective indépendant sur la longueur d'onde et se produit lorsque la taille de molécules est plus grande que la longueur d'onde et il se produit en raison de la pluie. En général, le système est donc suffisant dans l'environnement selon les résultats précédents. La performance de la longueur d'onde de 1550 nm est mieux les mauvaises conditions météorologiques en comparaison avec des longueurs d'onde de 850 nm et 780 nm. De plus, la longueur d'onde de 1550 nm permet une forte puissance peut atteindre plus de 50 fois par rapport à la longueur d'onde 850 nm et 780 nm.

En analysant les résultats obtenus, nous concluons que nous sommes en mesure d'améliorer les performances de transmission du système aux mauvaises conditions climatiques en utilisant la longueur d'onde de 1550 nm et à courte distance entre l'émetteur et le récepteur.

## 3.3 Satellitaire

Dans ce travail, nous utilisons des canaux optiques sans fils pour la communication inter-satellites et d'optimiser l'échange de données en fonction des paramètres de performance comme le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire.

Dans cette liaison les paramètres considérés principalement sont les débits et la distance de transmission. La liaison optique inter-satellites est modalisé en utilisant un logiciel de simulation, puis l'effet de la variation de débit binaire de la liaison et la distance de communication optique est analysé. Les liaisons inter-satellites ont été modalisées et simulées à l'aide du simulateur Optisystem

### 3.3.1 Design du système

La simulation se fait en utilisant le logiciel OptiSystem. Ce dernier est une suite des programmes complète qui permet d'organiser, de tester et de reconstruire les connexions optiques. La liaison se compose d'un émetteur avec des signaux NRZ, canal et récepteur optique comprenant un photo-détecteur, filtre de Bessel et analyseur de taux d'erreur pour analyser le résultat de rendement. Du côté d'entrée le laser est utilisé pour fournir la source de lumière à la liaison, ainsi que mach Zehnder est pris comme générateur de séquence pseudo-aléatoire de bits. La liaison de simulation est représentée sur la figure ci-dessous.

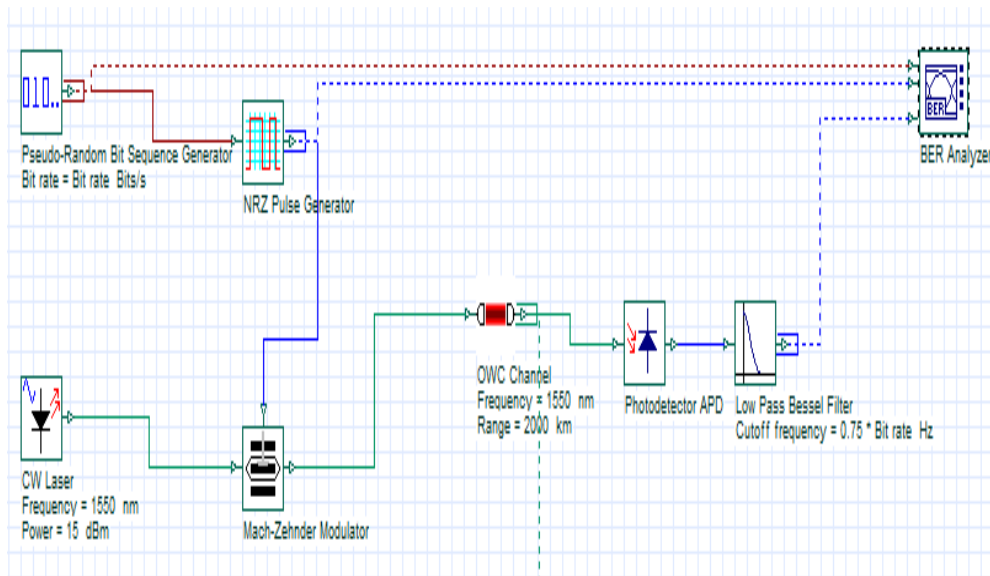


Figure 7-Design système satellitaire

Le débit varie de 1Gb à 8 Gb et son effet sur le signal de sortie est analysé en termes de facteur de qualité et le taux d'erreur binaire. La distance de transmission varie de 100 km à 400 km et l'observation est prise pour chaque distance de transmission. Le niveau de puissance d'entrée est maintenue constant d'environ 15dBm.

Paramètres	Valeurs
Débit	2, 4, 6, 8 Gbps
Modulation	NRZ
Distance (km)	100, 200,400
Tx& Rx angle de divergence	2.7 $\mu$ rad
Puissance	15dbm
Tx and Rx coefficient	1
Longueur d'onde	1550 nm

Tableau 11- Paramètres liaison satellitaire

La simulation est effectuée sous une longueur d'onde de 1550 nm à la puissance de 15 dbm. Dans le canal espace libre, l'erreur de pointage de l'émetteur vers le récepteur est maintenu 2.7 $\mu$ rad, le diamètre d'ouverture est gardé à 15cm sur les deux côtés. L'efficacité de l'émetteur et le récepteur est considéré comme 1. Le lien fonctionne à différents débits binaire : 2Gb, 4Gb, 6Gb et 8 Gb de distance de transmission variée.

### 3.3.2 Résultat de simulation et analyse

Nous avons simulé la liaison optique travaillant à des débits et des distances variés. Les effets sont analysés en termes de facteur de qualité et le taux d'erreur binaire avec l'utilisation de diagrammes oculaires. Le tableau suivant montre l'impact sur le facteur de qualité et le taux d'erreur binaire conformément à l'augmentation de la distance de transmission.

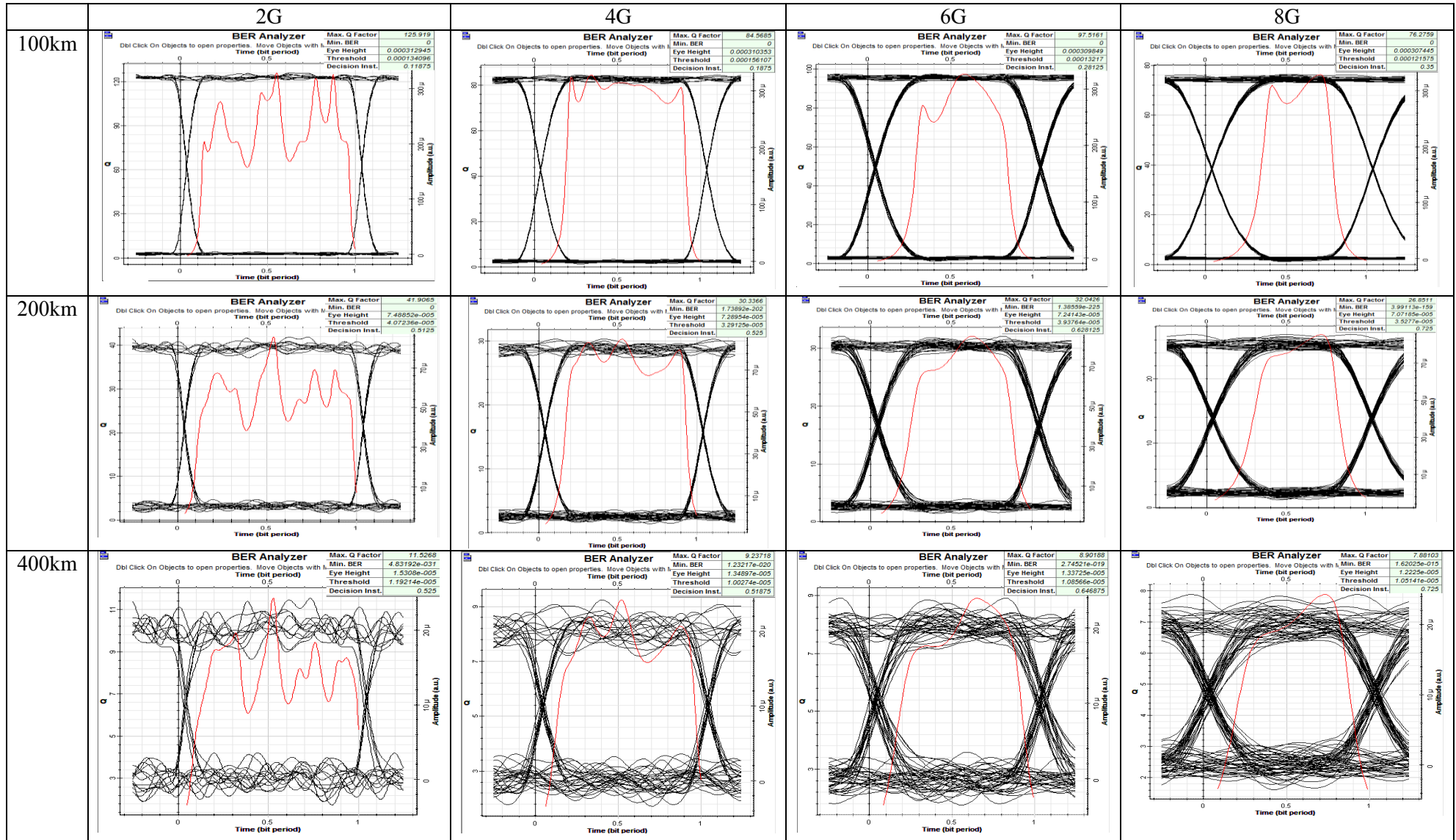


Tableau 12-Résultats simulations liaison satellitaire

	2G	4G	6G	8G
100km	BER=0 QFAT=125.919	BER=0 QFAT=84.6865	BER=0 QFAT=97.5161	BER=0 QFAT=76.2569
200km	BER=0 QFAT=41.9065	BER=1.738 10 <sup>-202</sup> QFAT=30.3365	BER=1385 10 <sup>-225</sup> QFAT=32.0426	BER=3.991 10 <sup>-159</sup> QFAT=26.8511
400km	BER=4.83 10 <sup>-031</sup> QFAT=11.5268	BER=1.232 10 <sup>-020</sup> QFAT=9.23718	BER=2.745 10 <sup>-19</sup> QFAT=8.90188	BER=1620 10 <sup>-015</sup> QFAT=7.88103

**Tableau 13-Récapitulatif simulation liaison satellitaire**

### 3.3.3 Interprétation

Il est peut être conclu que pour une plus-longue distance à un débit binaire plus élevé le diagramme d'œil à l'ouverture des yeux plus petits. Ici, le système est simulé à 8 Gbps, et le système obtient  $1.62 \cdot 10^{-15}$  le taux d'erreur binaire (BER) à 400 km de distance de transmission, tandis qu'à 2Gbps pour une plus petite distance de transmission 100 km, nous obtenons un taux d'erreur binaire BER pratiquement nulle. Également pour le facteur de qualité, il est important d'avoir des bons résultats quand la distance de transmission et le débit se diminuent.

### 3.4 Comparaison

Vue le travail effectué par Abdulsalam Alkholidi et Khalil Altowij dans leur article (**Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications in Western Asia**)[21] est similaire dans la totalité de la méthodologie du travail mais on peut dire :

- Premièrement Abdulsalam Alkholidi et Khalil Altowij ont étudié seulement les courtes distances sans faire un tour dans la totalité des domaines d'utilisation de cette technique visant le mode satellitaire.
- Dans les courtes distances, on remarque les mêmes conclusions sont élaborés à la fin de leur résultats en se limitant de présenter les atténuations en **db** seulement.
- L'utilisation du logiciel optisysteme dans la simulation donne des résultats rapides et claires en présentant d'autres facteurs importants comme **QFAT** et **BER**

## **3.5 Conclusion**

D'une façon générale soit dans les liaisons atmosphérique ou satellitaire, le choix de la longueur d'onde et la distance de transmission sont les facteurs les plus importants pour optimiser le fonctionnement fiable de ce système.

La longueur d'onde 1550 nm et une minimisation au maximum de la distance de transmission rend notre système impeccable dans les cas les plus échéant.

## 4 Conclusion général

Comme il a été mentionner que les liaisons optiques en espace libre constituent une technologie complémentaire aux faisceaux hertziens et aux fibres optiques afin de faire face aux besoins croissants en matière de télécommunication à haut débit , et aussi les transmissions optiques ne nécessitent aucune autorisation et permettent d'accéder à un débit beaucoup plus important que celui des transmissions radio.

Le présent travail dans ce manuscrit prouve que dans les deux types existants soit atmosphérique ou satellitaire la fiabilité d'une telle technologie est importante et bénéfique.

Aussi l'étude économique et environnemental exige de voir de près la possibilité d'envisagé cette nouvelle technologie dans notre infrastructure de télécommunication pour remédier le problème urbaine de réalisation et les couts des ouvrages.

Dans cette manuscrite, il a été décrit avec une description détaillée les méthodes à suivre pour voir la possibilité d'une telle liaison.

En général il a été montré que la transmission en espace libre peut travailler en orchestra avec les technologies actuellement en avances pour élever le niveau de qualité de service demandé.

On détecte du près que la lumière et l'optique entrent timidement et petit à petit dans notre monde citons par exemple les essais de remplacement des énergies existantes aujourd'hui par la lumière du soleil, le domaine des circuits intègres optiques qui évolue vers une imagination incroyable et les efforts énormes déployés dans la fibre optique pour le transport des données nous donnent un aperçu de l'avenir .

Alors pourquoi pas les transferts des données à cent pour cent optiques, alors pourquoi pas aussi un monde éclairer et manipuler à cent pour cent par la lumière.

Disant alors où va le monde avec cette nouvelle technologie, on imagine toute un monde qui est gérer par la source numéro un « le soleil ».

## 5 Bibliographie

- [1] O. BOUCHET, H. SIZUN, C. BOISROBERT, F. DE FORNEL, ET P. FAVENNEC, Optique sans fils, Hermès - Lavoisier, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Paris, 2004.
- [2] <http://fortdebourlemont.fr>
- [3] A. G. BELL, The photophone, Science, 1 :130–134, September 1880.
- [4] D. KILLINGER, Free space optics for laser communication through the air, Opt. Photon. News, 13(10) :36–42, 2002.
- [5] M. LIPSETT, C. MCINTYRE, ET R. LIU, Space instrumentation for laser communications, Quantumelectronics, IEEE Journal of, 5(6) :348–349, Jun 1969.
- [6] R. F. LUCY ET K. LANG, Optical communications experiments at 6328 and 10.6  $\mu$ , Appl. Opt., 7(10) :1965–1970, 1968.
- [7] D. BEGLEY, "free-space laser communications : a historical perspective", vol. 2, Nov. 2002, pp. 391–392 vol.2.
- [8] B. ANTOINE, Le photophone de bell, J. Phys. Theor. Appl, 9 :369–375, 1880.
- [9] Maher Al Naboulsi, "Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques, propagation, disponibilité et fiabilité", Thèse de doctorat, l'université de bourgogne. 2005.
- [10] Roberto Ramirez-Iniguez, Sevia M. Idrus and Ziran Sun, "Optical Wireless Communications IR for Wireless Connectivity", Taylor & Francis Group, Book, CRC Press, 2007.
- [11] Delower H. and Golam S. A., "Performance Evaluation of the Free Space Optical (FSO) Communication with the Effects of the atmospheric Turbulence", A Bachelor Degree thesis, January 2008.
- [12] Merrill Lynch, "Free Space Optics " Merrill Lynch Global Securities and Economics Group 2001.

- [13] Nadia B. M. Nawawi, "Wireless Local Area Network System Employing Free Space Optic Communication Link", A Bachelor Degree thesis, May 2009.
- [14] A. K. Majumdar, J. C. Ricklin, "Free Space Laser Communications Principles and Advances", Springer ISBN 978-0-387-28652-5, 2008.
- [15] H. Hemmati, "Near-Earth Laser Communications", California, Taylor & Francis Group, Book, LLC, 2008.
- [16] N. Araki, H. Yashima, "A Channel Model of Optical Wireless Communications during Rainfall", IEEE, 0-7803-9206, 2005.
- [17] Z. Ghassemlooy and W. O. Popoola, "Terrestrial Free Space Optical Communication", Optical Communications Research Group, NCR Lab., Northumbria University, Newcastle upon Tyne, UK, 2010.
- [18] M. Steege, "Free-Space Optics: A Viable, Secure Last-Mile Solution", Sans Institute ed, 2002.
- [19] Mohammed O. Zaatari, "Wireless Optical Communications Systems in Enterprise Networks". The Telecommunications Review, 2003.
- [20] D. Killinger, "Free space optics for laser communication through the air". Optics & Photonics News, vol. 13, pp. 36-42, Oct. 2002.
- [21] Altowij, A. A. (2012). Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications. intech open science open minds .
- [22] Mehdi, R. (2012-2013). Etude et Modélisation d'une Liaison Optique Sans Fil.
- [23] Schwartz, N. (2009). Précompensation des effets de la turbulence par optique adaptative : application aux liaisons optiques en espace libre.
- [24] Weichel H., "Laser Beam Propagation in the Atmosphere", SPIE, Optical Engineering Press, Vol. TT-3, 1990.
- [25] H. Willebrand and B. S. Ghuman, "Free-Space Optics Enabling Optical Connectivity in Today's Networks", SAMS, 0-672-32248-x, 2002.
- [26] B. Olivieret, et al., "Free-Space Optics, Propagation and Communication", Book, ISTE, 2006.
- [27] Antonios K. Varelas, "An Investigation of Wireless Solutions for the "Last Mile". Thèse de doctorat., Naval Postgraduate School Monterey, California, March 2004
- [28] Tyson, R. K., "Introduction to Adaptive Optics", SPIE Press, 2000.

- [29] Arun K . Majumdar et Jennifer C . Ricklin . "Free-Space Laser Communications Principles and Advances" . Springer . 2008 .
- [30] W. E. K. Middleton, "Vision through the Atmosphere", University of Toronto Press, Toronto, 1963.
- [31] I. I. Kim, B. McArthur, and E. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications", Proc. SPIE, 4214, pp. 26-37, 2000.
- [32] I. Kim, R. et. al. , "Wireless Optical Transmission of Fast Ethernet, FDDI, ATM, and ESCON Protocol Data using the Terra Link Laser Communication System" , Opt.Eng. , 37 , pp. 3143-3155 , 1998.
- [33] J. Li, and M. Uysal, "Achievable Information Rate for Outdoor Free Space Optical " , Global Telecommunications Conference, Vol.5, pp .2654-2658, 2003.
- [34] Gary D. Wilkins, "The Diffraction Limited Aperture of Atmosphere and ITS Effects on Free Space Laser Communication".
- [35] Kim Issac I. And Eric Korevaar, "Availability of Free Space Optics (FSO) and Hybrid FSO/RF Systems" Optical Access, Incorporated, 2002.
- [36] Fried, D. L. "Limiting Resolution Down Through the Atmosphere", J Opt. SOC. AM Vol., 56 No 10, 1966
- [37] Brown, Derek "Terminal Velocity and the Collision/Coalescence Process", 2003.