

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE

Département des Télécommunications



**MEMOIRE**

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

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Réseau et Télécommunications

**Par:**

- HADDJERI Hafida

- LASFER Hichem Weil

**Sujet**

**Conception d'un système de communication optique pour  
application satellitaire.**

Soutenu publiquement, le 22/06/2023, devant le jury composé de

M. ABDELMALEK Abdelhafid

MCB

Université de Tlemcen

Président

M. KARIM Fath Allah

MCA

Université de Tlemcen

Examineur

M. IRID Sidi Mohammed Hadj

MCA

Université de Tlemcen

Encadrant

M. KOURDI Zakarya

MRA

CDS Oran

Co-Encadrant

**Année universitaire 2022/2023**

## **REMERCIEMENTS**

### **\*\*\* REMERCIEMENTS \*\*\***

Le travail présenté dans ce rapport a été effectué à l'université Aboubaker Belkaid -Tlemcen- Avant tout, Nous remercions notre seigneur d'avoir donné à l'homme le pouvoir de raisonner et d'explorer les vérités de l'univers.

Que nos remerciements les plus sincères s'adressent à notre encadreur Mr **IRID Sidi Mohammed Hadj**, maîtres de conférences classe A à l'université Aboubaker Belkaid - Tlemcen-, pour avoir accepté de superviser notre travail et pour m'avoir initié aux bases de télécommunication système, et le soutien inconditionnel, les conseils précieux et la patience sans fin qu'ils m'ont généreusement fournis pendant mes recherches de mémoire.

Que nos remerciements les plus sincères s'adressent à notre Co-encadreur Mr **KOURDI Zakarya**, maître de recherche classe A au Centre développement des satellites à Oran, pour avoir accepté de superviser notre travail et pour n'avoir initié aux bases de télécommunication système. Qui malgré ses multiples responsabilités tant scientifiques que pédagogiques, a accepté de mettre à notre disposition son expérience, son esprit de synthèse et ses conseils qui nous ont été une base d'appui pour notre travail, et surtout de nous avoir accordé une grande liberté dans l'expression de nos idées.

Notre sincère remerciement à monsieur **ABDELMALEK Abdelhafid**, Maitre de conférences classe B à l'université Abou-Baker Belkaid Tlemcen de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Nous remercions également monsieur **KARIM Fatah Allah**, Maitre de conférences classe A à l'université Abou-Baker Belkaid Tlemcen de n'avoir fait l'honneur d'examiner notre travail. Nous pourrions oublier de présenter mes vifs remerciements et ma sincère gratitude à toutes celles et tous ceux qui m'ont épaulé dans les moments durs et m'ont donné la force pour continuer et arriver au bout du travail.

Nous pouvons terminer sans exprimer toute ma gratitude à tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu et conseillé tout le long de ce travail, plus particulièrement ma mère.

\*\*\* DEDICACES \*\*\*



*Dédicace*

*Je dédie ce mémoire de fin d'études avec grand amour, sincérité et fierté :*

*À ma chère mère*

*Pour l'amour qu'elle m'a toujours donné, ses encouragements et toute l'aide  
qu'elle m'a apportée durant mes études.*

*Que Dieu te procure bonne santé et longue vie, en espérant que tu seras  
toujours fière de moi.*

*À mon cher unique frère*

*qui a partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de  
ce travail.*

*À tous qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de  
mon parcours.*

*À l'âme de ma très chère grand-mère qui me manque énormément, j'espère que tu es fière de moi,*

*que Dieu t'accueille dans son vaste Paradis الجنة من الأعلى من الفردوس ويسكنها الفردوس الأعلى من الجنة*

*À tous mes amis qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail se réalise*

*À mon cher binôme « Weil » et à toute sa famille*

*Pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce  
projet. Merci pour ton effort avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de  
réussite dans ta vie personnelle et professionnelle.*

*Hafida.*

## DÉDICACES



*Dédicace*

*À ma chère Mère*

*À mon Père*

*Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis de vivre ce jour.*

*À mon Frère et ma Sœur*

*À mes amis*

*À toute ma famille*

*À mon binôme*

*À tous les gens qui m'aiment.*

*Weil.*

## *Abréviations*

### **\*\*\* ABREVIATIONS**

2D deux Dimensions.

3D trois Dimensions.

ARD l'antenne à résonateur diélectrique

BP Bande passante

C célérité de la lumière dans le vide.  $c = 3 * 10^8$  m/s.

CSRR complementary Split Ring Resonator

CST MWS Computer Science Technology MICROWAVE STUDIO.

*D*max Directivité maximale

DNG Double Négative

DPS Double Positive

PV Panel photovoltaic

RCST Return Channel Satellite Terminal

RF Radio Frequency

TDM Time Division Multiplexing

TTC& M Telemetry and Tele-command Control & Maintenance

IDU In Door Unit

VSAT Very Small Aperture Antenna

**\*\*\* SOMMAIRE \*\*\***

*** Remerciements *** .....	I
*** Dédicaces *** .....	II
*** Abréviations .....	IV
*** Sommaire *** .....	IV
Liste des figures .....	VIII
Listes Des Tableaux .....	X
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur Intercommunication Optiques.....	3
I-1. Introduction .....	3
I-2. Lien intersatellite (ISL).....	3
I-3. Les sources de vibrations .....	4
I-3-1. Les sources externes .....	4
I-3-2. Les sources internes.....	5
II. Systèmes de communication optique par satellite.....	5
II-1. Le système d'émetteur .....	5
II-2. Le système récepteur .....	6
II-3. Le système de suivi .....	7
III. Structure standard d'un système de transmission numérique dans les réseaux des satellites.....	8
III-1. Modèle des vibrations.....	9
III-2. Le modulateur .....	10
III-2-A. Modulation directe.....	10
III-2-B. Modulation externe .....	11
III-3. Amplification optique .....	12
III-4. Structure développée d'un système de transmission optique dans les réseaux des satellites.....	13
IV-1. Technologie FSO (Free Space Optics) .....	14
IV-1-A. Principe de fonctionnement de la Technologie FSO.....	14

## Sommaire

IV-1-B. Architectures de base de la technologie FSO .....	15
IV-1-C-2. Les diodes électroluminescentes (DEL).....	17
IV-1-C-3. Les diodes lasers.....	17
IV-1-C-3-a) La modulation d'intensité (IM : Intensity Modulation).....	17
IV-1-C-3-b) La modulation externe .....	18
IV-1-C-4. Canal de transmission.....	19
IV-1-D. Les avantages et les inconvénients des FSO .....	20
IV-1-E. Quelques caractéristiques techniques des dispositifs FSO .....	20
IV-1-F. Les paramètres d'une liaison FSO .....	21
IV-1-G. Applications des systèmes FSO.....	21
IV-2. Technologie OWC (Optical Wireless Communication).....	22
IV-2-A. Les Domaines d'application Existants Et Envisagés .....	22
IV-2-B. Les applications de OWC .....	23
V. Conclusion.....	29
Chapitre II : Généralité sur l'intercommunication satellitaire par laser ...	31
II-1. INTRODUCTION .....	31
II-2. Historique .....	31
II-3. Principe de transmission par satellites .....	33
II-3-1. Description d'un système de télécommunication par satellite .....	33
II-3-2. Lien montant .....	33
II-3-3. Secteur terrien .....	34
II-3-4. Secteur spatial.....	34
II-3-5. Lien descendant .....	34
II-3.6. Bandes de fréquences et services .....	34
II-4. CONSTELLATION de satellites .....	36
II-4-1. Les constellations de satellite basses (LEO) .....	36
II-5. Orbite satellitaire LEO .....	37
II-5-1. Architecture du réseau LEO .....	37
II-5-1-A. Constellations polaires.....	38
II-5-1-B. Constellations inclinées .....	39
II-5-2. Paramètres des satellites LEO .....	39
II-5-2-A. Coordonnées des satellites LEO (sphériques) .....	39

## Sommaire

II-5-2-B. Vitesse de rotation des satellites [II-29].....	40
II-5-2-C. Surface de couverture des satellites .....	41
II-7. Bilan de liaison : .....	48
II-7-1. Paramètres généraux.....	48
II-7-1-A. Le rapport signal sur bruit (C/N) [II-46].....	48
II-7-1-B. Le rapport l'énergie par bit sur bruit (E/N) [II-46].....	49
II-7-1-C. Affaiblissement de propagation ( <b>AP</b> ) .....	49
II-7-2. Antenne isotrope .....	50
II-7-3. Le Gain d'une antenne .....	51
II-7-4. Puissance isotrope rayonnée équivalente (P.I.R.E.) .....	51
II-7-5. Facteur de mérite G/TB.....	51
II-7-6. La Capacité d'un canal [II-46] .....	51
II-7-7. Bruits dans un lien de communication par satellite .....	52
II-7-8. Température de bruit [II-46] .....	53
II-7-8-A. Température de bruit d'un système .....	53
II-7-8-B. Température de bruit d'une antenne de station sol .....	53
II-7-9. Efficacité spectrale [II-46] .....	54
II-7-10. Bilan de Liaison pour la voie montante.....	54
II-7-11. Bilan de liaison pour la voie descendante.....	55
II-7-12. Bilan de liaison global.....	56
II-7-13. La puissance reçue [II-46].....	57
II-8. Conclusion .....	59
Chapitre III : Résultats et discussion de simulation intercommunication par Laser .....	
III-1. INTRODUCTION .....	61
III-3. Présentation du logiciel OptiSystem .....	62
III-3-1. Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem .....	62
III-3-2. Interface de l'OptiSystem .....	63
III-3-2-A. Bibliothèque .....	63
III-3-2-B. Navigateur du Projet (Projet en cours) .....	64
III-3-2-C. Editeur du couche (Layout) .....	64
III-3-2-D. Projet en cours (description du layout).....	65



## *Sommaire*

III-3-2-E. Lancer une simulation.....	65
III-3-3. Représentation des Signaux dans OptiSystem.....	66
III-3-3-A. Signaux électriques.....	67
III-3-3-B. Signaux binaires .....	67
III-3-3-C. Signaux optique .....	67
III-3-4. Affichage des résultats à partir d'un appareil.....	68
III-3-5. Modes de simulation .....	68
III-3-6. Critère de Performance de transmission optique .....	68
III-3-6-A. Taux d'erreurs binaires.....	69
III-3-6-B. Facteur de qualité.....	69
III-3-6-C. Diagramme de l'œil .....	69
III-3-7. Avantages du logiciel OptiSystem.....	70
III-4. Structure et modélisation .....	70
III-5. Résultats et discussion .....	73
III-5-1. Intercommunication satellitaire LEO-Ground pour une distance de 400 km.....	73
III-5-2. Intercommunication satellitaire LEO-Ground pour une distance de 600 km.....	75
III-5-3. Intercommunication satellitaire LEO-Ground pour une distance de 800 km.....	76
III-5-4. Distance oblique [III-14].....	79
III-5-5. Variation des paramètres.....	82
III-5-5-A. Effet de l'élévation.....	82
III-5-5-B. Effet de l'ouverture de télescope.....	83
III-5-5-C. Variation de fréquence.....	84
III-6. Conclusion.....	86
Conclusion générale .....	87
Références .....	A

**LISTE DES FIGURES**

**Chapitre I :**

Figure I. 1 : Liaison inter-satellites (ISL)[I-3].	4
Figure I. 2 : Schéma de l'émetteur [I-11].	5
Figure I. 3 : Schéma du récepteur [I-11].	7
Figure I. 4 : Schéma du système de suivi [I-11].	8
Figure I. 5 : Structure générale d'un système de transmission optique dans les réseaux des satellites lasers [I-14].	8
Figure I. 6 : Modulation directe. [I-19]	11
Figure I. 7 : Modulation externe [I-19].	12
Figure I.8 : Structure d'une liaison FSO utilisée pour raccorder deux réseaux locaux [I-23].	14
Figure I. 9 : Configuration de base d'une liaison optique en espace libre [I-25].	16
Figure I. 10: Modulateurs optiques. (a) Modulateur interne. b) Modulateur externe [I-26]....	15
Figure I. 11 : Topologies de réseaux optiques en espace libre:(a) point-multipoints et maillage. (b) point-à-point et (c) anneau et point-à-point. [I-27].	16
Figure I. 12 : Schéma synoptique du bloc émetteur FSO [I-28].	16
Figure I. 13 : Architecture une DEL et Structure d'une diode laser [I-31].	17
Figure I. 14: Principe de base d'une modulation directe. [I-32]	19
Figure I. 15 : Schéma de la modulation externe [I-33].	19
Figure I. 16 : Schéma bloc du récepteur optique[I-34].	19
Figure I. 17 : Les applications OWC en fonction de la portée de transmission. [I-45].	24
Figure I. 18: Liaisons LAN-OWC : réseau véhiculaire utilisant la technologie VLC où les véhicules communiquent entre eux à base des LEDs (applications moyennes portées OWC) [I-46].	24
Figure I. 19: WBAN optique en espace libre : application biomédicale mesure le cardiostress (applications courtes portées OWC) [I-48]	25
Figure I. 20 : Liaison OWC : l'application peut être déployée pour prendre en charge les communications aéronautiques, avion-à-HAP, aéronautique / satellite / station de base (applications longues portées OWC) [I-49].	26
Figure I. 21 : L'interconnexion optique en espace libre entre les circuits intégrée (applications ultra-courtes portées OWC) [I-50][I-47].	25

## Liste des figures

### Chapitre II :

Figure II- 1 : Les composantes d'un système de télécommunications par satellite [II-18].	33
Figure II- 2 : Différents types d'orbites [II-29].	36
Figure II- 3 : Les constellations de satellite (LEO) [II-29].	37
Figure II- 4 : Architecture de la constellation de satellites [II-29].	38
Figure II- 5 : Constellations polaires [II-31].	39
Figure II- 6 : Constellations inclinées [II-31].	39
Figure II- 7 : Coordonnées sphériques sur les axes cartésiens [II-32].	40
Figure II- 8 : Surface de la couverture d'un satellite [II-29].	42
Figure II- 9 : Schéma de la variation de la distance de la liaison de transmission de données entre un satellite LEO et le sol [II-37].	44
Figure II- 10 : Modèle de communication relayée par satellite.[II-42].	46
Figure II- 11 : Liaison satellitaire et ces paramètres. [II-48].	54
Figure II- 12 : Etude de la liaison descendante [II-52].	56

### Chapitre III :

Figure III- 1 : L'interface de travail sur Optisystem [III-10].	63
Figure III- 2 : Bibliothèque des composants. [III-10].	64
Figure III- 3 : Navigateur du Projet [III-10].	64
Figure III- 4 : Fenêtre de présentation du projet en cours [III-10].	65
Figure III- 5 : Fenêtre de description du projet en cours [III-10].	65
Figure III- 6 : Fenêtre montre le lancement de la simulation[III-10].	66
Figure III- 7 : Types de signaux et de connexions. [III-10].	67
Figure III- 8 : Exemple d'un diagramme de l'œil. [III-11]	70
Figure III- 9 : Schéma de la structure proposé pour intercommunication satellitaire LEO-Ground.	72
Figure III- 10 : Puissance optique transmise pour une portée de liaison de 400 km à une longueur d'onde 1538 nm coté de diode semiconducteur.	74
Figure III- 11 : Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 400 km à une longueur d'onde de 1538nm coté photodétecteur.	74
Figure III- 12 : La qualité de facteur Q avec un diagramme de l'œil dans une distance de 400 km.	75

## Liste des figures

Figure III- 13 : Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 600 km à une longueur d'onde de 1538nm.....	75
Figure III- 14 : La qualité de facteur Q avec un diagramme l'œil dans une distance de 600 km. ....	76
Figure III- 15 : Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 800 km à une longueur d'onde de 1538nm et un gain de 40 dB. ....	77
Figure III- 16 : La qualité de facteur Q avec un diagramme l'œil dans une distance de 800 km. ....	77
Figure III- 17 : Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 800 km à une longueur d'onde de 1538nm (gain 58 dB). ....	78
Figure III- 18 : Un diagramme l'œil dans une distance 800 km avec un gain 58 dB.....	78
Figure III- 19 : La qualité de facteur Q dans une distance 800 km avec un gain 58 dB. ....	79
Figure III- 20 : Schéma-1 de système intercommunication pour distance oblique [III-14].....	80
Figure III- 21 : Schéma-2 de système intercommunication pour distance oblique [III-14].....	81
Figure III- 22 : Plateau lala Sety [III-15] .....	81
Figure III- 23 : Variation de phase initiale (élévation) [°]. ....	83
Figure III- 24 : Variation d'ouverture de l'antenne [cm]. ....	84
Figure III- 25 : Variation de fréquence [THz]. ....	85

**LISTES DES TABLEAUX**

Chapitre I :

Tableau I. 1 : Caractéristiques de base pour des Systèmes FSOs [I-36]. ..... 22

Chapitre II :

Tableau II. 1 : Les fréquences utilisées par les satellites des télécommunications [II-25]. ..... 35

Tableau II. 2 : Bandes de fréquences et services [II-26]. ..... 35

Tableau II. 3 : Les paramètres du bilan de liaison.[II-53] ..... 59

Tableau II. 4 : Les résultats finaux du bilan de liaison. .... 60

Chapitre III :

Tableau III- 1 : Couleur du signal de connexion. [III-10]. ..... 66

Tableau III- 2 : présente les paramètres de simulation..... 73

Tableau III- 3 : Résultats de l'analyse..... 79

Tableau III- 4: Effet d'élévation.....82

Tableau III- 5 : Effet de l'ouverture de l'antenne.....83

Tableau III- 6 : Variation de fréquence.....85

# **Introduction Générale**

## INTRODUCTION GENERALE

Quelque soient les moyens utilisés pour communiquer à distance, le but est de faire parvenir l'information à transmettre vers sa destination finale. Les transmissions par satellite font désormais partie intégrante du monde de la télécommunication.

Un satellite de communication est un satellite artificiel orbital de la terre qui reçoit un signal de communication d'une station de transmission au sol, l'amplifie et le traite puis le transmet de nouveau à la station de réception sur terre [1].

Les satellites lasers offrent plusieurs avantages par rapport aux satellites standards d'où leur grande importance dans le monde de la communication. Ils ont rendu la communication entre les différentes régions du monde plus rapide et performante. La principale complexité d'un système de transmission optique par les satellites lasers est le système de pointage. Ainsi les faisceaux lasers peuvent parfois rater partiellement ou totalement le satellite récepteur à cause des vibrations continues du système de pointage dues à des sources internes et externes environnantes. Différentes méthodes permettent de surmonter le problème de ces perturbations et d'améliorer par conséquent la qualité de la communication [2] [3] [4].

Le calcul du bilan de liaison est une étape très importante dans la transmission des données par satellite afin de garantir la disponibilité et la qualité de la liaison.

Les réseaux satellitaires en orbite basse sont l'une des conséquences des avancées technologiques réalisées sur les réseaux géostationnaires. Ils présentent de nombreux avantages pour la fourniture d'un service mobile à couverture mondiale.

Un système LEO (Low Earth Orbit) est constitué d'une dizaine à une centaine de satellites défilant autour de la terre à une basse altitude et à une grande vitesse. Ces systèmes sont indépendants de la géographie de la terre et donc plus facile à remettre en œuvre en cas de désastre terrestre tel qu'un tremblement de terre [5]. Les réseaux satellitaires faisant partie du monde des réseaux de télécommunications et visant une intégration sans couture, devront assurer un support adéquat à de telles applications [6]. Cependant, ces systèmes posent des problèmes du fait de la mobilité des satellites et n'ont pas tout à fait les mêmes contraintes que dans le monde des radios mobiles [5].

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre introduit une présentation générale de la liaison de transmission FSO/OWC, en donnant la définition des différents types de sources de vibrations, la technologie de modulation, ainsi qu'une description des deux canaux FSO et OWC et leurs applications avec ces avantages et ces limites.

Le deuxième chapitre concerne des généralités sur la transmission par satellites, les orbites, les constellations de satellites ainsi que les paramètres des satellites LEO. Et nous avons représenté quelques équations en calculant les différents paramètres d'un bilan de liaison.

Le troisième chapitre, a pour objectif de présenter le logiciel de simulation OptiSystem qu'on a utilisé pour les mesures de notre liaison IsOWC, qui fera l'objet de commentaires et discussions sur nos résultats obtenus par notre modélisation.

Enfin, le mémoire se terminera par une conclusion générale.



**Chapitre I :**  
**Généralités sur**  
**intercommunication**  
**optiques**

**CHAPITRE I : GENERALITES SUR INTERCOMMUNICATION OPTIQUES**

**I-1. INTRODUCTION**

Les communications optiques dans un réseau de satellites permettent un fort débit de transmission entre plusieurs plates-formes disséminées sur le globe ou hors celui-ci. A cause de l'étroite divergence du faisceau et de la grande distance entre les satellites, le pointage d'un satellite a un autre est rendu encore plus compliqué par les vibrations du système de pointage dues à de multiples sources d'influences [I-1].

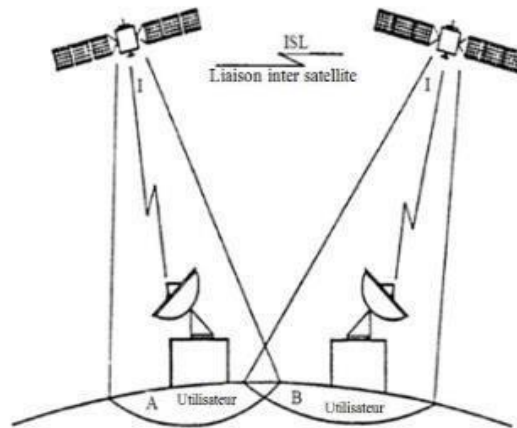
Comme tout système de communication, les liaisons optiques reposent sur trois blocs de base pour effectuer la transmission des informations : l'élément émetteur, le canal de communication et le récepteur. La spécificité de ce système découle des éléments utilisés pour transporter l'information. L'unité d'entraînement se compose d'une diode laser ou d'une source laser qui convertit un signal électrique sinusoïdal en un signal optique.

Différentes méthodes permettent de surmonter le problème de ces perturbations et d'améliorer par conséquent la qualité de la communication.

La transmission d'un signal dans un support nécessite des précautions. Les caractéristiques du canal modifient réellement les propriétés du signal Transmission. Un canal de transmission est tout support physique servant de support à la transmission d'informations entre deux points distants, une source et une destination. Nous aborderons les deux différents canaux : FSO et OWC.

**I-2. LIEN INTERSATELLITE (ISL)**

Le lien intersatellite est une connexion directe entre deux satellites dans l'espace [I-2]. Il est utilisé pour assurer la liaison entre les stations terrestres de la zone de couverture d'un satellite et celles de la zone de couverture d'un autre satellite, lorsqu'aucun des deux satellites ne réussit à couvrir toute la zone [I-1].



**Figure I. 1 :** Liaison inter-satellites (ISL) [I-3].

L'utilisation de liaisons optiques inter-satellites présente certains avantages par rapport aux liaisons inter-satellites hyper fréquences : plus grande immunité aux interférences, débit de données plus élevé et divergence de faisceau d'émetteur plus petite. Le principal inconvénient des liaisons optiques inter-satellites est le système de pointage complexe requis. La complexité du système de pointage découle de la nécessité de pointer d'un satellite à un autre sur une distance de dizaines de milliers de kilomètres avec un angle de divergence de faisceaux de micro radians lorsque les satellites se déplacent et vibrent [I-4] [I-5].

### **I-3. LES SOURCES DE VIBRATIONS**

A cause des vibrations, le faisceau laser du satellite émetteur vibre, et donc les performances du système de communication se dégradent.

Les sources sont divisées en deux types : des sources externes et des sources internes.

#### **I-3-1. LES SOURCES EXTERNES**

Ces sources sont nombreuses et distinctes et on peut citer quelques-unes [I-6] [I-7] ;

- L'asymétrie de l'attraction terrestre ;
- L'attraction du soleil, de la lune, de la terre et des autres corps célestes ;
- La pression de la radiation solaire ;
- La traînée aérodynamique ;
- La dilatation et le rétrécissement de la structure du satellite à cause des variations de la température ;
- L'impact des micro-météores.

**I-3-2. LES SOURCES INTERNES**

Quelques sources internes causent des vibrations dans les communications lasers. Quelques mesures de ces vibrations ont été réalisées à bord du satellite OLYMPUS par l'agence spatiale européenne [I-8] [I-9] [I-10].

Parmi ces sources on peut citer :

Les vibrations et les impacts dus aux bruits internes.

Les vibrations des antennes du système de pointage.

Le bruit du système de poursuite.

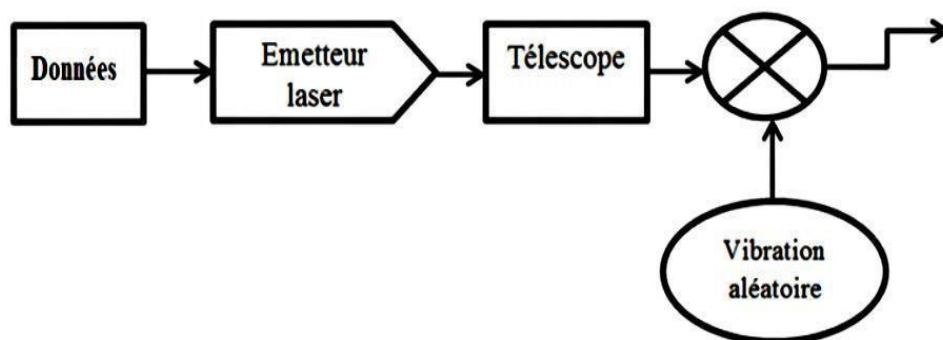
Les opérations des sous-ensembles constituant le satellite.

**II. Systèmes de communication optique par satellite**

Dans cette section, nous considérons un schéma de base du segment des communications optiques par satellite : l'émetteur, le récepteur et le système de suivi.

**II-1. LE SYSTEME D'EMETTEUR**

Le modèle d'émetteur (Figure I.2) pour la modulation (OOK) comprend un émetteur laser, un télescope et une atténuation aléatoire (effets de vibration). Les messages arrivent à l'entrée de l'émetteur. L'émetteur convertit les signaux électriques en signaux optiques en utilisant le laser. Le télescope émetteur collimate le rayonnement laser dans la direction du satellite récepteur [I-11].



**Figure I. 2 : Schéma de l'émetteur [I-11].**

**II-2. LE SYSTEME RECEPTEUR**

Le modèle de récepteur (Figure I.3) pour OOK comprend un télescope, un filtre passe bande optique, des pertes d'insertion d'entrée, un amplificateur optique, des pertes d'insertion de sortie, un filtre passe-bande optique, une photodiode PIN, un filtre électrique et un circuit de décision.

Le télescope récepteur concentre le rayonnement reçu sur le filtre optique. Le filtre optique empêche la plupart du rayonnement de fond de pénétrer dans les modules suivants du système.

Le rayonnement se propage à travers le filtre optique vers l'amplificateur optique.

L'amplificateur optique présente des pertes en entrée et en sortie en raison de la réflexion et de l'inadéquation optique. Le rayonnement de la sortie de l'amplificateur optique est une version amplifiée du rayonnement d'entrée mais avec un bruit d'amplificateur optique. Le filtre optique à la sortie de l'amplificateur empêche une partie du bruit de l'amplificateur de passer. Le rayonnement est converti en signal électrique par une photodiode. Le signal électrique est filtré par le filtre électrique. En fonction de l'amplitude du signal électrique et de l'heure d'arrivée, le circuit de décision décide du type d'information reçue [I-11].

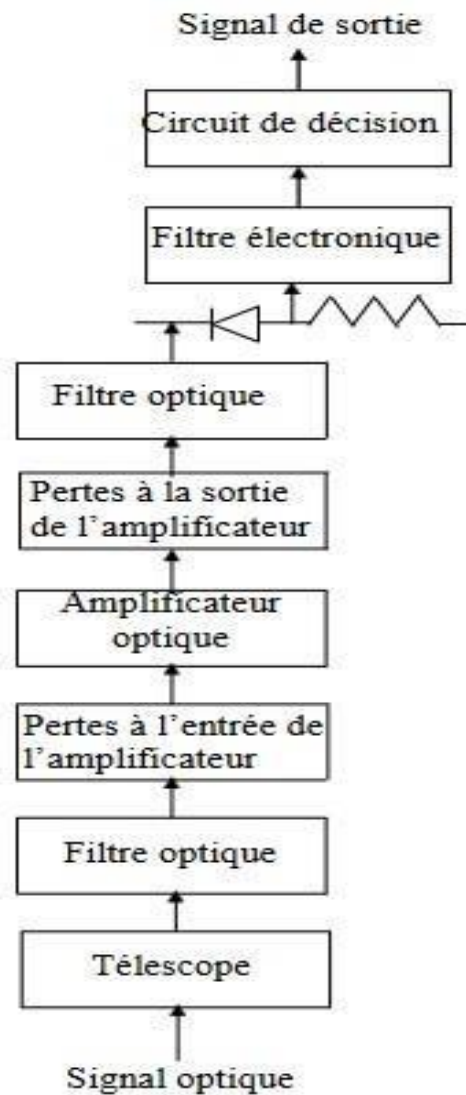


Figure I. 3 : Schéma du récepteur [I-11].

### II-3. LE SYSTEME DE SUIVI

Pour établir une communication optique entre deux satellites, la ligne de mire de leur optique doit être alignée pendant toute la durée de la communication. Pour répondre à cette exigence, les satellites utilisent les données des éphémérides (la position du satellite selon l'équation de l'orbite) pour le pointage grossier et le système de suivi pour le pointage fin vers l'autre satellite.

La méthode de base et populaire de suivi entre les satellites comprend l'utilisation d'un signal de balise sur un satellite et d'un détecteur quadratique et d'un système de suivi sur l'autre satellite [I-12].

L'élévation fine et l'angle d'azimut du système de pointage évaluent la direction de pointage à partir du signal de sortie du détecteur quadratique. La figure I.4 montre les principaux composants du système de suivi.

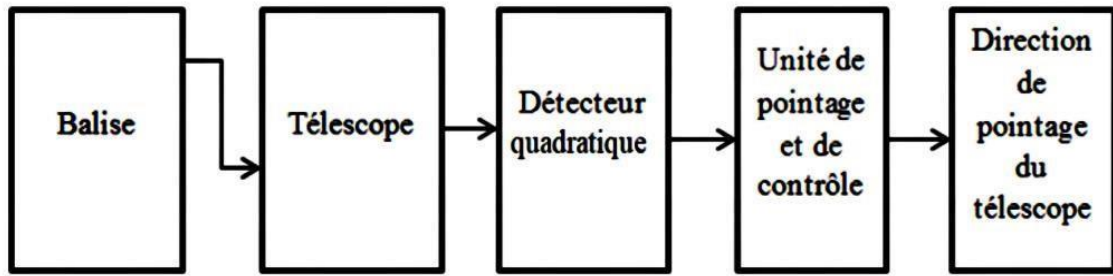


Figure I. 4 : Schéma du système de suivi [I-11].

Le rayonnement de la balise d'un satellite est reçu par le télescope de l'autre. Le télescope concentre les radiations reçues sur le détecteur quadratique. L'unité de pointage et de contrôle calcule la direction de pointage du télescope en fonction du signal du détecteur quadratique [I-13].

### III. Structure standard d'un système de transmission numérique dans les réseaux des satellites

Un système de transmission numérique dans les réseaux des satellites lasers comporte les dispositifs et composants suivant : [I-14] [I-15].

Une source (diode laser) et un modulateur permettant d'imprimer l'information à transmettre sur la porteuse optique. La modulation utilisée est une modulation par tous ou rien, l'un des états de la donnée binaire étant associé à la transmission d'une certaine intensité, l'autre à l'absence de signal. En pratique, l'émetteur est caractérisé par un taux d'extinction, écart (en décibel) entre la puissance transmise dans chacun des deux états, qui n'est pas fini.

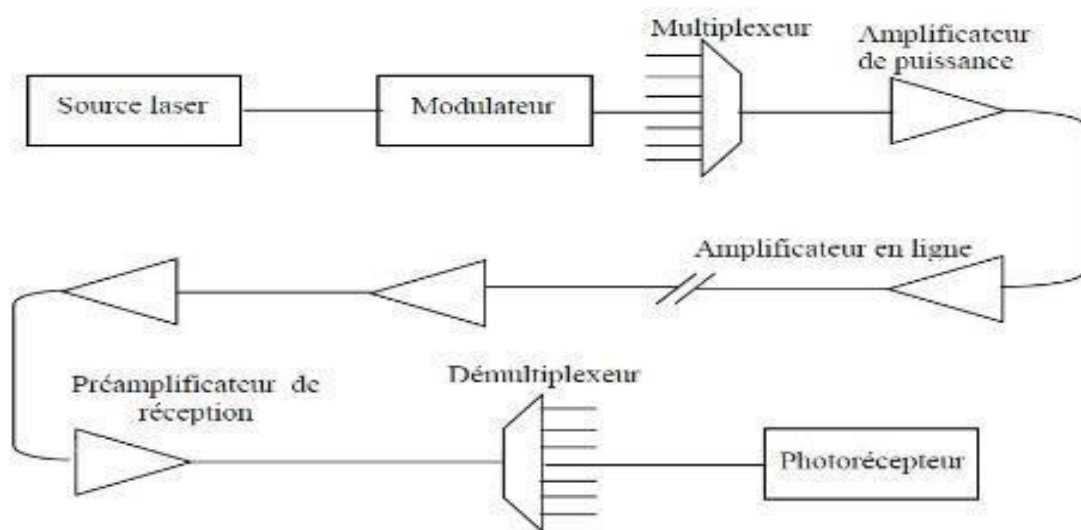


Figure I. 5 : Structure générale d'un système de transmission optique dans les réseaux des satellites [I-14].

**III-1. MODELE DES VIBRATIONS**

La méthode de base et populaire de suivi entre satellites comprend l'utilisation d'un signal de balise "beacon" et d'un système de suivi avec un détecteur quadratique sur chaque satellite. Le système de suivi fonctionne en mode de détection directe.

Dans cette section, nous présentons les modèles statistiques des systèmes de pointage du récepteur et de l'émetteur. En raison du bruit dans le système de suivi et des vibrations mécaniques, le faisceau de satellite émetteur vers le satellite récepteur vibre [I-16]. Les modèles d'erreur d'angle de pointage de direction orthogonale des vibrations sont basés sur une distribution normale [I-17]. Pour le premier satellite du réseau, l'angle d'erreur de pointage d'élévation est normalement distribué avec une densité de probabilité donnée par l'équation suivante :

$$f(\theta_v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v^2}} \exp\left(-\frac{\theta_v^2}{2\sigma_v^2}\right) \quad I - 1$$

Et nous pouvons moduler l'angle d'élévation de l'erreur de pointage dans n'importe quel satellite du réseau par [I-16] :

$$f(\theta_{vi}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{vi}^2}} \exp\left(-\frac{\theta_{vi}^2}{2\sigma_{vi}^2}\right) \quad I - 2$$

Où :

$\sigma_{vi}$  et  $\theta_{vi}$  sont respectivement l'écart type de pointage d'élévation et l'angle de pointage d'élévation du satellite  $i$  dans le réseau.

L'angle d'erreur de pointage en azimuth est normalement distribué avec la densité de probabilité dans le premier satellite du réseau est donner par l'équation suivante :

$$f(\theta_H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_H^2}} \exp\left(-\frac{\theta_H^2}{2\sigma_H^2}\right) \quad I - 3$$

Et pour n'importe quel satellite du réseau, nous pouvons écrire [I-18]:

$$f(\theta_{Hi}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{Hi}^2}} \exp\left(-\frac{\theta_{Hi}^2}{2\sigma_{Hi}^2}\right) \quad I - 4$$

Où :

$\sigma_{Hi}$  et  $\theta_{Hi}$  sont respectivement l'écart type de pointage azimuthal et l'angle de pointage azimuthal du satellite  $i$  dans le réseau.



L'angle radial d'erreur de pointage est la somme quadratique de l'azimut et des angles d'élévation :

$$\theta = \sqrt{\theta_H^2 + \theta_V^2} \quad I - 5$$

La même chose pour un ordre quelconque dans le réseau est [I-6] :

$$\theta_i = \sqrt{\theta_{Hi}^2 + \theta_{Vi}^2} \quad I - 6$$

Par symétrie, nous pouvons supposer que :

$$\sigma_{Hi} = \sigma_{\theta i} = \sigma_i \quad I - 7$$

Nous supposons que l'azimut et les processus d'élévation sont indépendants et distribués de manière identique, donc l'angle d'erreur de pointage radial est distribué par Rayleigh avec la densité de probabilité [I-17] :

$$f(\theta_i) = \frac{\theta_i}{\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{\theta_i^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad I - 8$$

Le modèle gaussien est souvent utilisé lors de l'analyse du système à impact mécanique. La plupart des impacts mécaniques sont transmis aux sous-systèmes internes du satellite. La densité de probabilité normale est donnée par [I-17] :

$$f(\theta_i) = (2\pi\sigma_i^2)^{1/2} * \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right) \quad I - 9$$

### **III-2. Le modulateur**

Afin de transmettre des informations dans les systèmes optiques numériques, il est nécessaire d'imprimer ces informations dans un signal physique à envoyer sur la fibre, c'est ce qu'on appelle la modulation, qui est une fonction essentielle de tout système de transmission. Il existe deux façons d'obtenir une modulation :

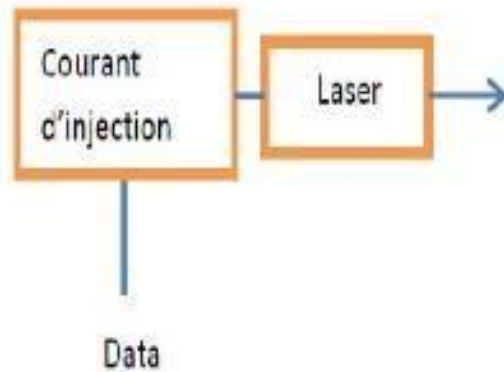
#### **III-2-A. Modulation directe**

Un des principaux avantages de l'utilisation des lasers à semi-conducteur pour les systèmes de télécommunications par fibres optiques réside dans le fait qu'il est possible de les moduler facilement : la modulation du courant qui les traverse entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Cette technique est appelée modulation directe [I-19].

Ainsi, il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser.

La modulation directe connaît beaucoup d'avantages, en particulier le faible coût de mise en œuvre. Un inconvénient majeur de cette méthode est que lorsqu'on module en amplitude le courant d'injection d'un laser cette opération s'accompagne d'une modulation de fréquence parasite ou chirp. Ces effets, conjugués à la dispersion chromatique de la fibre, provoquent un

élargissement de l'impulsion d'autant plus importante que la longueur de la fibre est grande (voir figure I.6) [I-19].



**Figure I. 6 : Modulation directe [I-19].**

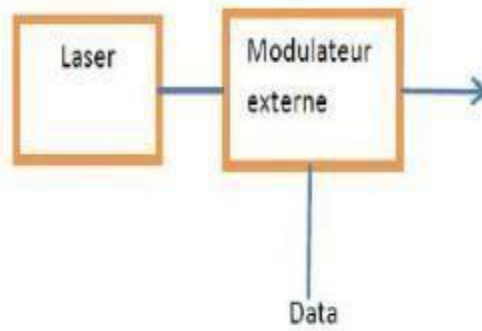
### **III-2-B. Modulation externe**

Les propriétés des diodes lasers vues précédemment font que la modulation directe est satisfaisante jusqu'à 5 Gigahertz environ mais qu'au-delà, cette méthode n'est plus applicable. Trop de dégradations (oscillations de relaxation, chirp, bruit, ...) apparaissent et limitent les capacités de transmission. La modulation externe est une bonne alternative permettant au laser d'émettre un signal constant. Et tous les défauts dus à la modulation du courant de polarisation seront atténués [I-19].

Elle consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu. Elle est obtenue en modulant directement le faisceau lumineux en sortie du laser et non plus le courant d'alimentation à l'entrée du laser. Ainsi les défauts de la modulation directe qui incombent au laser ne seront plus présents sur le signal optique.

La modulation est effectuée sur une onde pure et constante et par un composant indispensable : le modulateur externe. Celui-ci est commandé par une tension externe  $v(t)$ , modulée et représentative de l'information à transmettre. Le signal optique continu émis par le laser alimenté par un courant constant est donc peu dégradé. En traversant le modulateur, il subit les modifications du facteur de transmission et le signal de sortie se trouve modulé selon  $v(t)$ .

La modulation externe présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc d'envoyer des débits plus élevés (voir figure I.7) [I-19].



**Figure I. 7 : Modulation externe [I-19].**

Il existe plusieurs types de modulateurs, nous nous intéresserons plus particulièrement à ceux-ci modulateur Mach-Zehnder et le modulateur électroabsorptif.

### **III-3. Amplification optique**

L'amplification est une fonction essentielle en transmission et d'importants efforts de recherche ont été consacrés au cours de quarante dernières années à la mise au point d'amplificateurs optiques. L'amplificateur à semi-conducteurs, qui a fait l'objet de nombreux travaux depuis le début des années 1970, n'a pas connu beaucoup de développements en tant qu'amplificateur inséré dans un système de transmission, si l'on excepte quelques démonstrations dans la fenêtre des 1.3  $\mu\text{m}$ , où il n'existe pas d'amplificateurs à fibre dopée industriellement disponibles. En revanche, ses caractéristiques lui offrent un large domaine d'utilisation dans tout ce qui touche au traitement optique du signal (multiplexage et démultiplexage, régénération ...), la réalisation de ces fonctions mettant en œuvre des effets non linéaires. L'amplificateur à fibre dopée, apparu à la fin des années 1980, et très rapidement passé au stade industriel : il constitue aujourd'hui un dispositif clé de tous les futurs réseaux de télécommunications optiques [I-11] [I-21]. Outre sa fiabilité, ses qualités reposent sur deux caractéristiques essentielles, d'une part sa linéarité (au sens où sa constante de temps ne le rend sensible qu'à la puissance moyenne des signaux qui le traversent, ce qui évite toute distorsion de ces derniers), d'autre part son bruit faible et voisin des limites théoriques. D'abord, l'amplificateur optique permet de dépasser la limite imposée l'atténuation de la fibre puisque la puissance envoyée en ligne peut être considérablement augmenté et que le signal peut être ré amplifié au cours de sa propagation, au prix il est vrai de l'addition de bruit ; cette utilisation a conduit à la notion de système amplifié, indissociable de la technique de multiplexage en longueur d'onde.

L'amplificateur en ligne se substitue aux répéteurs régénérateurs intermédiaires.

Ensuite, utilisé comme préamplificateur, il améliore considérablement la sensibilité des photorécepteurs, en dépassant la limite imposée par le bruit thermique. C'est cette propriété qui a

enlevé la plus grande partie de leur intérêt aux recherches sur la réception. En contrepartie, comme il a déjà été indiqué, les niveaux de puissance injectés dans les fibres donnent naissance à des effets non linéaires qui constituent une source de dégradation supplémentaire, mais peuvent aussi être utilisés de manière bénéfique [I-20].

#### **III-4. Structure développée d'un système de transmission optique dans les réseaux des satellites**

A cause des vibrations continues du faisceau laser émis dans les réseaux des satellites lasers, plusieurs améliorations ont été introduites dans leurs structures standards afin de réduire les effets de ces vibrations et améliorer la qualité de communication.

Les figures (I.2) et (I.3) représentent les structures développées de l'émetteur et du récepteur dans les réseaux des satellites lasers [I-18] [I-21].

Le modèle de récepteur (I.3) comporte : un télescope, un filtre passe bande optique, un amplificateur optique, un filtre passe bande optique, une photodiode (PIN), un amplificateur électrique, un filtre électrique et un circuit de décision.

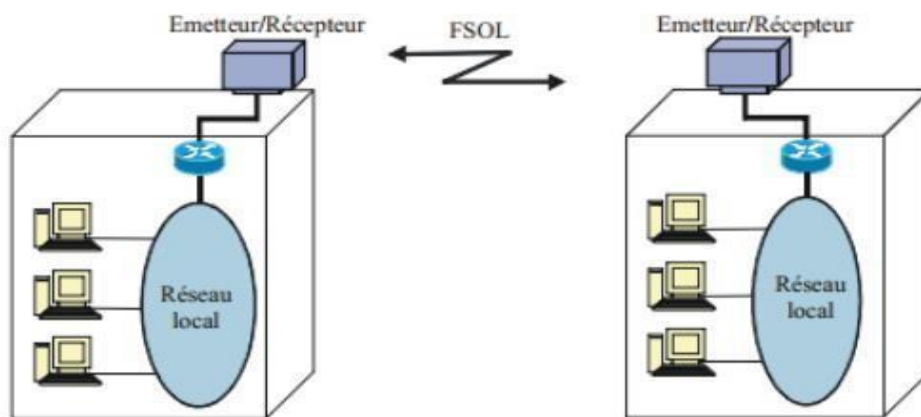
Le modèle de l'émetteur (I.2) comporte : un émetteur laser, télescope à éléments en phase (telescope phased array), unité de contrôle et un générateur des vibrations aléatoires.

Le message arrive à l'entrée de l'émetteur, ce dernier convertit le signal électrique en un signal optique en utilisant le laser, ensuite le télescope émetteur colmate les radiations lasers vers la direction du satellite récepteur. L'unité de contrôle adapte le gain du télescope émetteur aux amplitudes des vibrations aléatoires, ce qui fait diminuer les effets de ces dernières et améliorer la qualité de la communication. Le télescope récepteur focalise les radiations envoyées par l'émetteur vers un filtre optique, ce dernier empêche une grande quantité du bruit de grenaille de pénétrer dans l'étage suivant du récepteur. Après le filtrage, le signal optique sera amplifié par un amplificateur optique se trouvant à la sortie du filtre optique, cet amplificateur ajoute au signal amplifié un bruit thermique dont une importante partie sera éliminée par un filtre optique se trouvant à la sortie de l'amplificateur optique. Après le filtrage, le signal optique sera converti par une photodiode en un signal électrique, ce dernier va être amplifié par un amplificateur électrique avant de subir une autre opération de filtrage par un filtre électronique afin de supprimer une partie du bruit thermique créé par l'amplificateur électrique, enfin le circuit de décision décide selon l'amplitude du signal électrique obtenu le type du bit reçu 1 ou 0 [I-21].

**IV. Technique de transmission optique**

**IV-1. Technologie FSO (Free Space Optics)**

Ces dernières années, les réseaux optiques sans fils utilisant la technologie FSO sont apparus d'une manière significative. Par opposition, cette technologie FSO, permet de répondre aux besoins des opérateurs de télécommunications. Les liaisons optiques en espace libre (FSOLs) constituent une technologie optique de communications qui fait appel à la propagation de la lumière en espace libre, à savoir de transmettre des données entre deux points distants (voir la figure I.9). En outre, elle présente un intérêt lorsqu'une connexion physique par le biais de câble ou de fibre optique est inadaptée, en particulier pour des raisons de coûts [I-22] [I-23].



**Figure I. 8 : Structure d'une liaison FSO utilisée pour raccorder deux réseaux locaux [I-23].**

**IV-1-A. Principe de fonctionnement de la Technologie FSO**

Le principe de base de la technologie FSO consiste en une transmission laser en espace libre dans une partie du spectre lumineux visible ou infrarouge. Les systèmes FSO sont conçus pour effectuer une connexion entre deux zones ou différentes zones, en visibilité directe LOS (Line-Of-Sight) à un débit très élevé. La FSO permet la transmission de tout type de données avec un débit égal à celui de la fibre optique tout en ayant la souplesse et les avantages d'un réseau radio sans fil. Comme illustré sur la figure I.10, une liaison FSO nécessite un émetteur, un canal de propagation et un récepteur [I-24] [I-25].

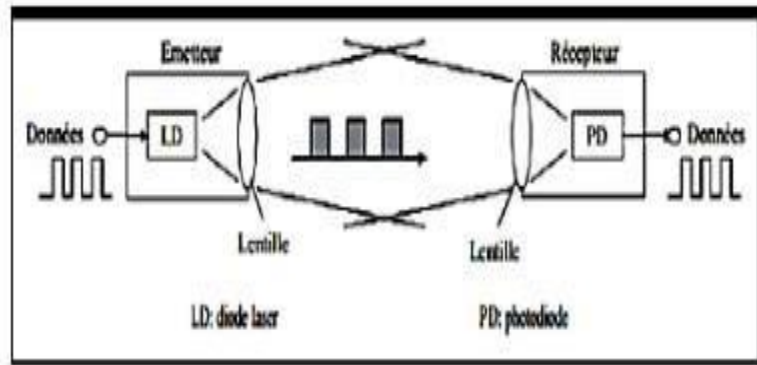


Figure I. 9 : Configuration de base d'une liaison optique en espace libre [I-25].

La modulation d'intensité peut être réalisée en faisant varier le courant de polarisation. La modulation de fréquence ou de phase peut être obtenue en changeant la longueur de la cavité laser. Cependant, les modulateurs externes limitent la plage de modulation et nécessitent des temps de réponse relativement élevés. Aux fréquences optiques, ces modulateurs fonctionnent directement sur l'intensité de la porteuse (carré d'amplitude du champ électrique) plutôt que l'amplitude de la porteuse [I-26].

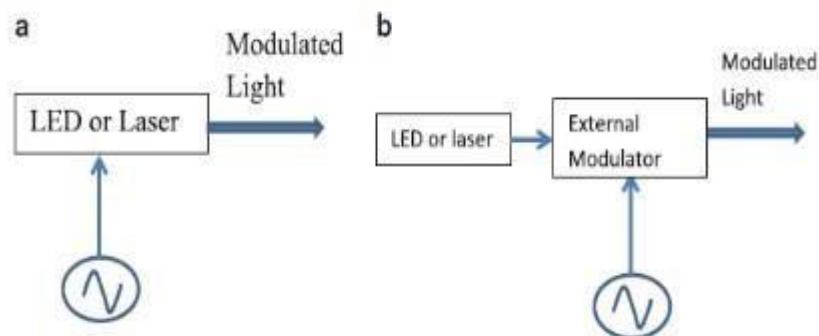


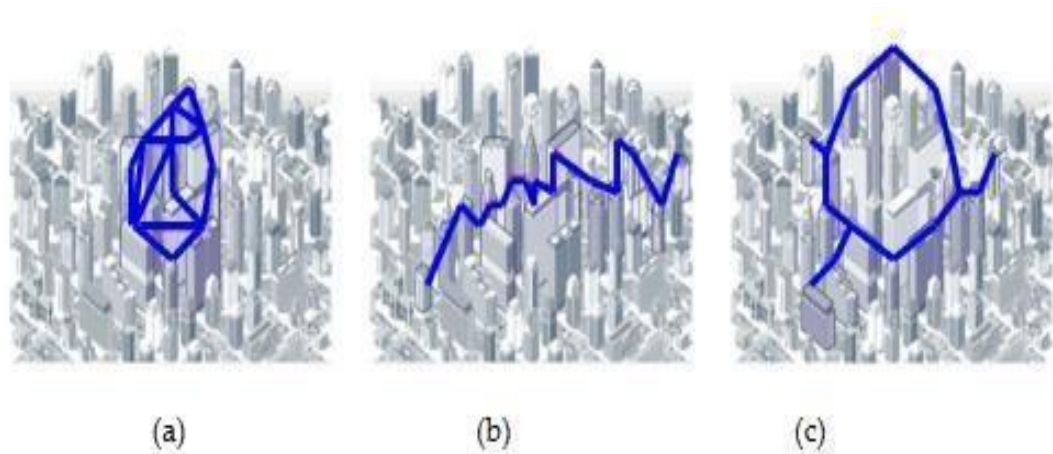
Figure I. 10 : Modulateurs optiques. (a) Modulateur interne. b) Modulateur externe [I-26]

#### IV-1-B. Architectures de base de la technologie FSO

La technologie FSO fournit une solution réseau plus flexible pour atteindre haut capacité de transmission. Elle fournit aussi des bonnes qualités de transmission des données par rapport à la fibre optique (plus facile à mettre en œuvre et plus rapide de déploiement). Il y a trois principes d'architecture FSO [I-27] :

- **Point à point** : Cette architecture est une connexion dédiée offrant une meilleure bande passante, mais moins évolutive.
- **Maillé** : Cette architecture offre une redondance et une fiabilité accrue avec des ajouts de nœuds, mais limite les distances plus que d'autres options.

- **Point à multipoint** : Offre des connexions moins chères et facilite l'ajout de nœuds, mais au détriment d'une bande passante inférieure à celle de l'option point à point[I-27].



**Figure I.11 : Topologies de réseaux optiques en espace libre:(a) point-multipoints et maillage. (b) point-à-point et (c) anneau et point-à-point [I-27].**

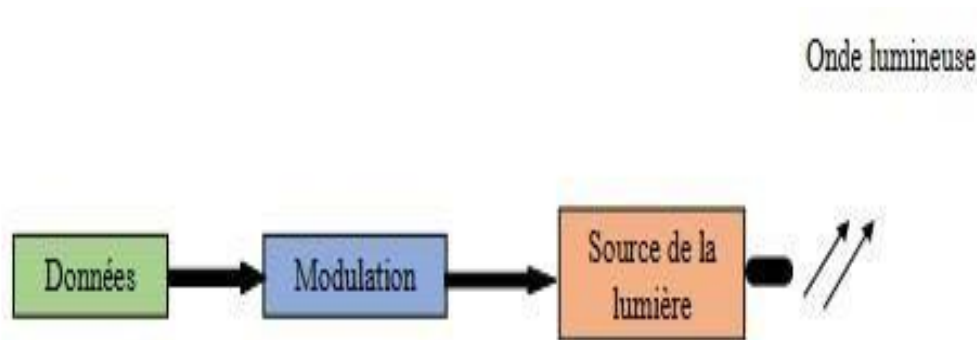
#### **IV-1-C. Structure d'un système de communication optique FSO**

##### **IV-1-C-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 [I-28]. 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.



**Figure I.12 : Schéma synoptique du bloc émetteur FSO [I-28].**

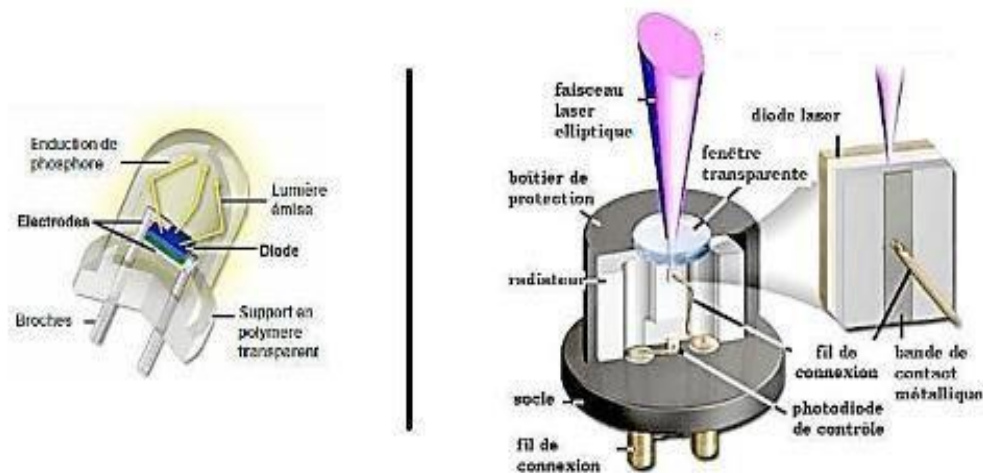
**IV-1-C-2. Les diodes électroluminescentes (DEL)**

Les diodes électroluminescentes (DEL) sont des structures semi-conductrices émettant de la lumière. Due à leur puissance d'émission relativement faible, elles sont généralement utilisées dans des applications sur des courtes distances avec des besoins spectrales modérées, jusqu'à 155 Mbps [I-29], telle que les liaisons optiques sans fil à l'intérieur des bâtiments (Indoor Wireless Optical communications « IWOC »). L'avantage majeur des sources DEL c'est leurs vies extrêmement longues et le faible coût [I-30].

**IV-1-C-3. 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 [I-31].

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 [I-31].



**Figure I. 8 : Architecture une DEL et Structure d'une diode laser [I-31].**

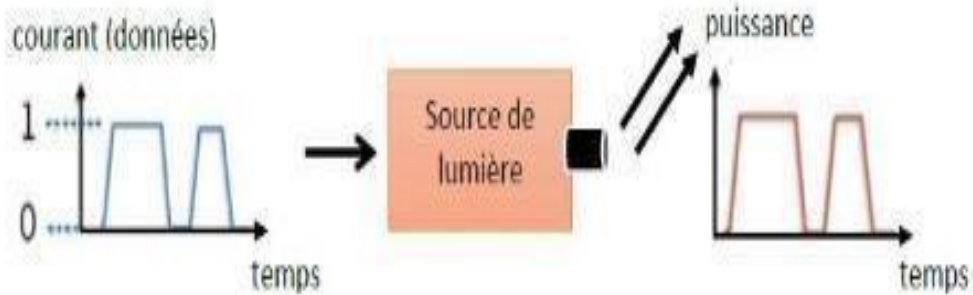
Dans le bloc d'émission il existe aussi deux types de modulation : modulation d'intensité et modulation externe.

**IV-1-C-3-a) La modulation d'intensité (IM : Intensity Modulation)**

L'idée de cette modulation réside dans la transmission des informations sur une puissance instantanée du signal porteur. Ce qu'on peut l'avoir en faisant varier le courant de conduite de



la source optique directement en correspondance avec les données à transmettre. Le principe de base d'une transmission à modulation directe est présenté par la figure (I.15) [I-32].



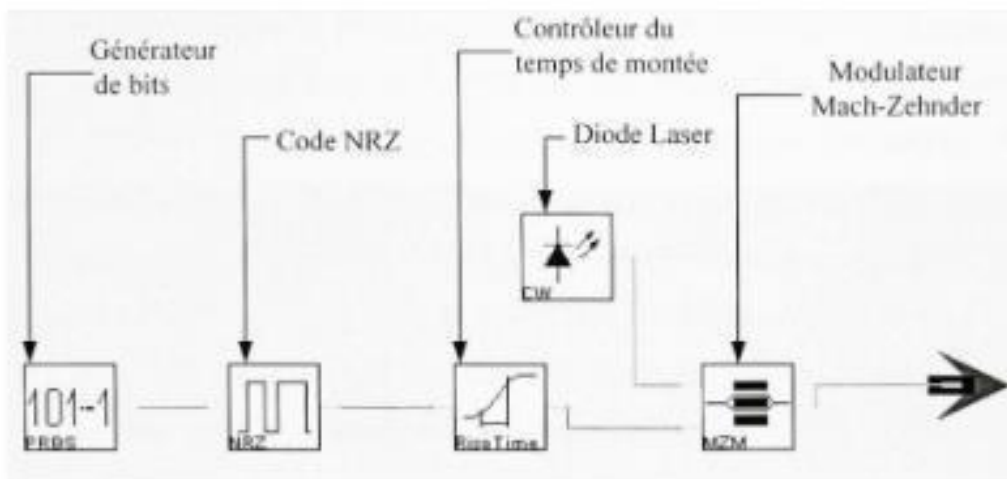
**Figure I. 9 : Principe de base d'une modulation directe [I-32].**

**IV-1-C-3-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 chip.

La figure suivante présente le schéma de la modulation externe [I-33].

Dans les systèmes de communications optiques, plusieurs types de modulateurs sont utilisés, 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 [I-33].



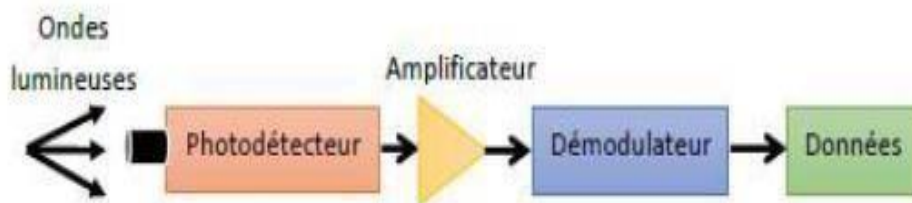
**Figure I. 10 : Schéma de la modulation externe [I-33].**

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 photodétecteur qui se comporte comme un compteur de photons

et un générateur de courant. La première propriété requise pour un photodétecteur 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 photodétecteurs à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser [I-34].

Le photodétecteur 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 [I-34].

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).



**Figure I. 11 : Schéma bloc du récepteur optique [I-34].**

#### **IV-1-C-4. 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 [I-35].

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...) [I-35].

**IV-1-D. Les avantages et les inconvénients des FSO**

Outre leur coût peu élevé et leur facilité d'installation, les dispositifs FSO ne requièrent pas de licence d'utilisation du spectre contrairement aux systèmes radiofréquences. De plus, la taille réduite du faisceau laser rend la détection, l'interception ou le brouillage très difficile. La sécurité intrinsèque des dispositifs FSO, plus élevée que celle des liaisons radioélectriques, permet ainsi de transférer des données sensibles sans codage.

Comme cette technologie nécessite une visée directe entre l'émetteur et le récepteur, la liaison est vulnérable à un certain nombre de facteurs :

- L'obstruction physique
- Les conditions météorologiques qui limitent la portée des FSO notamment en cas de brouillard (compte tenu de leurs petites tailles et de leur forte densité, les fines particules d'eau présentent dans le brouillard diffusent la lumière aux fréquences utilisées)
- Les effets de scintillations, conséquences des turbulences atmosphériques, qui engendrent des variations de l'indice optique de l'air de façon localisée et temporaire. Lorsque le signal se propage dans l'air, la puissance reçue sur le détecteur varie en raison de ce phénomène ce qui engendre des erreurs d'interprétation des signaux transmis. On y remédie en utilisant des émetteurs multiples, chacun empruntant un trajet légèrement différent à travers l'atmosphère ce qui contribue également à lisser les perturbations [I-36].

**IV-1-E. Quelques caractéristiques techniques des dispositifs FSO**

La longueur d'onde à laquelle fonctionne un dispositif FSO est le premier paramètre à considérer. En pratique, les lasers utilisés émettent des rayonnements infrarouges situés le plus souvent dans une gamme de longueur d'onde autour de 1550 nm car la sensibilité des photodiodes utilisées en réception est bien meilleure à 1550 nm que dans le visible ou le proche infrarouge. De plus, les faisceaux laser présentent davantage de risques pour la sécurité oculaire dans le domaine visible que pour des longueurs d'onde de l'ordre de 1550 nm. La lumière à 1550 nm est en effet absorbée par la cornée et le cristallin et ne focalise pas sur la rétine contrairement aux faisceaux laser dans le visible et le proche infrarouge qui peuvent engendrer des dommages irréversibles sur la rétine. C'est un facteur à ne pas négliger pour une transmission optique en espace libre où la puissance optique est élevée et où le faisceau est accessible à l'utilisateur. Le simple fait de choisir des lasers à 1550 nm permet d'assurer que le système est sans danger d'exploitation (Classe 1M) même si la puissance du faisceau laser est importante [I-36].

Le tableau ci-dessous indique les ordres de grandeur des principales caractéristiques des systèmes commercialisés à ce jour [I-36].

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

**Tableau I. 1 :** Caractéristiques de base pour des Systèmes FSOs [I-36].

#### IV-1-F. Les paramètres d'une liaison FSO

Avant de déployer des liaisons optiques atmosphériques, il est important de savoir leur disponibilité et leur fiabilité [I-37] :

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

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

A partir de ces données techniques, on pourra connaître la valeur de l'affaiblissement géométrique de la liaison et sa marge brute [I-37].

#### IV-1-G. Applications des systèmes FSO

Les systèmes FSO sont utilisés dans les applications suivantes [I-38] :

- 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.

## **IV-2. Technologie OWC (Optical Wireless Communication)**

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

Les communications optiques sans fil offrent à la fois une alternative et une solution complémentaire aux communications radiofréquences [I-39] [I-40] [I-41]. Les systèmes optiques et RF utilisent tous les deux des ondes électromagnétiques pour transmettre l'information. Cependant, les bandes de fréquences utilisées sont très différentes, les systèmes RF exploitent des fréquences comprises entre quelques kilo Hertz et quelques dizaines de Giga Hertz alors que les systèmes optiques sans fils utilisent des fréquences beaucoup plus élevées situées généralement dans le domaine Infrarouge (IR).

Par rapport aux radios fréquences (RF), les communications optiques sans fil (OWC) [I-42] offrent des avantages techniques et opérationnels indéniables tels que : très forte bande-passante, robustesse aux interférences électromagnétiques, très grande confinement spatial permettant une réutilisation illimitée du spectre, sécurité inhérente, efficacité énergétique, absence de réglementation sur l'utilisation du spectre ou encore disponibilité et coût de composants largement utilisés dans les technologies de communications optique.

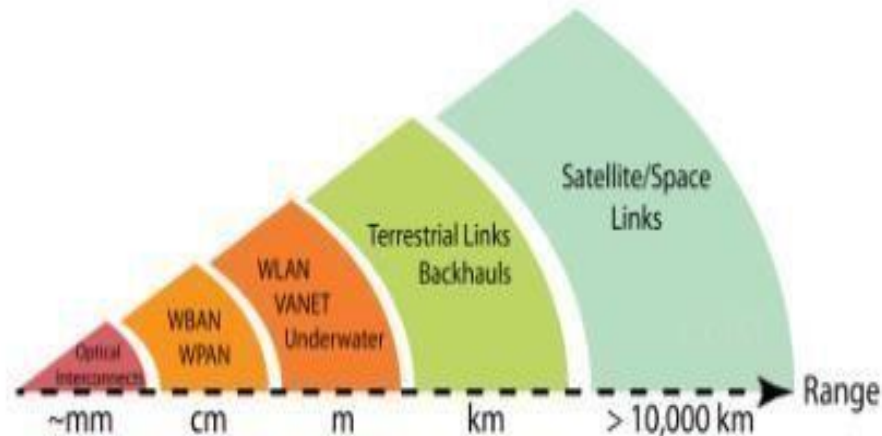
Le terme OWC se réfère à tout ce qui est en relation avec la transmission optique dans un support non guidé. Bien que ses variations basées sur la fréquence de fonctionnement, mais elle pourrait avoir une utilisation différente, selon les éléments suivants. Les communications optiques sans fil se sont récemment élargies au domaine visible avec les communications optiques dans le visible, VLC (Visible Light Communications) i.e., entre 390-750 nm. VLC peut être utilisé dans divers applications, y compris les réseaux locaux sans fil, les réseaux personnelles sans fil et les réseaux véhiculaires... D'autre part, les systèmes OWC terrestre point-à-point, également appelés des systèmes optiques en espace libres (FSO), fonctionnent aux fréquences d'infrarouges proches (750-1600 nm). Ces systèmes utilisent généralement des émetteurs lasers et offrent un protocole de liaison transparente rentable avec des débits de données élevés, c'est-à-dire 10 Gbps par longueur d'onde. Ainsi qu'au domaine Ultraviolet (UV) i.e., en dessous de 400 nm. UVC (ultra-violet communication) peut être utilisé dans divers applications, y compris les capteurs sans fil et les réseaux ad hoc [I-43] [I-44].

### **IV-2-A. Les Domaines d'application Existants Et Envisagés**

Des variantes de l'OWC peuvent être employées dans une large gamme d'applications de communication, allant des interconnexions optiques dans les circuits intégrés aux liaisons terrestres et aux communications par satellite. Des interconnexions optiques dans les circuits intégrés aux communications par satellite, en passant par les liaisons terrestres [I-45].

La figure I.19 présente une catégorisation des applications OWC en fonction de la portée de transmission.

Certaines de ces applications existent et sont déjà disponibles dans le commerce, tandis que d'autres sont envisagées pour une utilisation future.



**Figure I. 12 : Les applications OWC en fonction de la portée de transmission [I-45].**

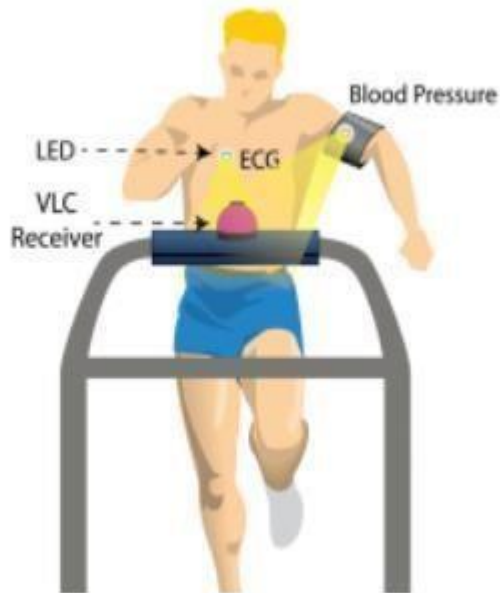
#### **IV-2-B. Les applications de OWC**

Les systèmes OWC peuvent être appliqués à une large gamme d'applications parmi lesquelles [I-46] [I-47] :

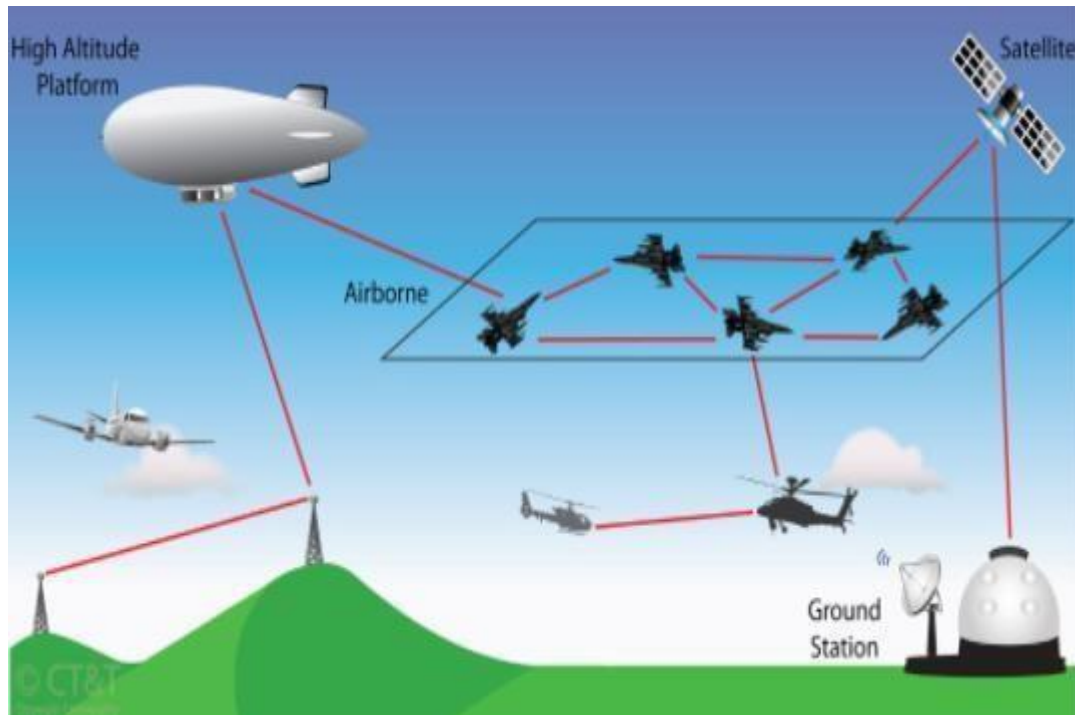
- Liaisons LAN « outdoor »,
- Liaisons domestiques « indoor » (voir la figure I.22),
- Télésurveillance « indoor »,
- Réseaux de capteurs (voir la figure I.23),
- Éclairage intelligent (VLC),
- Liaisons satellites, plates-formes d'altitude et communications sous-marines (voir la figure I.24),
- Liaisons sans-fil entre puces, cartes et calculateurs (voir la figure I.20).



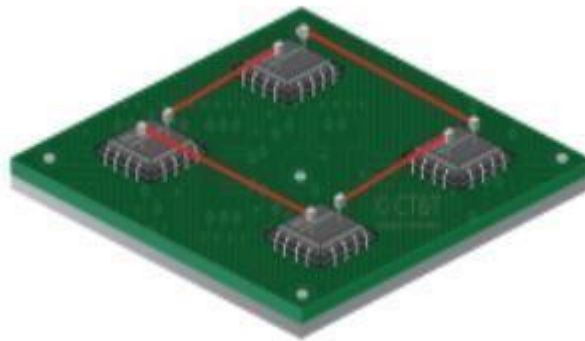
**Figure I. 18 : Liaisons LAN-OWC : réseau véhiculaire utilisant la technologie VLC où les véhicules communiquent entre eux à base des LEDs (applications moyennes portées OWC) [I-46].**



**Figure I. 19 : WBAN optique en espace libre : application biomédicale mesure le cardiostress (applications courtes portées OWC) [I-48].**



**Figure I. 20: Liaison OWC : l'application peut être déployée pour prendre en charge les communications aéronautiques, avion-à-HAP, aéronautique / satellite / station de base (applications longues portées OWC) [I-49].**



**Figure I. 21 : L'interconnexion optique en espace libre entre les circuits intégrée (applications ultra-courtes portées OWC) [I-50] [I-47].**

#### **IV-2-C. Modulation de technologie OWC :**

Les canaux OWC sont différents des canaux RF traditionnels, Cela a conduit à l'utilisation de différentes méthodes de modulation. Les schémas de modulation qui s'adaptent bien aux canaux RF ne sont pas nécessairement performants dans le domaine optique. Quatre critères qui guident le choix d'une technique de modulation spécifique pour les systèmes OWC.



Un critère particulièrement important à appliquer est la puissance moyenne utilisée (efficacité énergétique) d'un format de modulation donné. Ceci est important compte tenu des risques pour les yeux et de la consommation d'énergie dans les terminaux mobiles. Deuxième norme est la bande passante du canal disponible et la bande passante du récepteur Exiger. Le troisième facteur est la complexité du programme format de modulation (et consommation d'énergie en portable équipement). Le dernier ensemble de facteurs a à voir avec les limitations physiques Dans un émetteur au format modulé (c'est-à-dire LD ou LED) Peut être à considérer.

La modulation dans les systèmes OWC consiste en deux étapes : dans la première étape, l'information est codée sous forme d'onde(s), et ensuite (deuxième étape) ces formes d'ondes sont modulées sur la puissance instantanée de la porteuse [I-51].

La modulation d'intensité (IM) et la détection directe (DD) sont les techniques de transmission privilégiées dans les systèmes OWC [I-51] [I-52].IM est obtenue en faisant varier le courant de polarisation du LD ou de la LED.

Dans les systèmes OWC, le signal transmis doit toujours être positif. La détection directe est la méthode la plus simple qui peut être utilisée pour détecter un signal modulé en intensité. Le photodétecteur génère un courant proportionnel à l'intensité de la puissance optique incidente.

Une description simple du canal IM/DD est la suivante [I-51] :

$$Y(t) = Rx(t) \otimes h(t) + Rn(t) \quad I - 10$$

R : est la sensibilité du photodétecteur

$y(t)$  : est la courante photo instantané reçu

$(t)$  : est le temps absolu

$\otimes$  : désigne la convolution

$h(t)$  : est la réponse impulsionnelle du canal

$x(t)$  : est la puissance transmise instantanée

$n(t)$  : est le bruit de fond le bruit de fond (BN)

Trois grands types de schémas de modulation peuvent être appliqués aux OWC

(a) modulation en bande de base, (b) modulation multi porteuse et (c) modulation multicolore [I-53] [I-54].

#### **a. Modulation en bande de base :**

Les principales techniques de modulation en bande de base envisagées dans l OWC comprennent (i) la modulation d'amplitude d'impulsion (PAM), (ii) la modulation d'impulsion position (PPM), (iii) la modulation par intervalle d'impulsions (PIM) et (iv) la modulation d'amplitude et de phase sans porteuse (CAP).

##### **i. PAM**

La PAM est une technique de modulation simple qui est largement utilisée dans les systèmes OWC. La modulation On-Off Keying (OOK) est un type de modulation PAM à deux niveaux seulement. OOK est une approche de modulation OWC et est facile à mettre en œuvre dans ces systèmes en raison de la capacité des LD et des LED à s'allumer et s'éteindre rapidement.

Cependant, l'OOK n'est pas efficace par rapport à d'autres formats de modulation [I-54].

### **ii. PPM**

Le PPM est un autre type de modulations qui est largement pris en compte dans les systèmes OWC [I-55]. Le PPM différentiel (DPPM) a été évaluée dans le système OWC afin d'augmenter les débits de données réalisables. Il consomme en moyenne moins d'énergie que le PPM.

Cependant, la distorsion du signal DPPM est plus importante que celle du signal PPM [I-56]

### **iii. PIM**

La PIM code l'information en insérant des espaces vides entre deux impulsions. Sa conception repose sur une synchronisation précise, ce qui peut accroître sa complexité par rapport au PPM.

La modulation d'intervalle (DPIM) est une version numérique de la modulation par intervalles d'impulsions. La performance est améliorée dans DPIM par rapport à PPM en supprimant l'espace de trame redondant dans le PPM. Cependant, les erreurs peuvent se propager d'une image à l'autre [I-57].

### **iv. CAP**

La modulation CAP est un format de modulation prometteur qui peut être utilisé dans les systèmes OWC pour atteindre des débits de données plus élevés. Il s'agit d'une de transmission à bande passante bidimensionnelle efficace en termes de bande passante [I-52].

Dans la modulation CAP, deux filtres orthogonaux sont choisis pour moduler deux flux de données différents. OOK et PPM sont les schémas de modulation les plus populaires les plus utilisés dans les systèmes OWC [I-58].

## **b. Modulation multi porteuse**

Des techniques plus avancées peuvent être utilisées dans les systèmes OWC pour transmettre des porteuses multiples, comme la modulation de sous-porteuse (SCM). Cela permet d'offrir un accès multiple à des utilisateurs simultanés et un débit de données élevé. Cependant, le SCM n'est pas économe en énergie comme les schémas à porteuse unique [I-59]

Dans [I-60], un débit de données élevé a été de données élevées tout en réduisant les besoins moyens en modulation SCM. Dans [I-61], le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) a été appliqué dans les systèmes OWC d'intérieur afin d'atteindre des débits de données élevés sur un canal bruyant et de réduire l'ISI.

Le système n'a toutefois pas atteint un rapport signal/bruit élevé. Les principaux inconvénients de l'OFDM sont la sensibilité au décalage de fréquence et le bruit de phase, ainsi que le rapport élevé entre la puissance de crête et la puissance moyenne (PAR) [I-62].

En général, l'utilisation d'une modulation complexe permet d'améliorer les performances des systèmes OWC, comme l'atténuation de l'effet ISI et l'augmentation des débits de données. Toutefois, ces techniques de modulation nécessitent un complexe.

### **c. Modulations multicolores :**

La modulation multicolore a récemment été envisagée pour fournir des débits de données élevés ou un accès multiple aux utilisateurs [I-63] [I-55]. La lumière blanche peut être générée à partir de LED de type rouge, vert et bleu (RVB), ce qui signifie que les données peuvent être transférées à travers chaque LED.

Le multiplexage par répartition en longueur d'onde Le multiplexage utilisé ici est le WDM (Multiplexage par répartition en longueur d'onde). En outre, [I-64] a obtenu de la lumière blanche à partir de diodes électroluminescentes de quatre couleurs, ce qui donne un meilleur résultat par rapport aux LED à trois couleurs en termes d'accès multiple et des débits de données plus élevés grâce aux capacités de modulation améliorées de modulation des LD.

### **IV-2-D. Avantages et inconvénients de technologie OWC :**

Les communications optiques sans fil bénéficient d'une bande passante quasiment infinie et non régulée [I-65]. En effet, à la différence des systèmes RF dont le spectre est surchargé, la bande optique s'étale sur plusieurs centaines de Giga Hertz et peut être utilisée librement (Sans licence). Cette propriété permet le développement d'applications hautes débits.

De plus, les ondes IR ont un comportement proche des ondes lumineuses, elles ne peuvent pas traverser une paroi opaque (mur) et sont rarement diffractées par une ouverture. En configuration indoor, les ondes IR restent donc confinées dans la pièce où se trouve l'émetteur.

Ce confinement augmente la sécurité de la liaison optique. Cette même propriété implique aussi qu'il est possible d'utiliser des systèmes optiques identiques (utilisant les mêmes longueurs d'onde aux mêmes instants) dans différentes pièces contiguës sans aucun risque de perturbation.

Enfin, les systèmes optiques sans fil peuvent être déployés sans créer d'interférences électromagnétiques avec les systèmes RF préexistants [I-66].

Les communications optiques sans fil sont cependant pénalisées par un plus faible budget optique lié au fort niveau de bruit comparé aux communications RF. Ce bruit peut être issu du canal optique (lumière du soleil, éclairage) ou être généré au niveau du récepteur (bruit thermique).

De plus, le fait que l'onde IR ne traverse pas les murs impose, pour la conception d'une liaison reliant plusieurs pièces, l'installation d'un point d'accès par pièce (ces points d'accès étant interconnectés par une liaison filaire). Ceci est très différent en radio où un seul émetteur peut couvrir l'équivalent d'une habitation entière (comme c'est le cas en wifi). Enfin, les systèmes optiques sont extrêmement sensibles aux phénomènes de blocages (shadowing). Ces phénomènes de blocages sont provoqués par la rupture du lien entre l'émetteur et le récepteur ou par un obstacle présent dans l'environnement [I-67].

### **V. Conclusion**

Le but de notre travail est d'étudier un système de communication optique sous les canaux FSO et OWC. Nous avons présenté dans ce chapitre, le principe de ces deux technologies, les différentes caractéristiques, applications ainsi que leurs avantages et inconvénients.

On peut dire que l'espace libre, utilisé comme moyen de propagation de la lumière, est devenu un élément clé des systèmes de télécommunications optiques.

À l'avenir, Le haut débit par satellite sera nécessaire pour les réseaux à satellites géostationnaires exclusivement destinés à la communication avec des plates-formes en orbite basse pour répondre à la demande croissante de débit de données dans les secteurs des télécommunications, de la navigation, de l'observation de la Terre, de la météorologie et de l'espace.

# **Chapitre II :**

**Généralité sur**

**l'intercommunication satellitaire**

## CHAPITRE II : GENERALITE SUR L'INTERCOMMUNICATION SATELLITAIRE

### II-1. INTRODUCTION

Communiquer d'une place à un autre est un objectif alléchant. Une manière pour effectuer cet objectif est de réaliser un réseau de satellites qui couvre le globe [II-1] [II-2].

Ces dernières années, la croissance explosive du nombre de satellites LEO a ouvert la voie à de nombreuses opportunités et défis pour le développement de réseaux non terrestres [II-3] [II-4]. En raison de l'augmentation significative de la capacité de transport d'informations du réseau satellitaire, davantage de services de communications terrestres peuvent être transférés dans l'espace [II-5].

Face aux exigences de communication à faible latence et à longue distance, les satellites LEO jouent un rôle important [II-6]. Dans une transmission sol-satellite-sol, l'émetteur au sol doit s'associer à un satellite fiable en tant que relais. Par rapport à un satellite en orbite haute, l'un des défis que doit relever un satellite LEO est sa couverture relativement restreinte [II-7].

Aujourd'hui un nombre de consortium sérieux développe des réseaux de satellites de communications, pour servir les utilisateurs n'importe où dans le monde. Le lien inter satellite (ISL) utilise le laser comme support dans les communications entre satellites [II-8].

### II-2. Historique

Des satellites ont été commandés pour plusieurs projets expérimentaux au cours de la dernière décennie et Charge utile développée pour démontrer et étudier la technologie de communication optique proche de la Terre [II-9] [II-10] [II-11]. Vous trouverez ci-dessous un bref récapitulatif chronologique des étapes de ces enquêtes.

Il a fallu attendre l'année 1945 pour que le concept de satellite voie le jour. C'est le britannique Arthur C. Clarke qui introduit le premier concept de communication par satellite [II-12]. L'ère spatiale a commencé avec le lancement du premier satellite artificiel actif de l'URSS le 4 octobre 1957, il s'agit de Spoutnik 1. En 1960, les Américains mettent en orbite leur premier satellite (Echo 1) en mode passif. Les deuxièmes types de satellite furent ensuite actifs. Ils possédaient leur propre système de réception et d'émission. Le premier satellite actif, Telstar 1 fut américain. En août 1964, le premier satellite fixe en orbite géostationnaire Syncom 3 permit véritablement d'assurer un service de télécommunication point à point pour des transferts sur longue distance [II-12]. Depuis 1965, Le premier satellite géostationnaire commercial fut Intelsat I. La même année, le premier satellite de télécommunications soviétiques de la série des Molniya est lancé.

Mais il a fallu attendre les années 80, pour assister au " boom des satellites commerciaux". Et grâce à l'évolution des tailles des antennes et des technologies des satellites, les services de diffusion se sont ensuite largement imposés. La multiplication des offres de la télévision a poussé à l'adoption de standards de communication d'abord analogiques puis numériques. Bien que la première démonstration réussie de liaison descendante de communications optiques ait eu lieu en 1994, La quantité de développement de systèmes a considérablement augmenté au cours des cinq à sept dernières années.

Ensuite, on a **OICETS/LUCE - 2006**. Le satellite japonais d'essai de communication optique en orbite Satellite d'essai (OICETS) transporté le laser à l'aide d'un équipement de communication (LUCE) afin de démontrer les communications inter orbitales entre OICETS et ARTEMIS. Aussi, Il s'agissait également de faire la démonstration de la communication entre l'orbite terrestre basse et le sol en utilisant les stations terrestres optiques au Japon et en Europe, y compris une station terrestre optique transportable (OGS) [II-13].

**TerraSAR X - 2008**. Le terminal de communication laser (LCT) sur le satellite allemand TerraSAR-X, développé par Tesat Spacecom dans le cadre d'un contrat avec l'Agence spatiale allemande. Allemande (DLR) a été utilisée pour effectuer une liaison descendante vers l'OGS du DLR à Oberpfaffenhofen. Bien que TerraSAR-X soit équipé d'un terminal laser de transmission cohérente BPSK, les essais en liaison descendante n'ont pas inclus la réception de signaux cohérents. En revanche, la puissance reçue et la qualité du front d'onde ont été mesurées dans le cadre de l'évaluation des performances. Et la qualité du front d'onde a été mesurée dans le cadre de l'évaluation des performances requises par le système d'optique adaptative [II-14].

**OPALS – 2014** : L'Optical Payload for Lasercom Science (OPALS) est un terminal expérimental développé par le Jet Propulsion Laboratory de la NASA pour une utilisation à bord de la station spatiale internationale (ISS). Il a permis la démonstration d'une liaison descendante de 50 Mbps en transférant une vidéo de l'ISS au Laboratoire du télescope de communications optiques (OCTL) du JPL en Californie. Plus tard en 2015, elle a permis pour la première fois, la démonstration de correction OA d'un signal de communication optique provenant d'une plateforme LEO couplée à une fibre monomode [II-15].

**SOCRATES/SOTA – 2015** : Le terminal du petit transpondeur optique (SOTA) du satellite japonais Satellite de recherche sur les communications optiques spatiales de technologie avancée (SOCRATES) a été développé par NICT (Institut national des technologies de l'information et de la communication) favorisé l'application de la communication optique en espace libre à l'aide de microsatsellites. L'un de ses objectifs scientifiques est d'expérimenter le QKD (Distribution de clés quantiques). Il a également fait la démonstration de liaisons LEO (classiques) avec des

stations au Japon, en Allemagne et en France. Il a été utilisé pour établir la deuxième liaison descendante à ce jour, y compris la correction d'OA au niveau du récepteur afin de coupler le signal dans une fibre monomode [II-16].

### II-3. PRINCIPE DE TRANSMISSION PAR SATELLITES

La transmission par satellites se divise en deux parties [II-17] :

- Une base d'émission (station de transmission) : liaison ascendante (Emetteur-satellite).
- Une base de réception (station de réception) : liaison descendante (Satellite- récepteur).

#### II-3-1. Description d'un système de télécommunication par satellite

Le système de transmission d'informations par satellite se compose des éléments suivants [II-18] :

- La station terrienne d'émission ;
- Lien montant ;
- La station spatiale (satellite) ;
- Le lien descendant.

La figure (II.1) illustre les différentes composantes d'un système de télécommunications par satellite [II-18].

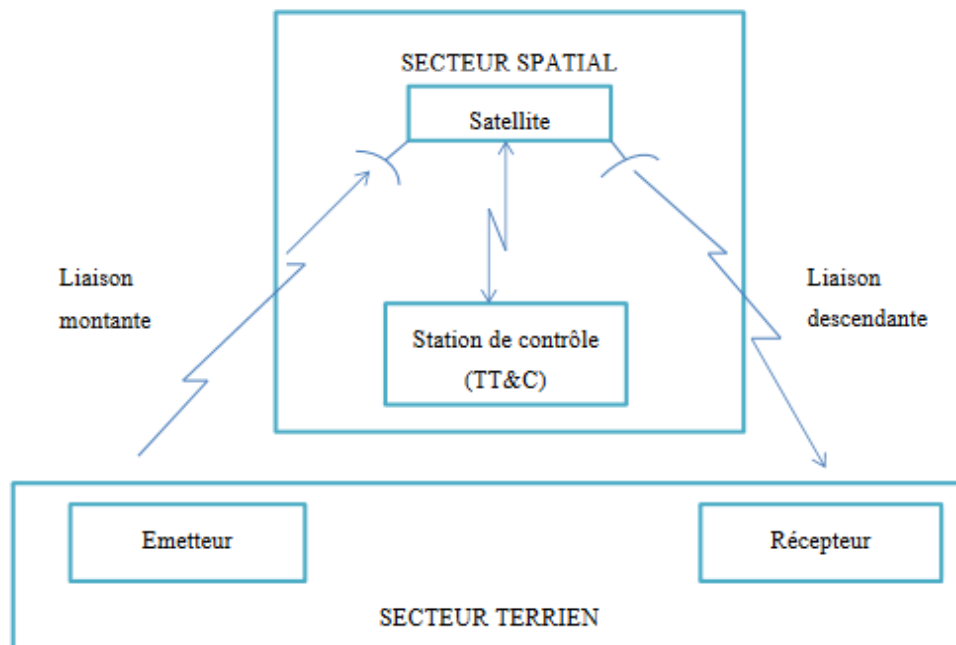


Figure II- 1 : Les composantes d'un système de télécommunications par satellite [II-18].

#### II-3-2. Lien montant

L'élément principal de la partie liaison montante d'un système à satellites est l'émetteur de la station au sol.



### **II-3-3. Secteur terrien**

Le secteur terrien est constitué par l'ensemble des stations terriennes, le plus souvent raccordées aux terminaux des usagers par un réseau terrestre ou directement dans le cas de petites stations (VSAT : Very Small Aperture Terminale) et de stations mobiles. Les stations se distinguent par leur taille, qui varie selon le type de trafic (téléphone, télévision, données). On distingue en outre les stations fixes, les stations transportables, les stations mobiles. Certaines stations à la fois émettrices et réceptrices. D'autres sont réceptrices uniquement (RCVO : Receive Only) : c'est le cas par exemple des stations de réception d'un système de radiodiffusion par satellite, ou d'un système de distribution de signaux de télévision ou de données [II-19] [II-20]. Le coût des stations terriennes peut être déterminant dans un réseau de communication pour lequel la sécurité, la disponibilité et la fiabilité des équipements sont des exigences de premier ordre.

### **II-3-4. Secteur spatial**

Le secteur spatial comporte le satellite et l'ensemble des moyens de contrôle situés au sol, c'est à dire l'ensemble des stations de poursuite, de télémétrie et de télécommande (TT&C : tracking, telemetry, and command), ainsi que le centre de contrôle du satellite où sont décidées toutes les opérations liées au maintien à poste et vérifiées les fonctions vitales du satellite [II-21].

### **II-3-5. Lien descendant**

L'élément principal dans la partie de liaison descendante d'un système satellitaire est le transmetteur à bord du satellite.

L'émetteur satellite se compose des étages finaux, qui visent généralement l'amplification de puissance du signal de radiofréquence HF de bas niveau et sa transmission.

### **II-3.6. Bandes de fréquences et services**

La fréquence de communication d'un satellite doit respecter les normes internationales qui déterminent les bandes de fréquences disponibles selon les régions où les communications auront lieu. Cette réglementation est importante car la bande utilisée ne doit pas coïncider avec d'autres bandes prioritaires (communications militaires, navigation etc....) et provoquer des interférences. La puissance émise augmente avec la fréquence et le gain de l'antenne, et on peut définir les fréquences comme suit ;

Pour réussir à Co-positionner plusieurs satellites sur une même position orbitale, et éviter toutes interférences. Les bandes UHF (Ultra High Fréquence) et SHF ont été allouées au domaine des télécommunications spatiales par l'UIT (Union Internationale des

Télécommunication).

Les bandes de fréquences mises en œuvre pour les télécommunications par satellite sont le plus souvent comprises entre 1 et 30 GHz. En dessous de 1 GHz les ondes sont principalement réfléchies et diffusées par l'atmosphère. Au-dessus de 30 GHz les liaisons satellites sont possibles mais l'absorption atmosphérique est importante donc la technologie d'amplification devient plus complexe. Cet organisme a défini la plage de fréquences réservées aux satellites de télécommunication comme suit [II-22] [II-23] [II-24].

N°	Bandes	Fréquences	Services
1	L	1 – 2 GHz	Communication avec les mobiles
2	S	2 – 3 GHz	Communication avec les mobiles
3	C	4 – 6 GHz	Communications civiles Nationales et internationales, TV
4	X	7 – 8 GHz	Communications militaires
5	KU	11 – 14 GHz	Communication civiles nationales et internationales, télévision.
6	Ka	20 – 30 GHz	Nouveaux systèmes d'accès aux réseaux large bande
7	EHF	21 – 45 GHz	Communications militaires

**Tableau II. 1 : Les fréquences utilisées par les satellites des télécommunications [II-25].**

Bande	Lien montant	Lien descendant	Services
L	2 GHz	1 GHz	Service de positionnement mobile par satellite
S	4 GHz	2 GHz	Service audio radio numérique, recherche spatiale
C	8 GHz	4 GHz	Services fixes par satellite
X	12.5 GHz	8 GHz	Services fixes par satellite, communications militaires, satellites d'observation de la Terre
Ku	18 GHz	12.5 GHz	Service de diffusion par satellite, services fixes par satellite
K	26.5 GHz	18 GHz	Service de diffusion par satellite, service fixe par satellite
Ka	40 GHz	26.5 GHz	Services de diffusion par satellite, liaisons inter satellites, imagerie par satellite

**Tableau II. 2 : Bandes de fréquences et services [II-26].**

## II-4. CONSTELLATION DE SATELLITES

Une constellation de satellite peut être définie comme plusieurs satellites semblables de même type et ayant la même fonction et qui sont conçus pour être similaires, complémentaires et orbités pour un but commun sous un contrôle partagé [II-27]. De plus, l'avantage d'avoir une plus grande bande passante pousse à se diriger vers des environnements permettant de transporter les applications multimédias.

Plusieurs systèmes peuvent fournir ces services [II-28] :

- Les satellites géostationnaires GEO,
- Les satellites MEO (Mid Earth Orbit),
- Les satellites LEO (Low Earth Orbit).

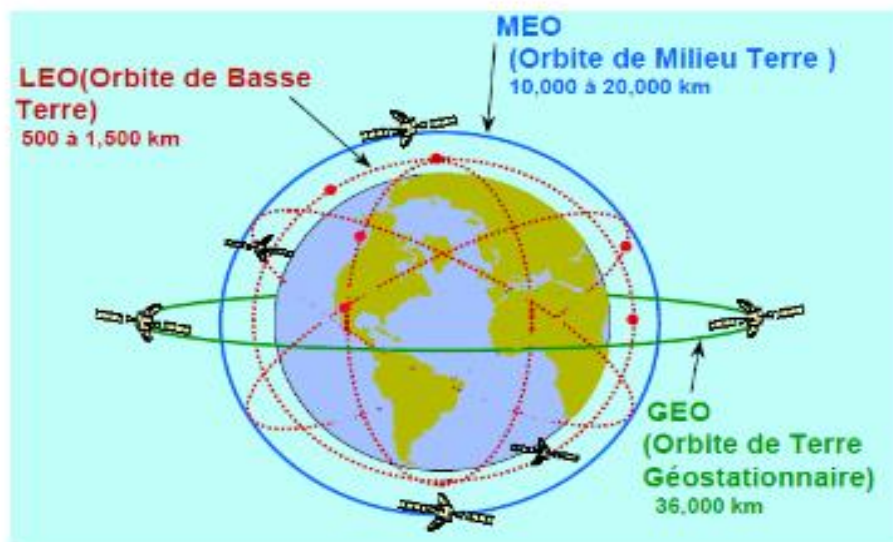
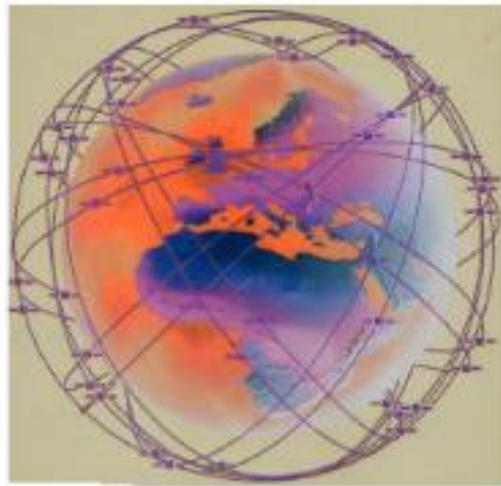


Figure II- 2 : Différents types d'orbites [II-29].

### II-4-1. Les constellations de satellite basses (LEO)

Un système à satellite en orbite basse utilise des satellites défilants (pour un observateur placé à la surface de la Terre ) situé sur une orbite circulaire ,à une altitude comprise entre 700 et 1800 Km .On parle de constellation .Les délais de propagation sont réduits de 15 à 30ms pour un simple bande .Le nombre de satellites nécessaire à une couverture mondial et permanente varie de 20 à 70 satellites en fonction de l'altitude retenue, du type de constellation et de diversité souhaitée, c-à-dire de la possibilité offerte (ou non) à un terminal de combiner les signaux provenant de plusieurs satellites simultanément [II-29].



**Figure II- 3 : Les constellations de satellite (LEO) [II-29].**

## **II-5. ORBITE SATELLITAIRE LEO**

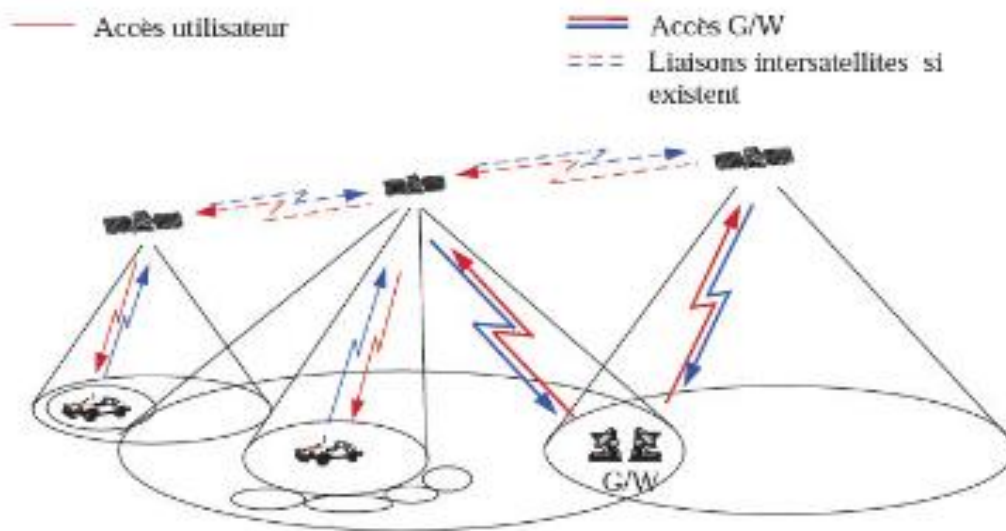
L'orbite est la trajectoire suivie par un objet tournant autour d'un autre objet. Les orbites satellites peuvent avoir des formes (circulaires, elliptiques) et des orbites très différentes déterminent la durée de vie utile de l'appareil qui y est placé et les fonctions qu'il peut remplir. Les éléments caractéristiques d'une orbite sont principalement son altitude, c'est-à-dire la distance qui sépare cette orbite de la surface terrestre, sa forme, qui peut être circulaire ou elliptique, et son mouvement par rapport à la terre. Il en existe plusieurs types dont :

Ils font référence à des satellites qui évoluent en orbite basse. Plusieurs grands systèmes (Iridium, Globalstar, SkyBridge, Teledesic) se fondent sur de telles constellations. L'avantage principal de ces systèmes est le temps de latence très court, généralement de 10 ms pour un satellite à une altitude de 1 500 km. Cette qualité en fait des candidats idéaux pour des applications interactives impliquant des terminaux mobiles dotés d'antennes omnidirectionnelles et d'amplificateurs à faible puissance.

### **II-5-1. Architecture du réseau LEO**

Le réseau est constitué d'un ensemble des satellites en orbite basse qui constituent avec quelques stations de base un système de communication global et accessible de tout point sur la terre. Les satellites peuvent être reliés entre eux à travers des ISL. Ces ISL, au nombre de 4, permettent à un satellite d'être relié aux deux satellites adjacents de son plan et aux 2 satellites des plans voisins (1 satellite sur chaque plan adjacent droite et gauche). Ceci est le cas du système IRIDIUM ainsi que la proposition faite par la CNES pour le projet RNRT. Pour des autres systèmes comme Skybridge, on n'utilise pas des ISL.

Notons que des stations terrestres nommées Gateway G/W peuvent servir à plusieurs fonctions comme relier le réseau satellitaire à d'autres réseaux terrestres. L'architecture générale du système est représentée dans la figure II.4 [II-30].

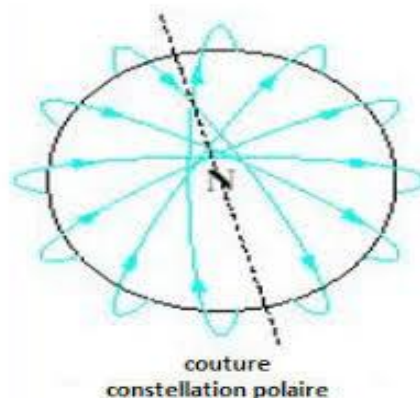


**Figure II- 4 : Architecture de la constellation de satellites [II-29].**

On distingue deux types de constellations : les constellations polaires et les constellations inclinées [II-31].

#### II-5-1-A. Constellations polaires

Ce sont celles dont le plan orbital fait un angle de  $90^\circ$  avec l'équateur ; l'intersection des plans orbitaux se faisant aux pôles. Les orbites polaires assurent une couverture importante des zones polaires, qui sont malheureusement des zones désertiques ne comptant pas beaucoup d'utilisateur [II-31].



**Figure II- 5 : Constellations polaires [II-31].**

### II-5-1-B. Constellations inclinées

Ce sont des constellations dont les plans orbitaux font un angle avec le plan équatorial très différents de  $90^\circ$  bénéficient d'une meilleure répartition des satellites autour de la terre [II-31].

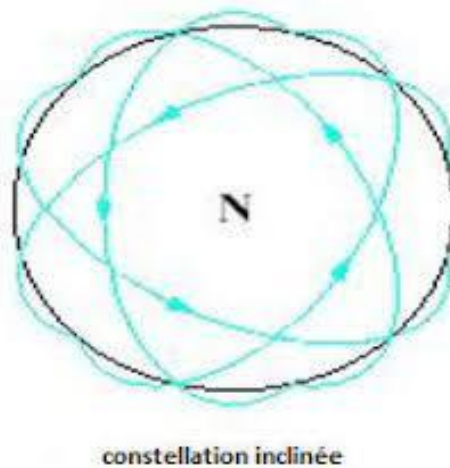


Figure II- 6 : Constellations inclinées [II-31].

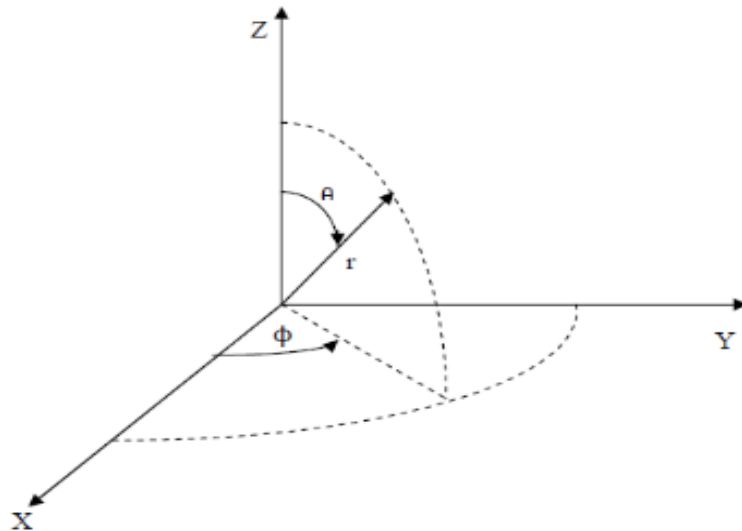
### II-5-2. Paramètres des satellites LEO

#### II-5-2-A. Coordonnées des satellites LEO (sphériques)

On adopte les systèmes à coordonnées sphériques pour représenter la position des satellites LEO [II-32]. La raison est que les satellites sont arrangés en orbites, qui sont en général également espacées entre elles. Les satellites sur la même orbite peuvent être mesurés par la latitude de la Terre, avec une longitude fixe. La représentation des systèmes à coordonnées sphériques consiste de deux paramètres angulaires  $\theta$  et  $\varphi$  qui sont exactement la représentation de la latitude et de la longitude de la Terre. Donc, c'est judicieux de choisir les systèmes à coordonnées sphériques au lieu de ceux cartésiens ou autres, pour la facilité de calcul et de la représentation. En premier lieu, on doit construire un système à coordonnées sphériques sur les trois axes cartésiens [II-32].

La figure II.7 : illustre les trois axes :  $x$ ,  $y$  et  $z$ , et l'interprétation correspondante des coordonnées sphériques qui sont représentées par les trois paramètres suivants :  $r$ ,  $\theta$  et  $\varphi$ . Ces derniers représentent les coordonnées d'un point  $p$  dans l'espace tridimensionnel. Le sens des paramètres est :

- $r$  la distance de  $p$  à l'origine,
- $\theta$  un angle entre l'axe  $z$  et le vecteur de position,
- $\varphi$  un angle entre l'axe  $x$  et la projection dans le plan  $xoy$  du vecteur de position.



**Figure II- 7 : Coordonnées sphériques sur les axes cartésiens [II-32].**

On peut utiliser les équations suivantes (II.1) pour passer des coordonnées sphériques à celles cartésiennes :

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \phi \\ y &= r \sin \theta \sin \phi \\ z &= r \cos \theta \end{aligned} \quad II - 1$$

#### **II-5-2-B. Vitesse de rotation des satellites [II-29]**

La rotation angulaire de la Terre, calculée par l'équation (II - 2), est égale à 0.2618 rad/h.

$$w_t = \frac{2\pi[\text{rad}]}{24[\text{heurs}]} \quad II - 2$$

Le rayon d'une orbite est calculé en ajoutant le rayon équatorial de la Terre, 6378 km, à l'altitude des satellites. Ceci donne les valeurs de  $R_g = 42,178$  km et de  $R_1 = 7158$  km. La vitesse d'un satellite LEO relative par rapport à la Terre, calculée en utilisant l'équation (II - 2), est égale à  $V_1 = 26,804$  km/h.

$$V_1 = \frac{w_t R_g^{3/2}}{R_1^{1/2}} \quad II - 3$$

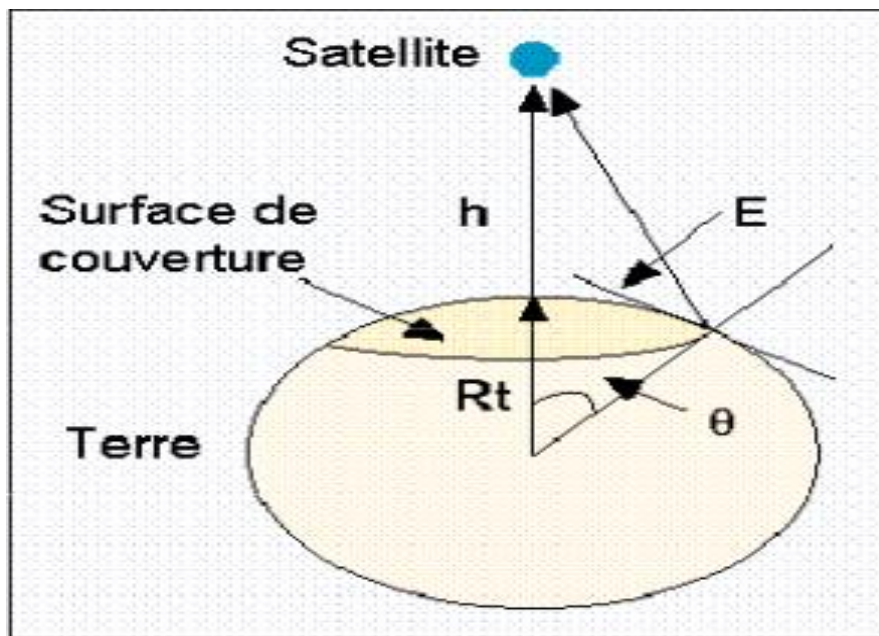
**II-5-2-C. Surface de couverture des satellites**

La surface de couverture  $A$  d'un satellite est donnée par l'équation (II – 4) où  $R_t$  est le rayon de la Terre, et est l'angle central de la Terre [II-31].

$$A = 2\pi R_t^2(1 - \cos \theta) \quad \text{II - 4}$$

Cet angle  $\theta$  est calculé en utilisant l'équation (II – 5), où  $R_e$  est le rayon de la Terre,  $E$  est l'angle d'élévation minimal, et  $h$  est l'altitude du satellite.

$$\theta = \left[ \cos^{-1} \left( \frac{R_e \cos E}{R_e + h} \right) \right] \quad \text{II - 5}$$



**Figure II- 8 : Surface de la couverture d'un satellite [II-29].**

**II-6. Transmission data LEO-Ground**

En ce qui concerne les communications par satellite LEO, il est généralement nécessaire de tenir compte de l'effet Doppler [II-33] et l'effet de la propagation par trajets multiples [II-34].

L'effet multi trajet est le phénomène de propagation des signaux de radiofréquence (RF) arrivant à l'antenne réceptrice par différents chemins depuis l'antenne émettrice. Les ondes électromagnétiques de chaque chemin arrivent au récepteur à des moments différents et donc à des phases différentes.

La superposition de plusieurs signaux avec des phases différentes au niveau du récepteur entraîne une modification de l'amplitude du signal reçu, ce qui produit ce que l'on appelle l'évanouissement par trajets multiples.



Si l'on considère que le signal reçu n'est constitué que de composantes de signaux à trajets multiples, la fonction de densité de probabilité (PDF) du signal obéit à la distribution de Rayleigh.

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] \quad II - 6$$

Où  $r$  et  $\sigma^2$  représentent l'amplitude du signal reçu et la puissance moyenne de la propagation par trajets multiples, respectivement. En considérant que le signal reçu est composé d'un signal en ligne de mire (LOS) et d'un signal à trajets multiples, la PDF du signal obéit à la distribution de Rice.

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{rz}{\sigma^2}\right) \quad II - 7$$

Où  $r$  indique l'amplitude du signal reçu,  $z$  représente l'amplitude du signal LOS, et  $\sigma^2$  est la puissance moyenne de la propagation par trajets multiples [II-35].

En général, nous supposons que les stations terrestres sont construites dans des zones ouvertes non urbaines, ignorant ainsi l'effet des réflexions causées par les bâtiments. En raison des différentes densités atmosphériques, la diffusion est généralement générée dans la troposphère à une altitude d'environ 10 à 20 km au-dessus du sol. Pour les satellites LEO dépassant plusieurs centaines de km, cette longueur de liaison ne représente que 2 à 3 % de la longueur totale de la liaison, de sorte que l'effet de trajets multiples qui en résulte est insignifiant.

En outre, l'interférence inter-symboles (ISI) due à la propagation par trajets multiples peut être éliminée au maximum en insérant un intervalle de garde entre les symboles OFDM, où l'intervalle de garde est plus grand que l'extension maximale du délai de propagation par trajets multiples du canal de communication par satellite. Si le préfixe cyclique (CP) est rempli dans l'intervalle de garde, l'interférence inter-canal (ICI) due à la propagation par trajets multiples peut également être évitée. Il s'agit d'un moyen couramment utilisé pour la transmission des signaux OFDM. Par conséquent, l'impact de l'effet multi trajet est ignoré dans ce document. Lorsqu'il y a un mouvement relatif entre le satellite et la station terrestre, la fréquence porteuse transmise reçue par la station terrestre est décalée en fréquence, c'est le phénomène de décalage Doppler. Elle est préjudiciable aux communications numériques utilisant la démodulation par corrélation

et ne peut donc pas être ignorée. Comme le montre Figure II.9, la vitesse réelle du satellite est  $\vartheta$ , et la vitesse relative du satellite par rapport à la station terrestre est :

$$\vartheta' = \vartheta \cdot \sin \theta \quad II - 8$$

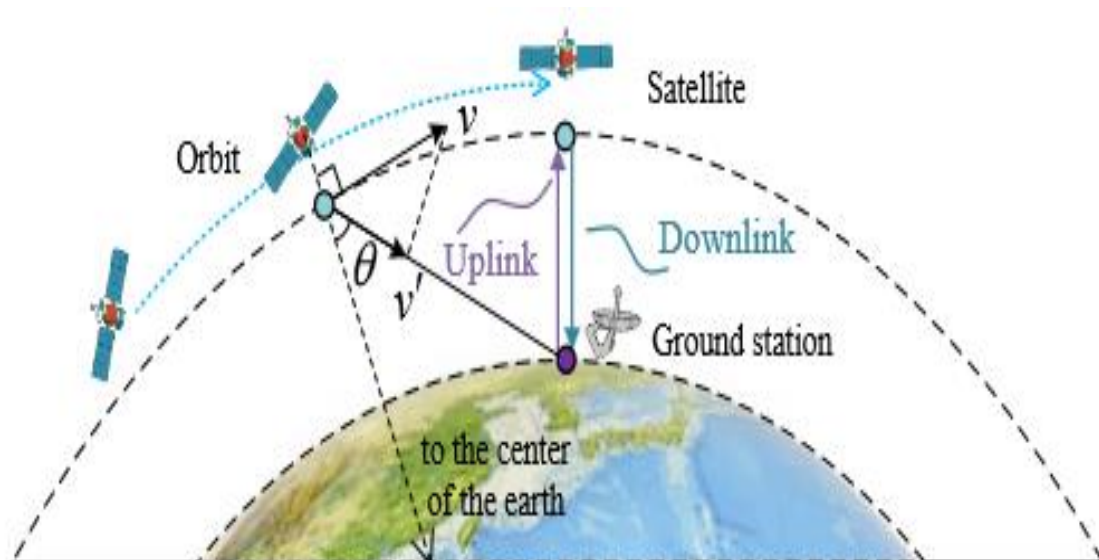
Qui varie de manière dynamique. Le décalage Doppler est défini comme suit :

$$\Delta f_c = \frac{\vartheta'}{c} \cdot f_c \quad II - 9$$

Où  $f_c$  désigne la fréquence de la porteuse,  $\Delta f_c$  représente le décalage de la fréquence de la porteuse, c'est-à-dire le décalage de la fréquence Doppler, et  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s est la vitesse de la lumière. Conformément à la norme 401.0-B du Comité consultatif pour les systèmes de données spatiales (CCSDS) [II-36], la vitesse maximale de déplacement relatif entre un satellite LEO et une station terrestre est de 10 km/s, et le taux de variation maximal de la vitesse est de 380 m/s<sup>2</sup>. Le décalage maximal de fréquence Doppler du système de transmission de données satellite LEO-sol basé sur la bande Ka (28 GHz) est de  $\pm 930$  kHz, et le taux maximal de changement de décalage de la fréquence Doppler est de 35 kHz/s. Par conséquent, l'effet Doppler variable dans le temps fait qu'il est difficile pour le récepteur de suivre avec précision la porteuse du signal, ce qui augmente sans aucun doute la difficulté de conception du récepteur. En outre, l'effet Doppler provoque un étalement/une compression de

$$\Delta B = \frac{\vartheta'}{c} B \quad II - 10$$

Pour un signal transmis avec une largeur de bande B.



**Figure II- 9 : Schéma de la variation de la distance de la liaison de transmission de données entre un satellite LEO et le sol [II-37].**

Pour le signal de 100 MHz en bande Ka utilisé dans le présent document, l'étalement maximal de la largeur de bande est de 3,3 kHz. Étant donné que l'effet Doppler variable dans le temps a été résolu par des techniques éprouvées [II-38] [II-39], il ne fait donc pas l'objet de notre étude. Par conséquent, le canal de transmission satellite LEO est modélisé comme un canal AWGN dans le présent document. L'amplitude du bruit blanc gaussien suit une distribution gaussienne, tandis que la densité spectrale de puissance (DSP) obéit à une distribution uniforme.

### II-6-1. Fonctionnement du système :

Dans cette section, nous construisons un modèle de communication sol-satellite à relais terrestre. Les satellites  $N_{Sat}$  sont répartis sur une surface sphérique de rayon  $R_{Sat}$  et forment un BPP homogène [II-40].

L'émetteur et le récepteur sont situés sur la Terre à une distance  $d$ . Le rayon de la Terre est noté  $R_{\oplus} = 6371\text{km}$ . Nous commençons par un scénario simple dans lequel un seul satellite est choisi comme relais, car les résultats obtenus pour le routage d'un relais à satellite unique peuvent être facilement étendus à un routage à plusieurs satellites. Nous considérons un satellite qui maximise la qualité de service minimale de l'émetteur-satellite, et des liaisons satellite-récepteur sont suggérées pour être sélectionnées. Si le débit de données, la probabilité de couverture, ou la latence sont négativement corrélés à la distance de communication, la qualité de service peut être mesurée par la réciproque de la distance de communication. Cependant, lorsque les satellites relais forment un BPP, l'analyse de cette stratégie est impossible. Nous considérons donc une stratégie de sélection légèrement sous-optimale, mais traçable : émetteur est supposé choisir le satellite le plus proche comme relais parmi les satellites qui peuvent assurer une communication fiable à la fois pour l'émetteur et pour le récepteur [II-41].

**Définition 1 (Angle du dôme) :** Relier les deux points au centre de la Terre, respectivement, et l'angle entre les deux lignes connectées est appelé l'angle de dôme de deux points.

En raison du blocage terrestre et de la distance maximale de communication fiable, l'émetteur et le récepteur ne peuvent communiquer avec les satellites que dans une certaine zone.

La zone certaine est une calotte sphérique qui est la zone ombrée ( $A_1$  pour l'émetteur et  $A_2$  pour le récepteur) dans la moitié supérieure de la figure II.10

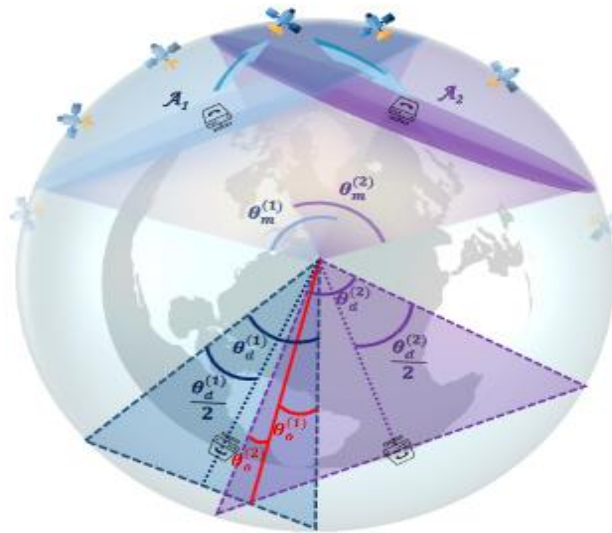


Figure II- 10 : Modèle de communication relayée par satellite [II-42].

Les angles maximaux de coupole de deux points quelconques de la calotte sphérique sont notés  $\theta_m^{(1)}$  et  $\theta_m^{(2)}$ , respectivement, qui sont également appelés les angles de dôme maximum de deux calottes sphériques A1 et A2. Pour s'assurer que A1 et A2 ont une région d'intersection, l'équation suivante doit être satisfaite :

$$\theta_m^{(1)} + \theta_m^{(2)} > 4 \sin^{-1} \left( \frac{d}{2R_{\oplus}} \right) \quad II - 11$$

### II-6-2. Distribution conditionnelle de l'angle de contact :

Dans cette section, nous dérivons l'expression analytique de la FCD de la distribution conditionnelle de l'angle de contact conditionnelle. La définition de l'angle de contact conditionnel est donnée ci-dessous.

**Définition 2 (Angle de contact conditionnel) :** Parmi les satellites qui peuvent assurer une communication fiable avec le récepteur, l'angle de dôme entre l'émetteur et le satellite le plus proche est appelé angle de contact conditionnel.

Pour obtenir la distribution de l'angle de contact conditionnel  $\theta_c$ , les étapes suivantes sont suivies : (1) fixer la région A2 et l'angle de coupole  $\theta_d^{(2)}$ , en augmentant continuellement l'angle de coupole  $\theta_d^{(1)}$  de la calotte sphérique correspondant à l'émetteur, (2) calculer la zone d'intersection des deux calottes sphériques, et (3) calculer la probabilité qu'il n'y ait pas de satellites dans la région d'intersection. Pour obtenir la zone d'intersection à l'étape (2), la zone d'intersection

irrégulière peut être divisée en deux parties par la ligne rouge, illustrée en bas de la figure II.9. Ces deux parties correspondent à la partie droite de la calotte sphérique gauche et à la partie gauche de la calotte sphérique droite. Le lemme suivant permet d'obtenir l'aire des deux régions. Les deux angles du dôme impliqués dans le lemme sont marqués en bas de la figure II.10.

**Lemme 1 :** Pour une calotte sphérique avec un angle de dôme  $\theta_d$ , intercepter la portion d'un côté de la calotte, avec un angle de dôme  $\theta_0$ .

La surface de la partie coupée  $S(\theta_d, \theta_0)$  est donnée par :

$$S(\theta_d, \theta_0) = \int_{R_{Sat} \cos\left(\frac{\theta_d}{2}\right) \tan\left(\frac{\theta_d}{2} - \theta_0\right)}^{R_{Sat} \sin\left(\frac{\theta_d}{2}\right)} 2R_{Sat} \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{R_{Sat}^2 \sin^2\left(\frac{\theta_d}{2}\right) - l^2}}{R_{Sat}} \right) dl \quad II - 12$$

Sur la base du lemme 1, la fonction de distribution cumulative de la distance de contact conditionnelle est donnée dans le théorème suivant :

**Théorème 1 :** Étant donné que l'angle maximal du dôme de la calotte sphérique du récepteur est  $\theta_m^{(2)}$ , la CDF approximative de l'angle de contact conditionnel  $F_{\theta_c}(\theta)$  est donnée par :

$$F_{\theta_c}(\theta) = 1 - \left( 1 - \frac{S(2\theta, \theta_0^{(1)}(\theta)) + S(\theta_m^{(2)}, \theta_0^{(2)}(\theta))}{4\pi R_{Sat}^2} \right)^{N_{Sat}} \quad II - 13$$

Où  $\theta_0^{(1)}(\theta)$  et  $\theta_0^{(2)}(\theta)$  sont définis comme suit :

$$\theta_0^{(1)}(\theta) = \theta - \frac{a(\theta)c - \sqrt{2a(\theta)^2 - 4a(\theta)b + 2b^2 + a(\theta)bc^2}}{a(\theta) - b} \quad II - 14$$

$$\theta_0^{(2)}(\theta) = \frac{1}{2}\theta_m^{(2)} - \frac{-bc + \sqrt{2a(\theta)^2 - 4a(\theta)b + 2b^2 + a(\theta)bc^2}}{a(\theta) - b} \quad II - 15$$

Où

$$a(\theta) = \cos\theta, \quad b = \cos\left(\frac{\theta_m^{(2)}}{2}\right), \quad c = 2 \arcsin\left(\frac{d}{2R_{\oplus}}\right) \quad II - 16$$

Et le domaine de l'angle de contact est :

$$\text{Max}\left\{0, 2 \arcsin\left(\frac{d}{2R_{\oplus}}\right) - \frac{1}{2}\theta_m^{(2)}\right\} \leq \theta_c$$

$$\leq \text{Min} \left\{ \frac{1}{2} \theta_m^{(1)}, 2 \arcsin \left( \frac{d}{2R_{\oplus}} \right) - \frac{1}{2} \theta_m^{(2)} \right\}. \quad II - 17$$

### II-6-3. Applications potentielles :

#### II-6-3-1. Inaccessibilité des satellites dans le cadre d'un routage à relais unique :

L'un des principaux problèmes du routage en temps réel et sur de très longues distances est de savoir quelle est la distance entre l'émetteur et le récepteur ou le nombre de satellites nécessaires pour garantir que l'acheminement ne sera pas interrompu en raison de l'absence de satellites disponibles. D'après le théorème 1, un corollaire intuitif corollaire intuitif sur la probabilité de panne des relais LEO. La définition de la probabilité est définie comme suit :

**Définition 3(Probabilité d'interruption du relais LEO) :** La probabilité d'interruption du relais LEO est définie comme suit : la probabilité qu'il n'y ait pas de satellites disponibles dans la zone de communication de l'émetteur et du récepteur au sol.

**Corollaire 1 :** Étant donné que la distance euclidienne entre l'émetteur et le récepteur est  $d$ , la probabilité de panne des relais LEO  $P_e^s(d)$  est donnée par :

$$P_e^s(d) = 1 - F_{\theta_c} \left\{ \frac{1}{2} \theta_m^{(1)}, 2 \arcsin \left( \frac{d}{2R_{\oplus}} \right) - \frac{1}{2} \theta_m^{(2)} \right\} \quad II - 17$$

Où la fonction de distribution cumulative de l'angle de contact conditionnel  $F_{\theta_c}(\theta)$  est définie dans (II - 13)

#### II-6-3-2. Inaccessibilité des satellites dans le cadre du routage à relais multiples :

Avec le corollaire ci-dessus, les concepteurs peuvent maintenir la probabilité de panne en dessous d'un seuil en ajustant  $d$  et  $N_{Sat}$ . Toutefois, l'étude de l'inaccessibilité des satellites dans le cadre d'un relais à satellite unique est assez limitée. Dans la plupart des cas, l'émetteur a besoin de plusieurs satellites relais pour envoyer le message au récepteur. Par conséquent, nous considérons l'inaccessibilité des satellites dans un routage consistant en de multiples relais satellites avec une architecture de tuyaux coudés [II-43].

Dans une telle architecture,  $N_h - 1$  relais terrestres sont nécessaires lorsque  $N_h$  satellites relais sont sélectionnés. Afin de réduire la latence et la consommation d'énergie, nous supposons que tous les deux relais terrestres adjacents ont le même angle de dôme. Par conséquent, la

probabilité de panne des relais multiples  $P_e^M(N_h, d)$ , qui est la probabilité qu'il n'y ait pas de satellites disponibles à un saut donné, est donnée par le corollaire suivant

Puisque  $P_e^M(N_h, d)$  peut être dérivée de  $P_e^S(d)$  par de simples relations géométriques, la preuve est omise ici.

**Corollaire 2 :** Étant donné que la distance euclidienne entre l'émetteur et le récepteur est  $d$ , les probabilités de panne des relais multiples  $P_e^M(d)$  est exprimée comme suit :

$$P_e^M(N_h, d) = 1 - \left(1 - P_e^S\left(2R_{\oplus} \sin\left(\frac{1}{N_h} \arcsin\left(\frac{d}{2R_{\oplus}}\right)\right)\right)\right)^{N_h} \quad II - 18$$

Où  $P_e^S(d)$  est défini dans (7) et  $N_h$  est le nombre de satellites relais sélectionnés.

Le  $N_h$  doit être soigneusement conçu en fonction de la probabilité de panne des relais multiples. D'une manière générale, une stratégie de saut long (avec un petit  $N_h$ ) conduit à une plus grande probabilité d'interruption, tandis qu'une stratégie à sauts courts (avec un grand  $N_h$ ) entraîne une plus grande latence [II-44].

## II-7. BILAN DE LIAISON :

Le bilan de liaison (ou Link budget en anglais) est un outil fondamental pour dimensionner les puissances à mettre en jeu dans un canal de transmission, c'est l'ensemble des équations qui permettent de calculer le rapport signal utile sur bruit en sortie du récepteur en fonction de tous les paramètres qui influent sur la puissance de l'onde émise [II-45].

Par conséquent, nous avons deux bilans de liaison différents. Pour chacun des deux on retrouve les paramètres :  $G/TB$ , le facteur de mérite, la PIRE et les puissances et antennes utilisées varient fortement d'une station à l'autre. Nous avons inclus certains critères de performance des protocoles d'accès aux canaux et leur impact sur la qualité de la liaison satellite [II-45].

### II-7-1. Paramètres généraux

#### II-7-1-A. Le rapport signal sur bruit (C/N) [II-46]

Le rapport puissance de la porteuse, sur densité de la puissance du bruit,  $C/N_0$ , s'exprime en décibels Hertz [dB Hz] et se réfère au rapport de la puissance de la porteuse sur la puissance du bruit ramené à sa bande passante. Soit la puissance du bruit, divisée par la bande passante de sa densité spectrale de puissance.

$$\frac{S}{B} = \frac{P_S}{P_B} \quad \text{II - 19}$$

$$\frac{S}{B} = \left( \frac{U_S}{U_B} \right)^2 \quad \text{II - 20}$$

$$\frac{S}{B_{dB}} = 10 \log \left( \frac{S}{B} \right) \quad \text{II - 21}$$

**II-7-1-B. Le rapport l'énergie par bit sur bruit (E/N) [II-46]**

$E_b/N_0$  est le rapport de l'énergie par bit divisée par la densité spectrale de puissance de bruit. Il permet de comparer les taux d'erreur binaire (TEB) (efficacité) des différents systèmes de modulation numérique. Ces deux facteurs sont normalisés et la bande passante n'est plus une préoccupation.

$$\frac{C}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} * R \quad \text{II - 22}$$

$$\left( \frac{C}{N_0} \right)_{dB} = \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} + 10 \log * R \quad \text{II - 23}$$

R : est le taux réel de bits d'information.

**II-7-1-C. Affaiblissement de propagation ( $A_p$ )**

L'affaiblissement de propagation est égal au rapport de la puissance isotrope rayonnée équivalente de l'émetteur, à la puissance disponible à la sortie d'une antenne de réception isotrope.

$$A_p = AEL - L_{fs}(dB) \quad \text{II - 24}$$

L'effet du sol local à proximité de l'antenne est pris en compte dans le calcul du gain d'antenne, mais non dans celui de l'affaiblissement de transmission [II-47].

- **Affaiblissement d'Espace Libre (AEL) [II-46]**

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage, elle se disperse dans l'espace et subit donc un affaiblissement, même dans un milieu sans pertes. Dans les bandes basses, inférieures à 10 GHz, les pertes dues aux phénomènes météorologiques comme la pluie sont réduites. La détermination de l'affaiblissement d'espace libre permet de se faire rapidement une idée des niveaux



envisageables côté récepteur, lorsque les deux stations sont en visibilité directe l'équation (II.7) exprime l'affaiblissement en fonction de la distance et la fréquence.

$$A = 10 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad \text{II} - 25$$

Avec :

A : affaiblissement d'espace libre entre antennes isotropes, exprimé en dB

d : distance entre l'émetteur et le récepteur exprimée en mètres

$\lambda$  : longueur d'onde du rayonnement, exprimée en mètre.

- **Affaiblissement due à l'espace libre ( $L_{fs}$ ) [II-46]**

On peut décomposer l'affaiblissement due à l'espace libre en plusieurs affaiblissements, tels que :

- L'affaiblissement d'absorption (absorption par l'ionosphère, par les gaz de l'atmosphère ou par les précipitations).
- L'affaiblissement par diffraction comme pour le cas de l'onde de sol.
- L'affaiblissement dû à la réflexion équivalente ou à la diffusion, comme dans le cas de l'ionosphère, compte tenu des effets de focalisation ou dévocalisation due à la courbure d'une couche réfléchissante.
- L'affaiblissement par couplage de polarisation, lequel peut provenir de tout défaut d'adaptation de polarisation entre les antennes pour le trajet particulier considéré.
- La baisse de gain d'antenne ou dégradation du gain d'antenne, qui peut être due à la présence de phénomènes importants de diffusion sur le trajet.
- L'effet des interférences entre le rayon direct et les rayons réfléchis par le sol, par des obstacles ou par des couches atmosphériques.

### II-7-2. Antenne isotrope

C'est l'antenne de référence, elle n'est pas physiquement réalisable et se représente par une source ponctuelle omnidirectionnelle. Elle permet de définir les caractéristiques des antennes réelles. L'antenne isotrope est une antenne qui, alimentée par la puissance  $P_e$ , rayonnerait cette puissance avec la même intensité dans toutes les directions. A la distance d, toute la puissance est répartie sur la surface de la sphère [II-49].

$$P_d \left( \frac{W}{m^2} \right) = \frac{P_e G_e}{4\pi d^2} \quad \text{II} - 26$$

$P_e$  : Puissance d'émission.

$G_e$  : Gain d'émission.

### II-7-3. Le Gain d'une antenne

C'est le rapport entre la puissance  $P_r$  captée par l'antenne à la distance  $D$  d'une source quelconque, et celle que capterait une antenne isotrope à la même distance (en espace libre) [II-47] [II-48].

$$G = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad \text{II - 27}$$

$D$  : diamètre de l'antenne parabolique.

$\eta$  : Efficacité de l'antenne (rendement) généralement entre 50% et 70%.

$\lambda$  : Longueur d'onde (en m,  $\lambda=c/f$ ,  $c=3.108$  m/s).

Alors en décibel :

$$G[dB] = 10 \log \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad \text{II - 28}$$

### II-7-4. Puissance isotrope rayonnée équivalente (P.I.R.E.)

La PIRE d'une antenne en un point donné est la puissance relative à 1W qui serait nécessaire à un émetteur isotrope situé à la même distance pour créer la même densité de flux que celle reçue du satellite à cet endroit. Cette valeur est constituée par le produit de la puissance fournie à l'antenne par son gain  $G_e$  dans une direction donnée par rapport à une antenne isotrope [II-49].

$$PIRE = P_e G_e \quad \text{II - 29}$$

La PIRE en décibel est :

$$PIRE[dBw] = G_e[dBi] + P_e[dBw] \quad \text{II - 30}$$

### II-7-5. Facteur de mérite G/TB

Dans le domaine spatial, le facteur de mérite ou encore le G/TB est le critère primordial qui permet de mesurer les performances d'une station. Plus le G/TB est élevé, plus le rendement du système est meilleur [II-47]. Tel que :  $G$  : est le gain de l'antenne. Et  $TB$  : est la température de bruit de tout le système ramené en entrée de l'antenne.

### II-7-6. La Capacité d'un canal [II-46]

En présence de bruit sur le canal, la transmission n'est pas parfaite et il convient dès lors de déterminer la proportion des symboles qui risquent d'être entachés d'erreur. Pour chaque milieu

de transmission, on peut chiffrer la capacité théorique du canal en [b/s], c'est-à-dire le nombre maximum de bits par seconde qu'il est possible de transmettre avec une erreur aussi faible que voulue, exprimée à partir de la bande passante du canal  $[0, w]$  et du rapport signal à bruit  $S/N$  à l'intérieur du canal. Cette relation est dite de Shannon-Hartley.

$$C = w \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad II - 31$$

C : La capacité de canal (bit/sec).

w : La taille de canal (Hz).

S/N : Le rapport signal sur bruit.

### II-7-7. Bruits dans un lien de communication par satellite

Les principales sources des bruits dans un lien de communication par satellite [II-48] : (Figure II.11)

Bruit 1 : c'est le bruit faisant partie du signal à transmettre en plus du bruit thermique généré par le modulateur, le mélangeur et l'amplificateur de puissance. Ce bruit est généralement suffisamment petit en comparaison avec la puissance du signal utile et il est négligeable par rapport aux autres sources de bruit.

Bruit2 : c'est le bruit thermique issu de la terre et reçu par l'antenne du satellite (généralement à 300K).

Bruit 3 : bruit thermique généré par le transpondeur du satellite. Il dépend principalement des performances de l'amplificateur à faible bruit du premier étage d'amplification du transpondeur.

Bruit 4 : bruit reçu par l'antenne de la station de base en plus du signal issu du satellite incluant le bruit du ciel (bruit de fond galactique), le bruit thermique atmosphérique et le bruit thermique terrestre.

Bruit 5 : bruit thermique généré par le récepteur de la station de base et qui dépend des performances de l'amplificateur à faible bruit du premier étage d'amplification du récepteur. En plus de ces sources de bruit, un lien de communication par satellites est soumis à des interférences introduites par d'autres systèmes de communication par satellite.

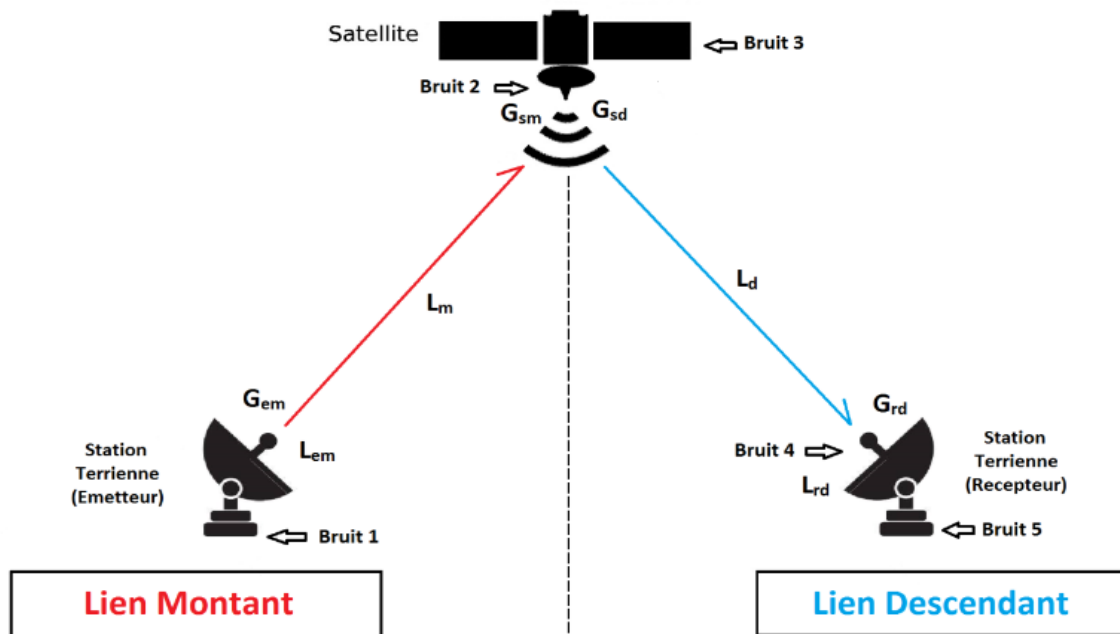


Figure II- 11 : Liaison satellitaire et ces paramètres. [II-48]

### II-7-8. Température de bruit [II-46]

#### II-7-8-A. Température de bruit d'un système

Dans un système, le bruit de fond est déterminé par le bruit thermique défini par la relation :

$$N_0 = KT_B \quad \text{II - 31}$$

$$N_0[dB] = 10\log(K) + 10\log(T_B) = -228.6 + 10\log(T_B) \quad \text{II - 32}$$

K : Constante de Boltzmann  $1.38 \times 10^{-23} \text{ w /Hz/ K}$ .

$T_B$  : Température de récepteur en degré Kelvin.

$N_0$  : Puissance du bruit thermique.

#### II-7-8-B. Température de bruit d'une antenne de station sol

$$T_A = T_S + (1 - \eta)T_0 \quad \text{II - 33}$$

$T_A$  : Température de bruit due aux ions de l'atmosphère la foudre, absorption atmosphérique.

$T_0$  : Température ambiante en kelvin.

**II-7-9. Efficacité spectrale [II-46]**

L'efficacité spectrale est généralement exprimée au format « bits par seconde par hertz », abrégé en bits/s/Hz donnée par la relation suivante :

$$\text{Eff} = \frac{D_b}{B} \text{ (bits/s/Hz)} \quad \text{II} - 34$$

La définition habituelle est le débit de données net en bits par seconde (bps) divisé par la bande passante en Hertz.

**II-7-10. Bilan de Liaison pour la voie montante**

Soit le rapport de la puissance de la porteuse sur le bruit à l'entrée de récepteur : [II-50]

$$\left(\frac{C}{N_0}\right) = \frac{PIRE_{sol} G_{sat} L_m}{KT} \quad \text{II} - 35$$

Où :

La PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) qui est le produit de la puissance fournie à l'entrée de l'antenne d'émission par son gain, la PIRE est une mesure de performance de la section d'émission : [II-51]

$$(PIRE)_{station\ sol} = (P_T * G_T)_{station\ sol} \left(\frac{P_{TX}}{L_{FTX}}\right)_{station\ sol} * \left(\frac{G_{Tmax}}{L_T}\right)_{station\ sol} \quad \text{II} - 36$$

Avec :

$$L_T = 12 * \left(\frac{\alpha_T}{\theta_{3dB}}\right)^2 \text{ (dB)} \quad \text{II} - 37$$

$L$  : Pertes par dépointage.

$\alpha$  : Angle de dépointage de la station sol.

$\theta_{3d}$  : Angle d'ouverture de l'antenne.

$L_{FT}$  : Pertes entre amplificateur et antenne station sol.

$-(1/L)$  : Pertes en espace libre et pertes atmosphérique.

$-(G/T)$  : Facteur de mérite du récepteur ( $^{\circ}\text{K} - 1$ ).

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{SAT} = \left(\frac{G_r\ max}{L_R}\right)_{SAT} * \left(\frac{1}{L_{FR3}}\right)_{SAT} * \left(\frac{1}{T}\right)_{SAT} \quad \text{II} - 38$$

(G/T) : Le facteur de mérite qui décrit les performances de la partie réceptrice.  
Avec :

$$G = \frac{G_r \max}{(L_{FRX} * L_r)} \quad \text{II - 39}$$

L : Pertes par dépointage à la réception.

$L_{FRX}$  : Pertes entre antenne et le récepteur.

T : Température de bruit du système (SAT).

-(1/K) : Inverse de la constante de Boltzmann. [II-51]

### II-7-11. Bilan de liaison pour la voie descendante

Soit le rapport signal sur bruit au niveau de la station terrienne réceptrice.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{down} = (PIRE)_{SAT} * \left(\frac{1}{L}\right)_{down} * \left(\frac{G}{T}\right) * \left(\frac{1}{K}\right) \quad \text{II - 40}$$

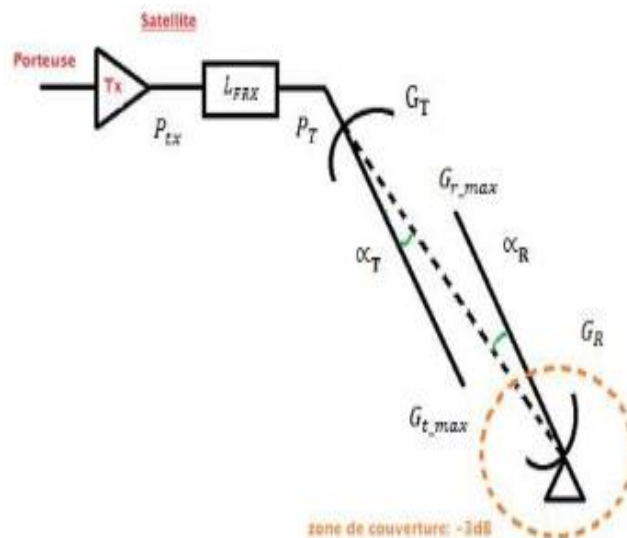


Figure II- 12 : Etude de la liaison descendante [II-52].

$$(PIRE)_{SAT} = (P_T * G_T)_{SAT} = \left(\frac{P_{TX}}{L_{FTX}}\right)_{SAT} * \left(\frac{G_r \max}{L_T}\right)_{SAT} \quad \text{II - 41}$$

Avec :

L : Pertes par dépointage généralement -3dB.

$\alpha$  : Angle de dépointage de la station sol.

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{station\ sol} = \left(\frac{G_r\ max}{L_T}\right)_{station\ sol} * \left(\frac{1}{L_{ftx}}\right)_{station\ sol} * \left(\frac{1}{T}\right)_{station\ sol} \quad \text{II - 42}$$

Avec :

$$L_R = 12 * \left(\frac{\alpha_R}{\theta_{3dB}}\right)^2 (dB) \quad \text{II - 43}$$

$\alpha$  : Angle de dépointage de la station sol.

T : Température de bruit du système sol.

$\left(\frac{1}{K}\right)$  = Pertes en espace libre et pertes atmosphériques.

$\left(\frac{1}{K}\right)$  = Inverse de la constante de Boltzmann. [II-51]

### II-7-12. Bilan de liaison global

Le rapport signal sur bruit de la liaison global se déduit des deux bilans, en voie montante et en voie ascendante, par la formule suivante :

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_T} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{up}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{down}} \quad \text{II - 44}$$

Bruit total de la liaison = bruit retransmis en montant + bruit liaison descendante.

$$\text{Uplink: } \left(\frac{C}{N_0}\right)_T = \frac{C_{up}}{N_{0\ up}} \quad \text{II - 45}$$

$$\text{Downlink: } \left(\frac{C}{N_0}\right)_{down} = \frac{C_{down}}{N_{0\ down}} \quad \text{II - 46}$$

$$\text{Bruit total: } \left(\frac{C}{N_0}\right)_T = \frac{C_{down}}{N_{0\ T}} \quad \text{II - 47}$$

$$\frac{C}{N_0} * \frac{1}{B_N} = \frac{C}{N} \quad \text{II - 48}$$

Avec

$N_0$  : Densité spectrale équivalente de bruit (W/Hz).

$$N_0 = k * T \quad \text{II - 49}$$

T : Température de bruit de système (°K).

$$N = N_0 * B_N \quad \text{II - 50}$$

N : Bruit total.

$B_N =$  Largeur de bande du récepteur (Hz) [II-51].

### II-7-13. La puissance reçue [II-46]

La puissance reçue  $P_r$  peut être exprimée selon l'équation de Fris :

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t(\theta_t, \varphi_t)G_r(\theta_r, \varphi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2)|\alpha_t, \alpha_r|^2 e^{-\alpha R} \quad \text{II - 51}$$

$$P_r = \frac{A_r}{4\pi R^2} = P_e G_e G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad \text{II - 52}$$

- $G_t, G_r$  : Sont des gains linéaires des antennes d'émission et réception.
- $\Gamma_t$  et  $\Gamma_r$  : Sont les coefficients de réflexion des antennes.
- $\alpha_t$  et  $\alpha_r$  : Sont les vecteurs de polarisation des antennes.
- $\alpha$  : est le coefficient d'absorption du milieu.
- $R$  : est la distance émetteur-récepteur.

### II-8. Calcul de bilan de liaison

Dans cette partie nous allons aborder le calcul du bilan de liaison lors d'une communication entre une station au sol et un satellite LEO avec les paramètres suivants (voir tableau II.3):

Paramètres	Valeurs
Tx puissance optique [w]	0.1
Tx puissance optique [dBm]	20
Tx gain [dBi]	72
Rx gain [dBi]	-115.6
Perte de pointage [dB]	-1.6
Atténuation atmosphérique [dB]	-2.6
Rx perte optique [dB]	-3.0
Lx perte optique [dB]	-3.0
Fréquence [THz]	195
Longueur d'onde [nm]	1538
Diamètre d'ouverture d'Émetteur	25 cm



Diamètre d'ouverture de récepteur	15 cm
-----------------------------------	-------

**Tableau II. 3 : Les paramètres du bilan de liaison [II-53].**

✓ Les résultats de calcul

Le tableau ci-dessous illustre les résultats finals de bilan de liaison d'un satellite LEO (Tableau II.4).

Paramètres	Valeurs		
Stratégie de pointage	Boucle ouverte		
Altitude [km]	400 km	600 km	800 km
Élévation [°]	30.0	30.0	30.0
Divergence transmise (e-2 radius) [μrad]	30.1		
Puissance de l'émetteur [dB]	20	20	20
[w]	0.1	0.1	0.1
Gain de l'émetteur [dB]	135.5	135.5	135.5
Affaiblissement d'espace libre [dB]	250.28	253.80	256.30
Perte d'espace libre [dB]	-220.28	-223.80	-226.30
Moyenne du pointage -perte [dB]	-4.8		
Puissance reçue [dB]	-495.68	-499.20	-531.7
PIRE [dbm]	62		
Température de bruit (k)	80		
(G/T) facteur de mérite [dB/k]	0.001	0.001	0.001
PIRE (station sol) [dB]	-25.23		
PIRE (SAT) [dB]	26.52		
(C/N) <sub>u</sub> montante [dB]	299.62	231.38	232.63
(C/N) descendante [dB]	169.10	167.34	166.09
(C/N) total [dB]	108.11	97.09	97.09

**Tableau II. 4 : Les résultats finaux du bilan de liaison.**

## II-8. CONCLUSION

L'utilisation de liaisons optiques inter-satellites présente certains avantages par rapport aux liaisons inter-satellites hyper fréquences : taille et poids plus petits du terminal, puissance d'émission plus petit, plus grande immunité aux interférences, débit de données plus élevé et divergence de faisceau d'émetteur plus petite. Le principal inconvénient des liaisons optiques inter-satellites est le système de pointage complexe requis. La complexité du système de pointage découle de la nécessité de pointer un satellite à un autre sur une distance de dizaines de milliers de kilomètres avec un angle de divergence de faisceaux de micro radians lorsque les satellites se déplacent et vibrent.

Dans ce chapitre, nous avons défini et présenté les équations de bilan de liaison. En nous avons également parlé des paramètres affectant la liaison, certaines de ces équations ont été utilisées dans notre programme OptiSystem et seront présentées dans le chapitre suivant.

**Chapitre III :**  
**Résultats et**  
**Discussions**

**CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION DE SIMULATION INTERCOMMUNICATION PAR  
LASER**

**III-1. INTRODUCTION**

La technologie de transmission LEO Ground est en constante amélioration et permettra une connectivité fiable pour les futures missions spatiales.

Ce chapitre est consacré à la simulation d'un système optique sans fil intersatellite sous logiciel OptiSystem. On va tout d'abord présenter le logiciel OptiSystem et ces principaux Avantages, ensuite décrire les différentes parties de la simulation, enfin analyser les Différents résultats de la simulation, nous basons sur les performances suivantes : la puissance, le taux d'erreur binaire (BER), le facteur de qualité (Q) et le diagramme de l'œil.

La transmission de données à partir d'un satellite à la Terre est critique dans les missions spatiales modernes. Cette étude a pour but d'améliorer la qualité de la transmission des données via LEO-Ground.

**III-2. Evolution en orbite basse LEO**

Ces dernières années, des milliers de satellites en orbite basse (LEO) ou dont le lancement est prévu par les entreprises telles que SpaceX, OneWeb, Iridium et Orbcomm sont sur le point de former un réseau satellitaire dense près de la Terre, c'est-à-dire à une altitude comprise entre quelques centaines de kilomètres à environ 1500 km [III-1] [III-2].

L'idée principale des grandes constellations LEO est de déployer des satellites LEO sur différents plans orbitaux avec le même nombre de satellites. Par exemple, en novembre 2018, SpaceX a révisé le plan Starlink avec la Commission fédérale des communications (FCC) en réduisant le nombre de plans orbitaux à 24 (moins par rapport aux 32 avions d'origine) et en augmentant le nombre de par avion de 50 à 66 pour maintenir le nombre total de satellites la même que sa conception originale (1584 à 1600) tout en conservant une inclinaison orbitale de 53° [III-3]. En août 2019, SpaceX a proposé une mise à jour du plan Starlink en augmentant le nombre de plans orbitaux à 72 et en diminuant le nombre de satellites par avion à 22, tout en maintenant l'altitude des satellites à 550 km, l'inclinaison orbitale de 53° et le nombre total de satellites est identique à celui de sa conception précédente soit 1584 [III-4].

En janvier 2023, le satellite en orbite basse (LORIS) conçu et fabriqué en Nouvelle-Écosse (Canada) a été lancé par la National Aeronautic and Space Administration (NASA). Ce satellite sera utilisé à des fins de renseignement et de surveillance pour le Canada [III-5].

Au bout d'un mois, En février 2023, l'Agence spatiale indienne, Indian Space Research Organization (ISRO), a effectué le deuxième vol d'essai de son véhicule de lancement de petits satellites (SSLV-D2) avec trois satellites à bord.

### **III-3. PRESENTATION DU LOGICIEL OPTISYSTEM**

La conception et l'analyse des systèmes de communications optiques, comprennent des dispositifs non-linéaires et des sources de bruit non gaussiennes qui sont très complexes et couteuses en temps, il en résulte que ces tâches ne peuvent désormais être effectuées rapidement et efficacement qu'avec l'aide de nouveaux outils logiciel [III-6].

Dans notre mémoire nous avons opté pour un logiciel de simulation des systèmes de communication optique innovants qui conçoit, teste et optimise pratiquement n'importe quel type de liaison optique dans la couche physique d'un large éventail de réseaux optiques, il s'agit d'OptiSystem qui est un simulateur basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communications optiques. Sa vaste bibliothèque de composants actifs et passifs comprend des paramètres réalistes, ces capacités peuvent être étendus facilement avec l'ajout des composants et peuvent être reliés à un large éventail d'outils, une interface complète d'utilisateur graphique (GUI) contrôle la disposition optique des composants, les modèles et ces présentations graphiques (figure III.1) [III-6].

OptiSystem est un outil qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal, allant du dispositif le plus élémentaire, au système complet de communication.

OptiSystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur conviviale. [III-7]

La démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- Construire le schéma bloc.
- Analyser le schéma.

#### **III-3-1. Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem**

Les principales caractéristiques du logiciel sont [III-8] :

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

## Résultats et discussion de simulation intercommunication par Laser

- Les outils de visualisation avancée produit le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des visualiser sur le moniteur au même port.

### III-3-2. Interface de l'OptiSystem

L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale répartit en plusieurs parties [III-9] :

- Bibliothèque.
- Editeur du layout.
- Projet en cours. (Voir figure III.1) :

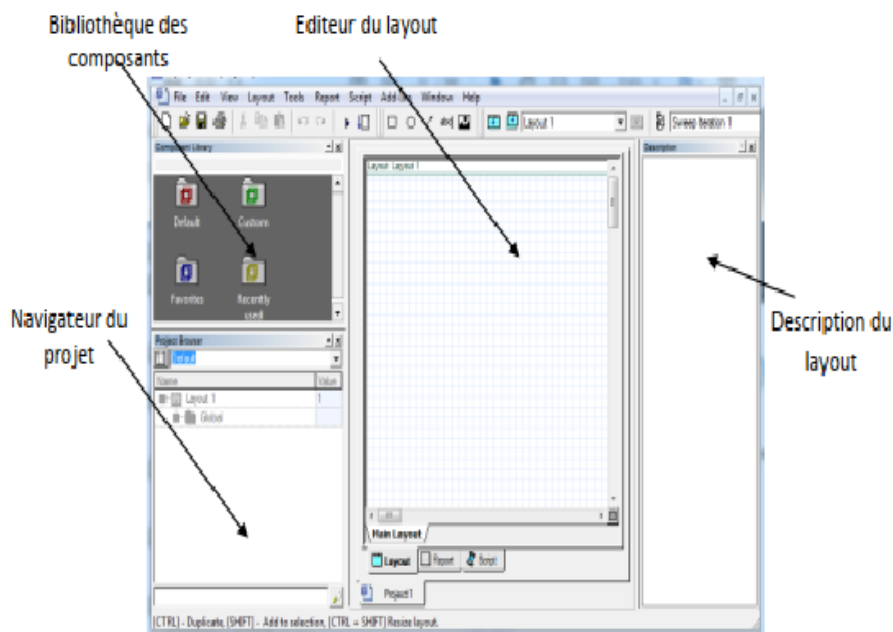


Figure III- 1 : L'interface de travail sur OptiSystem [III-10].

#### III-3-2-A. Bibliothèque

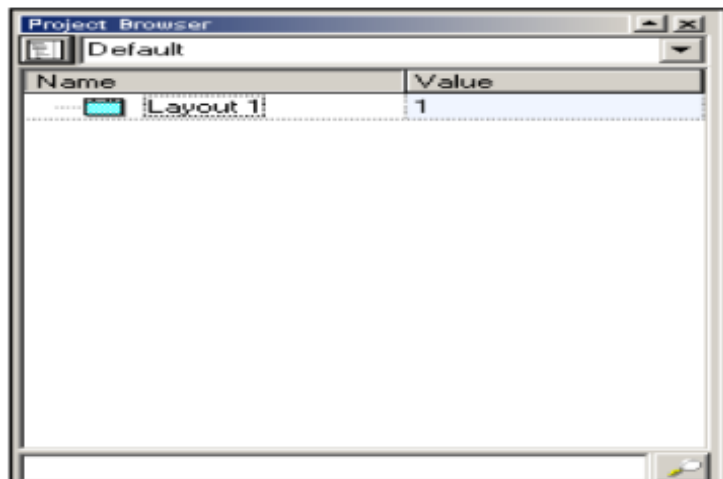
La bibliothèque est une base de données qui contient tout type de modèles qui permettent de réaliser les différents schémas blocs, comme les entrées, régénérateurs, codeurs, modulateur, filtres, etc. (voir figure III.2)



**Figure III- 2 : Bibliothèque des composants [III-10].**

### **III-3-2-B. Navigateur du Projet (Projet en cours)**

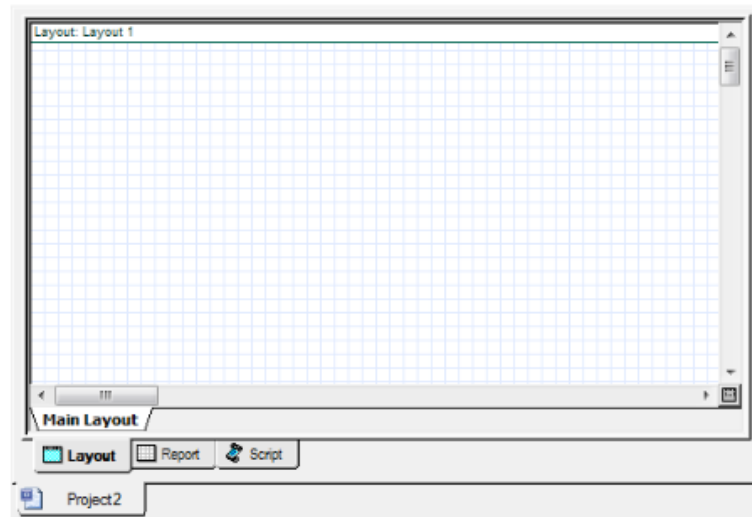
Cette fenêtre contient tous les composants utilisés lors du projet afin de pouvoir accéder plus rapidement aux différents composants, particulièrement dans le cas d'un projet complexe qui contient un nombre important de composants. La figure III.3 représente le navigateur de projet.



**Figure III- 3 : Navigateur du Projet [III-10].**

### **III-3-2-C. Editeur du couche (Layout)**

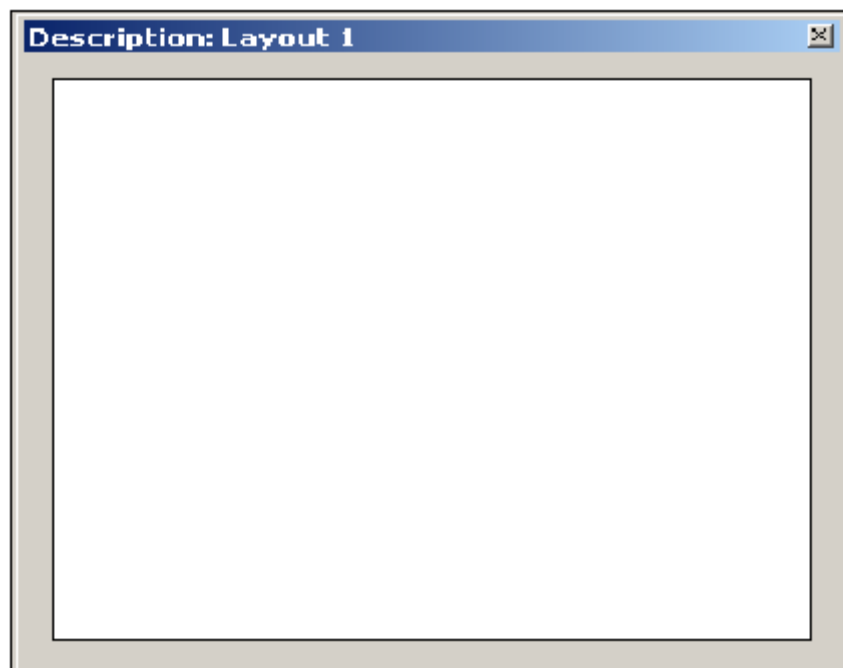
C'est la fenêtre principale dans laquelle vous insérez des composants dans la mise en page, modifiez les composants et créez des connexions entre les composants. Il permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception. (Voir figure III.4)



**Figure III- 4 : Fenêtre de présentation du projet en cours [III-10].**

#### **III-3-2-D. Projet en cours (description du layout)**

Visualise et affiche les divers fichiers et composants correspondants au projet en cours (voir figure 5) [III-7].

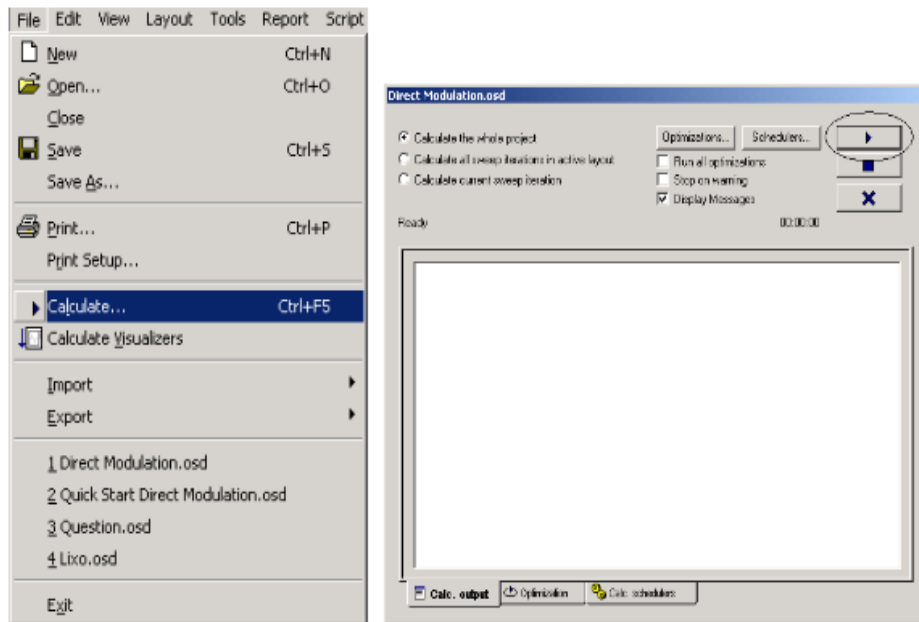


**Figure III- 5 : Fenêtre de description du projet en cours [III-10].**

#### **III-3-2-E. Lancer une simulation**

Pour exécuter une simulation, procédez comme suit. (Voir figure III.6)





**Figure III- 6 : Fenêtre montre le lancement de la simulation [III-10].**

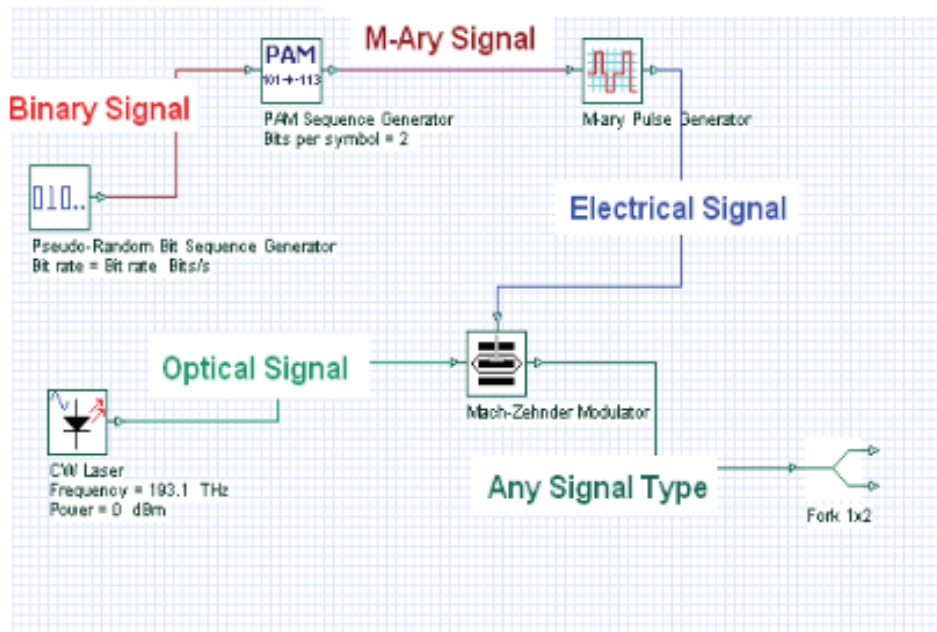
### III-3-3. Représentation des Signaux dans OptiSystem

Pour rendre l'outil de simulation plus souple et plus efficace, il est essentiel qu'il fournisse des modèles à différents niveaux d'abstraction, y compris le système, sous-système, et les niveaux de composants.

OptiSystem dispose d'une définition hiérarchique de composants et systèmes, nous permettant d'utiliser des outils spécifiques pour l'optique intégrée et permettant à la simulation d'aller aussi profond que la précision désirée l'exige. Différents niveaux d'abstraction impliquent des représentations de signaux différents. La représentation du signal doit être aussi complète que possible afin de permettre une simulation efficace. Il y a cinq types de signaux dans la bibliothèque du logiciel tous régis par un code de couleur (voir figure III.7). [III-9]

Binary	Red
M-Ary	Dark Red
Electrical	Blue
Optical	Green
Any Type	Dark Green

**Tableau III- 1 : Couleur du signal de connexion [III-10].**



**Figure III- 7 :** Types de signaux et de connexions [III-10].

### **III-3-3-A. Signaux électriques**

Les signaux électriques sont générés par des composants tels que des générateurs d'impulsions dans la bibliothèque des émetteurs et des photodétecteurs dans la bibliothèque des récepteurs. Les signaux électriques sont constitués de la forme d'onde du signal échantillonné dans le domaine temporel. Les propriétés principales du signal électrique sont les variances de bruit de signal dans le domaine temporel et les densités spectrales de puissance de bruit dans le domaine de fréquence.

### **III-3-3-B. Signaux binaires**

Les signaux binaires sont générés par des composants tels que des générateurs de séquence de bits. Les générateurs d'impulsions de la bibliothèque des émetteurs et les commutateurs numériques de la bibliothèque réseau utilisent ce signal en tant que données d'entrée. Un signal binaire consiste en une séquence d'uns et de zéros, ou de marques et d'espaces. La propriété principale du signal binaire est le débit binaire.

### **III-3-3-C. Signaux optique**

Les signaux optiques sont générés par des composants tels que les lasers dans la bibliothèque des émetteurs. Les signaux optiques permettent différentes représentations de signaux:

- signaux échantillonnés
- signaux paramétrés
- bacs à bruit.

### 3. Les signaux M-Ary

Les signaux M-Ary sont des signaux à plusieurs niveaux utilisés pour des types spéciaux de codage, tels que PAM, QAM, PSK et DPSK. Les signaux M-Ary sont similaires aux signaux binaires. Cependant, les signaux M-Ary peuvent avoir n'importe quel niveau au lieu de seulement les niveaux haut (1) et bas (0), ou les marques et les espaces.

#### **III-3-4. Affichage des résultats à partir d'un appareil**

Pour afficher les graphiques et les résultats générés par la simulation, il faut faire double clic sur le visualiseur dans la structure du projet.

- Analyseur de spectre optique : Affiche le signal optique modulé dans le domaine fréquentiel.
- Visualiseur optique en domaine temporel : Affiche le signal optique modulé dans le domaine temporel.
- Oscilloscope : Affiche le signal électrique après le code PIN dans le domaine temporel.
- Analyseur BER(BET): mesure les performances du système en fonction du signal avant et après la propagation. [III-9]

#### **III-3-5. Modes de simulation**

Le logiciel OptiSystem offre trois différents modes de simulation [III-9] :

- Le mode normal : où il suffit d'entrer la valeur du paramètre désiré.
- Le mode de balayage (Sweep) : Où la valeur du paramètre varie suivant une courbe donnée.
- Le mode scripte : où le paramètre est évalué comme une expression arithmétique.

#### **III-3-6. Critère de Performance de transmission optique**

Dans une transmission d'information numérique, le bloc de réception prend des décisions, à partir du signal reçu, pour reconstituer une suite de données qui soit aussi similaire que possible à celle émise. Pour cela, l'organe de décision, composé entre autres d'un comparateur à seuil, assigne à chaque pulse un bit 0 si le niveau du pulse est en dessous du seuil ou un bit 1 si ce niveau est au-dessus du seuil. Cependant, l'atténuation, la dispersion et les différents bruits que subit le signal entraînent des erreurs. Le critère de qualité le plus communément utilisé est le taux d'erreur binaire (BER). Cependant, il est possible aussi de mesurer les performances des transmissions avec le facteur de qualité (Q). Une autre approche, plus qualitative, consiste à tracer le diagramme de l'œil du signal.

### **III-3-6-A. Taux d'erreurs binaires**

La qualité de transmission numérique binaire est intrinsèquement simple à évaluer puisqu'il suffit de comparer la séquence de symboles envoyés avec la séquence de symboles reçus, et de compter les erreurs c'est-à-dire le nombre de fois d'un « 0 » est détecté pour un symbole « 1 » émis et vice versa. On définit alors le taux d'erreurs binaires ou Bite Error Rate en anglais (BER) correspondant au nombre d'erreurs sur le nombre de bits transmis pendant la durée de la mesure [III-6] :

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad \text{III. 1}$$

Le taux d'erreur binaire communément accepté dans le milieu des télécommunications optiques est de  $10^{-9}$ , correspondant à une erreur commise sur un milliard de bits lus.

### **III-3-6-B. Facteur de qualité**

Le facteur de qualité est le rapport signal sur bruit électrique en entrée du circuit de décision du récepteur. Le signal mesuré contient une contribution due au signal utile ainsi qu'un apport en bruit dû à l'ensemble des éléments de la chaîne de transmission. Le facteur Q est défini par [III-6] :

$$Q = \frac{u_1 - u_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad \text{III. 2}$$

Avec,  $u_1$  et  $u_0$  représentent les niveaux moyens du signal utile (symboles « 1 » et « 0 »),  $\sigma_1$  et  $\sigma_0$  représentent les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens (bruit) dans le diagramme de l'œil qui retrace le signal mesuré. Dans l'hypothèse où la distribution de puissance des symboles est gaussienne, le facteur de qualité est relié au BER, par la relation suivante [III-6] :

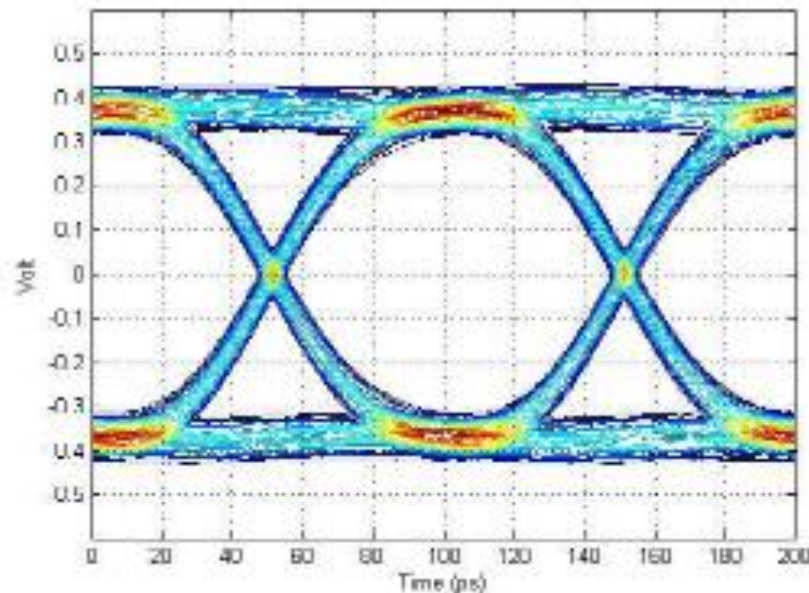
$$TEB = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \quad \text{III. 3}$$

### **III-3-6-C. Diagramme de l'œil**

On utilise souvent en télécommunications, la méthode dite : diagramme de l'œil pour décrire la dégradation par le bruit et la dispersion du signal numérique. Le diagramme de l'œil permet d'une manière très simple d'apprécier la qualité des signaux numériques reçus avant qu'ils atteignent le dispositif de démodulation. Il s'agit d'une mesure de base en transmission numérique. Si l'on superpose des symboles successifs par paires sur un oscilloscope, on obtient le diagramme de l'œil. Des appareils spécialisés engendrent des séquences aléatoires et comparent le signal de sortie de la liaison optique avec le signal d'entrée. Une séquence aléatoire de bits est visualisée sur un oscilloscope en mode d'accumulation en fonction du temps. La

somme de tous les signaux aboutit à une forme de signal appelé œil : Sans bruit les traces se superposent exactement, quand le bruit augmente, les signaux varient et la trace s'épaissit.

La Figure (III.8) montre toute une série de paramètres observables. Le principe général est que plus l'aire centrale est grande, plus la qualité du signal reçu est bonne. La largeur est liée à la facilité à synchroniser et différencier les échantillons successifs alors que la hauteur du lobe central traduit le rapport d'énergie entre le signal original et le bruit de canal [III-11].



**Figure III- 8 :** Exemple d'un diagramme de l'œil [III-11].

### **III-3-7. Avantages du logiciel OptiSystem**

Les avantages du logiciel OptiSystem sont [III-12] :

- Fournir un aperçu de performances du système mondial de fibres optiques.
- Evaluer les sensibilités des paramètres aidant aux spécifications de tolérance de conception.
- Présenter visuellement les options de conception à des clients potentiels.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation approfondie du système.
- Fournir le balayage automatique des paramètres et d'optimisation.

### **III-4. STRUCTURE ET MODELISATION**

Le système IsOWC utilise un faisceau laser pour assurer la connectivité sans fil entre l'émetteur et le récepteur, l'espace libre servant de support pour le transport des informations. L'espace libre comme support pour le transport de l'information. Les caractéristiques du milieu de propagation influencent grandement les performances du système [III-13].

## Résultats et discussion de simulation intercommunication par Laser

Le système OWC se compose de trois parties principales : l'émetteur, le canal de propagation et le récepteur comme le montre la figure III-9, l'émetteur se trouve dans le premier satellite et le récepteur dans le deuxième satellite. Les communications optiques sans fil utilisent la lumière à fréquence proche de l'infrarouge pour communiquer.

Le système IsOWC n'est pas très différent de l'optique en espace libre et de la communication par fibre la différence résidant dans la propagation.

La partie de l'émetteur contient un laser à onde continue (CW) utilisé comme source de lumière, est réglé sur une fréquence de 195 THz avec une puissance 25 dBm. Un signal de données à transmettre est généré par un générateur de séquences de bits pseudo-aléatoires de débit 5 bit /s, et les impulsions correspondantes sont créées à l'aide d'un générateur d'impulsions sans retour à zéro (NRZ). La lumière émise est ensuite modulée extérieurement à l'aide d'un modulateur mach zehnder.

On ajoute aussi wattmètre optique (Optical Power Meter\_1) qui mesure la puissance émise et aussi analyseur de spectre optique (Optical Spectrum analyser\_1) qui désigne et affiche la distribution de puissance de la source (CW LASER).

Le signal modulé qui transporte l'information est alors envoyé à la destination via le canal de communication optique sans fil (OWC) qui est réglé sur des distances 400 km et 600 km et 800 km

La partie du canal de propagation contient un canal de OWC de fréquence 195 THz qui est modélisé entre un émetteur et un récepteur optique avec un diamètre d'ouverture de l'émetteur du télescope égale à 25 cm et un diamètre d'ouverture de récepteur du télescope égale à 15 cm. Les gains de l'émetteur et du récepteur sont de 0 dB. Les antennes de l'émetteur et du récepteur sont également supposées idéales.

Les pertes supplémentaires sont de 1.49 dB. Avec la valeur des erreurs de pointage est de 1  $\mu$ rad.

La partie de récepteur contient un photodétecteur (APD) qui détecte le signal. Et donc Le signal est ensuite filtré à l'aide d'un filtre passe-bas de Bessel (LPF) dont la fréquence de coupure est de  $0,75 \cdot \text{bit rate}$ . Ensuite, il y a un Analyseur BER qui analyse les performances du système et calcule la valeur de facteur Q et aussi en désigne le diagramme de l'œil.

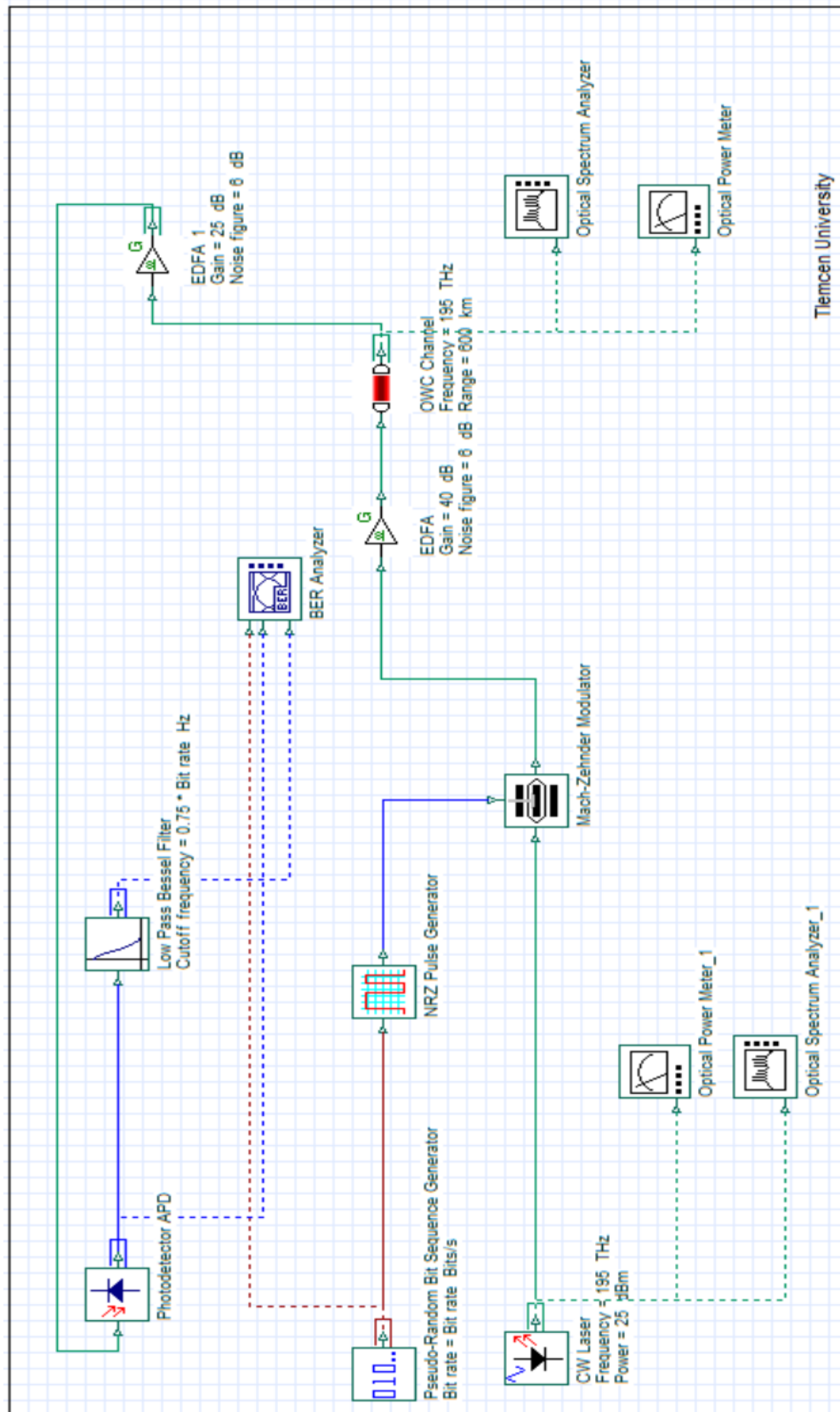


Figure III.9 : Schéma de la structure proposé pour intercommunication satellitaire LEO-Ground.

Paramètres	Valeurs
Laser	CW
Longueur d'onde	1538 nm
Puissance d'émission	25 dBm
Distance	400km ,600km, 800 km
Débit de données	1e+009 bit/s
Modulation	NRZ
Photo de détecteur	APD
Erreurs de pointage	1 urad
Pertes supplémentaires	1.49 dB
Diamètre d'ouverture d'Émetteur	25 cm
Diamètre d'ouverture de récepteur	15 cm
Atténuation	0.09 dB/km

**Tableau III- 2 :** les paramètres de simulation.

Le tableau III.2 de paramètres de simulation pour une liaison à 1538 nm en utilisant modulation NRZ.

### **III-5. RESULTATS ET DISCUSSION**

Un système optique sans fil intersatellite est conçu à l'aide du simulateur OPTI-SYSTEM composé de deux satellites avec une différence d'espace de 400km et 600 km et 800km, et un débit binaire de 1e+009 bit /s avec une longueur d'onde de fonctionnement égal à 1538 nm en utilisant le format de modulation NRZ.

#### **III-5-1. Intercommunication satellitaire LEO-Ground pour une distance de 400 km**

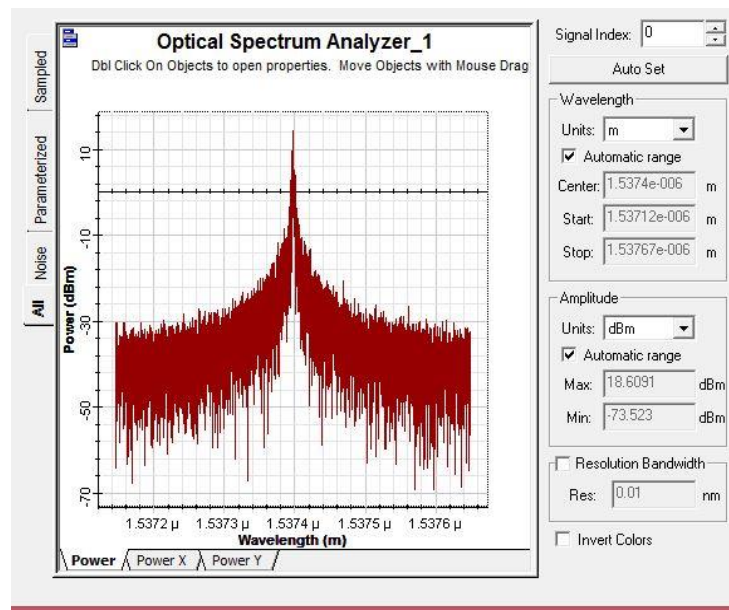
Cette figure montre le spectre de puissance optique transmise de la liaison optimisée pour une portée de 400 km à la longueur d'onde de fonctionnement 1538 nm.

La puissance optique transmise est de  $31,623 \cdot 10^{-3}$  watts, calculée par le wattmètre et cette puissance transmise à la longueur d'onde de fonctionnement 1538 nm est également la même pour les autres distance 600 km et 800 km.

Pour une longueur d'onde de 1.5374  $\mu\text{m}$ , la valeur maximale de la puissance doit être égale à 18.0691 dBm.

Nous voyons que la valeur de la puissance Min doit être de -73,523 dBm et la puissance Max est de 18,6091 dBm.



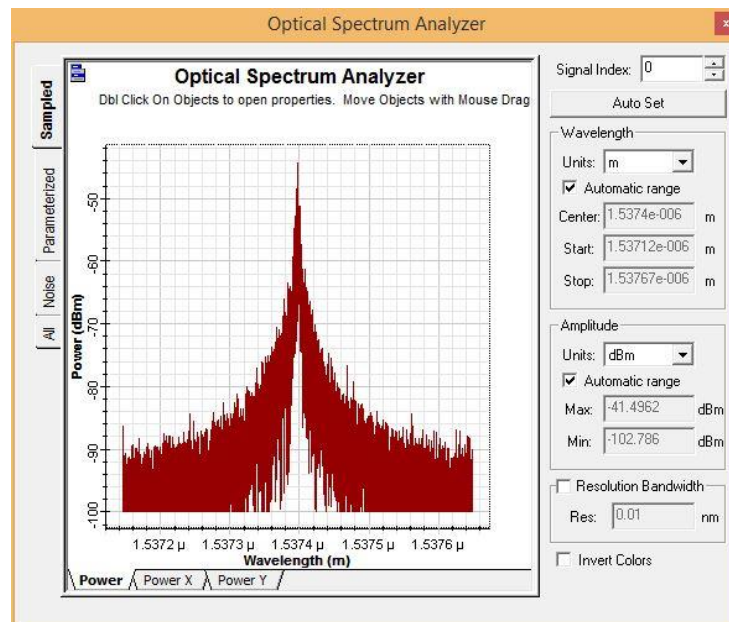


**Figure III- 10 :** Puissance optique transmise pour une portée de liaison de 400km à une longueur d'onde 1538nm coté de diode semi-conducteur.

Cette figure montre le spectre de puissance optique reçu de la liaison, optimisé pour une portée de 400 km à la longueur d'onde de 1538 nm.

La perte de puissance optique au niveau du récepteur peut être analysée à l'aide de l'analyseur de spectre au niveau du récepteur.

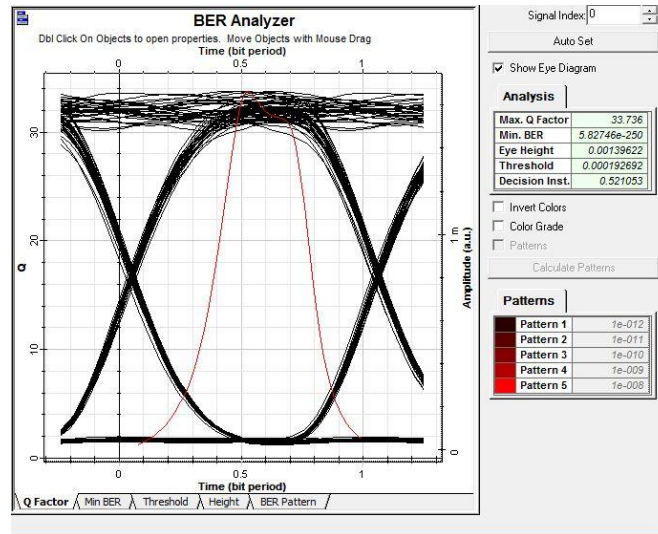
La valeur de puissance maximale est de -41,49 dBm et la valeur de puissance minimale est de -102,786 dBm.



**Figure III- 11 :** Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 400 km à une longueur d'onde de 1538nm coté photodétecteur.

## Résultats et discussion de simulation intercommunication par Laser

Cette figure montre le diagramme de l'œil et la qualité de facteur Q dont la distance est de 400 km, le débit binaire est de  $1e+009$  bit /s et la longueur d'onde est de 1538 nm en utilisant la modulation NRZ, avec une puissance d'émission de 25 dBm.

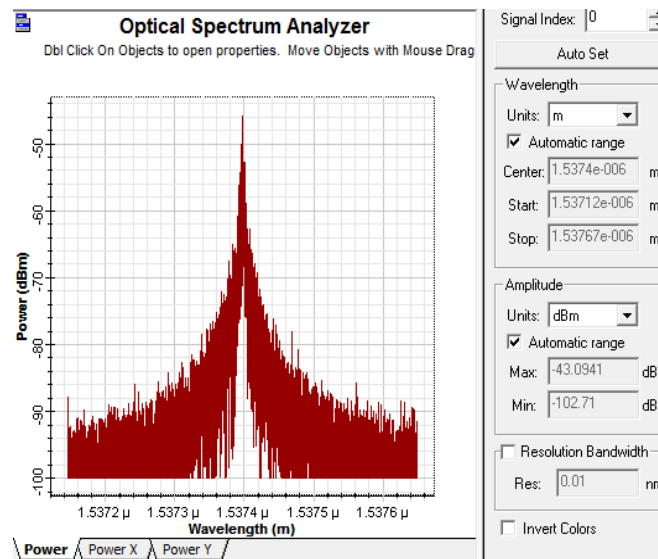


**Figure III- 12 :** La qualité de facteur Q avec un diagramme de l'œil dans une distance de 400 km.

Le Max facteur Q pour 1538 nm est de 33.736 et le MINI BER est de  $5.83e-250$ .

### III-5-2. Intercommunication satellitaire LEO-Ground pour une distance de 600 km

Cette figure montre le spectre de puissance optique reçu de la liaison, optimisé pour une portée de 600 km à la longueur d'onde de 1538 nm.



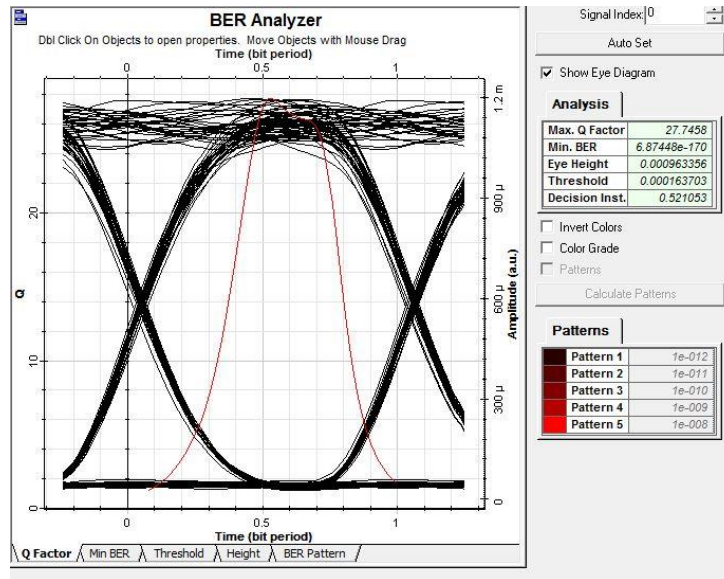
**Figure III- 13 :** Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 600 km à une longueur d'onde de 1538nm.

## Résultats et discussion de simulation intercommunication par Laser

La perte de puissance optique au niveau du récepteur peut être analysée en utilisant l'analyseur de spectre au niveau du récepteur.

La valeur de puissance maximale est de -43,09 dBm et la puissance minimale doit être de -102,71 dBm.

Cette figure montre le diagramme de l'œil et la qualité du facteur Q sur une distance de 600 km avec un débit binaire de  $1e+009$  bit/s et la longueur d'onde de 1538 nm en utilisant la modulation NRZ, avec une puissance d'émission de 25 dBm et un gain de 35 dB.

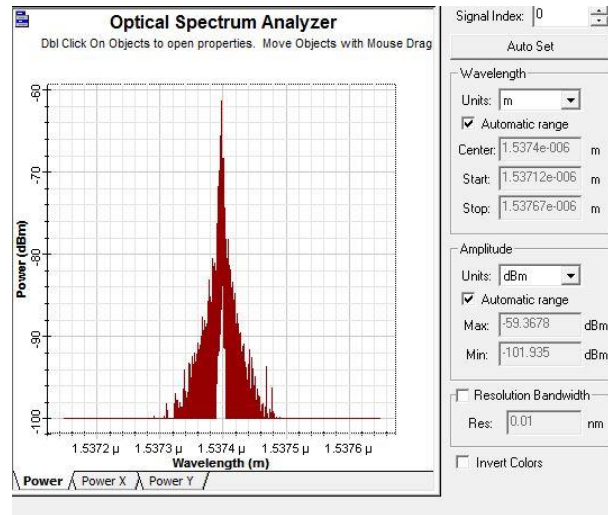


**Figure III- 14 :** La qualité de facteur Q avec un diagramme l'œil dans une distance de 600 km.

Dans ce cas, on produit un minimum d'erreurs avec un facteur Q enregistré de 27.7458 et de BER égal à  $6.87e-170$ .

### III-5-3. Intercommunication satellitaire LEO-Ground pour une distance de 800 km

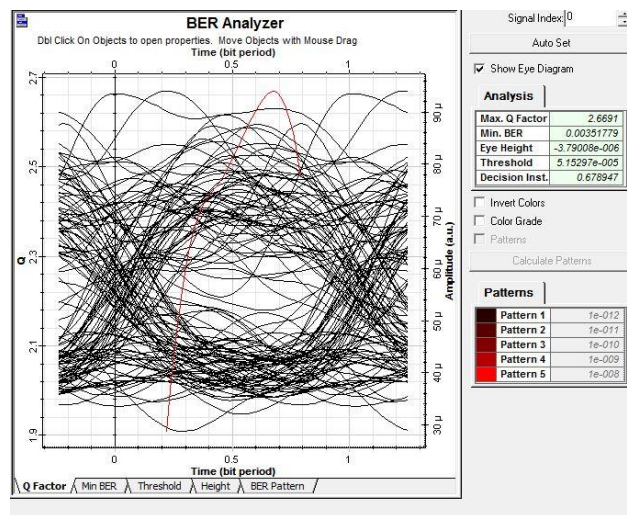
Cette figure montre spectre de puissance optique reçu de la liaison optimisée pour une portée de 800 km à la longueur d'onde 1538nm. La perte de puissance optique au niveau du récepteur peut être analysée, en utilisant l'analyseur de spectre au niveau du récepteur.



**Figure III- 15 :** Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 800 km à une longueur d'onde de 1538nm et un gain de 40 dB.

La valeur de la puissance reçue maximale est -59.36 dBm et la puissance reçue minimale doit être égal -101.93 dBm.

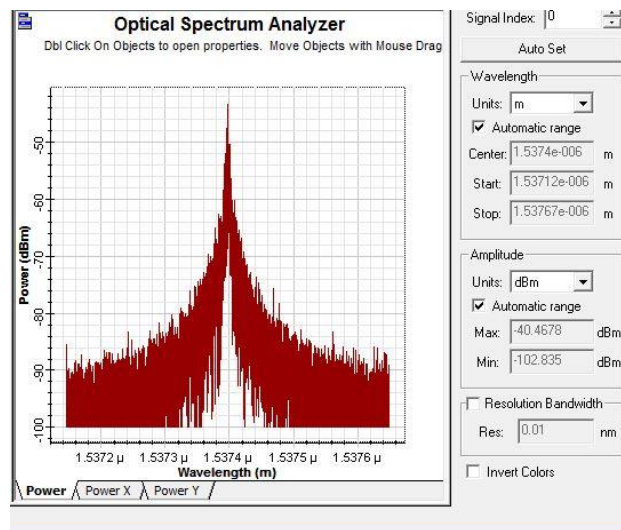
Cette figure montre le diagramme de l'œil et la qualité du facteur Q sur une distance de 800 km avec un débit binaire de  $1e+009$  bit/s et la longueur d'onde de 1538 nm en utilisant la modulation NRZ, avec une puissance d'émission de 25 dBm et un gain 40 de dB.



**Figure III- 16 :** La qualité de facteur Q avec un diagramme l'œil dans une distance de 800 km.

La valeur maximale du facteur Q est de 2,6691 avec une valeur BER minimale de  $35,17 \cdot 10^{-4}$ . Notez que dans ce diagramme, lorsque la distance augmente de 600 km à 800 km au même débit binaire, le diagramme de l'œil a plus de gigue et l'ouverture de l'œil diminue comme indiqué. Pour adapter cette diagramme l'œil, nous allons augmenter le gain d'amplificateur (EDFA) et voir la stabilité de diagramme l'œil.

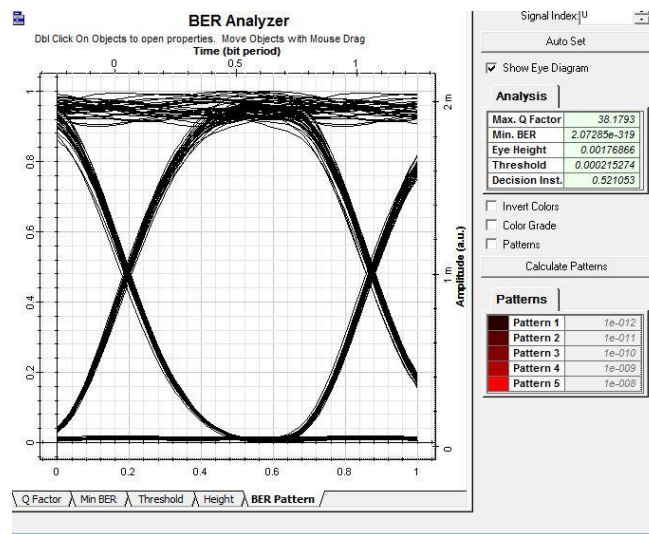
Pour un gain de 58 dB, nous avons :



**Figure III- 17 :** Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 800 km à une longueur d'onde de 1538nm (gain 58 dB).

Dans cette figure, la valeur de puissance maximale doit être de -40,46 dBm et la valeur minimale doit être de -102,83 dBm.

A noter que la valeur de la puissance maximale diminue fortement avec la distance.



**Figure III- 18 :** Un diagramme l'œil dans une distance 800 km avec un gain 58 dB.

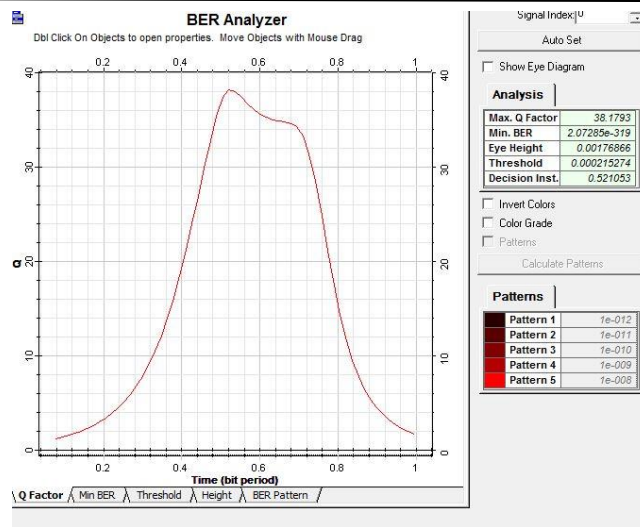


Figure III- 19 : La qualité de facteur Q dans une distance 800 km avec un gain 58 dB.

Dans ce cas, on produit un minimum d'erreurs avec un facteur Q enregistré de 38.18 et de BER égal à 2.07e-319.

Maintenant nous traversons les valeurs existantes dans un tableau :

Distance [km]	Le gain [dB]	Q facteur	Min BER	Puissance reçue [dBm]	
				Max	Min
400	15	33.736	5.83e-250	-41.50	-102.80
600	35	27.74	6.87e-170	-43.09	-102.71
800	58	38.18	2.07e-319	-40.46	-102.83

Tableau III- 3 : Résultats de l'analyse.

### III-5-4. Distance oblique [III-14]

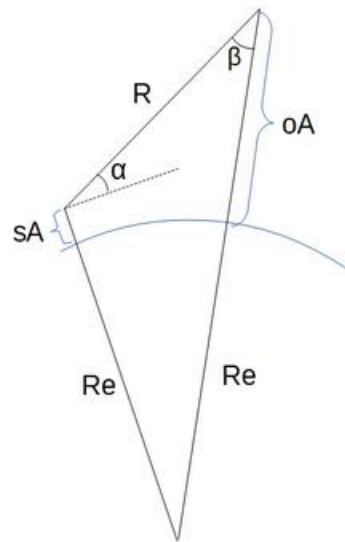
Le calculateur de distance oblique calcule la distance oblique (R) entre une station au sol et un objet (satellite ou avion) en fonction des altitudes de la station et de l'objet et de l'angle d'élévation ( $\alpha$ ).

$$R = f(oA, sA, \alpha) \quad III - 4$$

#### Instructions

Sélectionnez les unités et saisissez les données suivantes :

- (sA) Altitude de la station au-dessus du rayon terrestre moyen ;
- ( $\alpha$ ) Angle d'élévation entre la station au-dessus de l'horizon et l'objet ;
- (oA) Altitude de l'objet par rapport au rayon terrestre moyen.



**Figure III- 20 : Schéma 01 de système intercommunication pour distance oblique [III-14].**

**Portée oblique (R) :** La portée est indiquée en kilomètres. Elle peut toutefois être convertie automatiquement en unités compatibles via le menu déroulant.

La formule de la portée oblique utilise à la fois la loi des sinus et la loi des cosinus. Dans le triangle obtus ci-dessous :

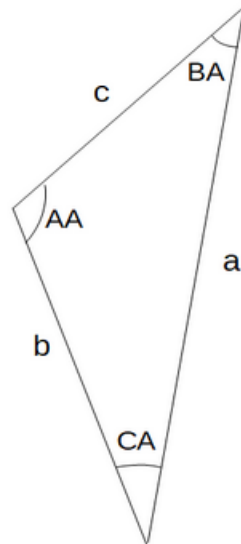
- $b = Re + sA$  III – 5
- $a = Re + oA$  III – 6
- $c$  est la plage d'inclinaison
- CA est l'angle central de la Terre
- BA est l'angle sous-tendu ( $\beta$ )
- AA est l'angle d'élévation ( $\alpha$ ) + 90°.

**Loi des sinus :**

$$\frac{\alpha}{\sin(AA)} = \frac{b}{\sin(BA)} = \frac{c}{\sin(CA)} \quad III - 7$$

**Loi des cosinus :**

$$c = \sqrt{\alpha^2 + b^2 - 2\alpha \cdot b \cdot \cos(CA)} \quad III - 8$$



**Figure III- 21 : Schéma 02 de système intercommunication pour distance oblique [III-14].**

Pour calculer divers paramètres comme le BER, le facteur  $Q$ , la puissance, etc., nous avons choisi deux points, le plateau de Lala Sety à une altitude de 672 km avec le satellite (comme le montre la figure III.22 ci-dessous) à l'aide de la loi de la distance oblique avec logiciel OptiSystem et en utilisant logiciel origine pour visualiser les résultats obtenus.



**Figure III- 23 : Plateau lala Sety [III-15].**



**III-5-5. Variation des paramètres**

En modifiant divers paramètres, l'OptiSystem a une portée de transmission de 671 km à 3000 km. Simulation de l'observation du diagramme de l'œil du signal reçu, les diagrammes de l'œil du signal reçu sont observés.

Les valeurs du facteur Q et BER sont notés et tabulés pour différents ensembles de valeurs pour chacun des paramètres. Des colonnes graphiques sont tracés pour chacune des tabulations afin d'observer les variations du facteur Q en fonction de la portée pour chacune des tabulations. Les erreurs de pointage dues aux vibrations du satellite sont également analysées.

De plus, les paramètres du système sont optimisés pour compenser la dégradation du facteur Q causée par les erreurs de pointage. Par conséquent, une amélioration des performances peut être observée dans le cas d'erreurs de pointage.

**III-5-5-A. Effet de l'élévation**

Le tableau ci-dessous montre les variations de Q et BER avec la puissance émise et reçue et le gain en fonction du changement d'élévation.

Phase initiale [°]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Distance [km]	3000	2091	1529	1190	981	848	763	710	680	671
Q facteur	6.76	27.76	37.69	36.81	34.98	32.13	27.11	25.18	19.42	10.75
BER	5.76e-012	4.61e-170	2.5e-311	4.95e-297	1.15e-268	5.28e-227	2.42e-162	2.94e-140	2e-084	2.5e-027
Puissance émis [dBm]	180	115	69	44	25	25	25	25	25	25
Puissance reçus [dBm]	-43.82	-33.87	-31.57	-31.90	-32.4	-33.2	-34.6	-35.2	-37.13	-41.2
Gain [dB]	100	90	85	77	75	61	51	45	40	35

**Tableau III- 4 : Effet de l'élévation.**

Lorsque l'élévation égal 0° ,la valeur de la puissance émis est plus élevée.

## Résultats et discussion de simulation intercommunication par Laser

L'augmentation de l'élévation est directement proportionnelle à la distance lorsque l'élévation augmente, le Q facteur et le BER diminuent avec la puissance d'émission et la puissance de réception et le gain peut être amélioré.

On désigne ce résultat de ce tableau dans cette figure suivante :

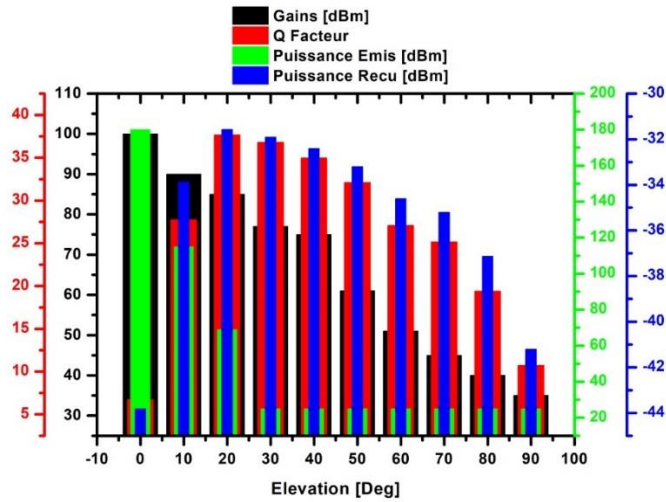


Figure III- 24 : Variation de phase initiale (élévation) [°].

Cette figure représente des colonnes graphiques de variation de phase initiale (élévation) [°].

Quand l'élévation augmente, la puissance d'émission et la puissance de réception avec le BER et le facteur Q diminuent et le gain peut être amélioré.

Pour une altitude de 20° et une distance de 1529 km, la valeur maximale du facteur Q est de 37,69 et le BER est de 2,5e-311.

### III-5-5-B. Effet de l'ouverture de télescope

Le tableau ci-dessous montre les changements du facteur Q et du BER avec la puissance émise et reçue et le gain en fonction de la variation d'ouverture.

Ouverture	15	25	35	45	55
Q facteur	23.79	32.58	27.45	22.44	19.26
BER	1.45e-125	3e-233	2.78e-166	5.9e-112	4.33e-083
Puissance émis [dBm]	25				
Puissance reçus [dBm]	-35.01	-32.59	-33.92	-35.46	-36.60
Gain [dB]	45	40	35	32	31

Tableau III- 5 : Effet de l'ouverture de télescope.

## Résultats et discussion de simulation intercommunication par Laser

L'augmentation de l'ouverture de télescope entraîne une augmentation du Q facteur et le du BER ainsi que la puissance reçue. Cependant, si l'ouverture est augmentée de plus de 25 cm, le Q facteur et le BER avec la puissance reçue et le gain diminuent.

L'élargissement de l'ouverture de télescope est directement proportionnel au gain.

On note ce résultat de ce tableau dans la figure suivante :

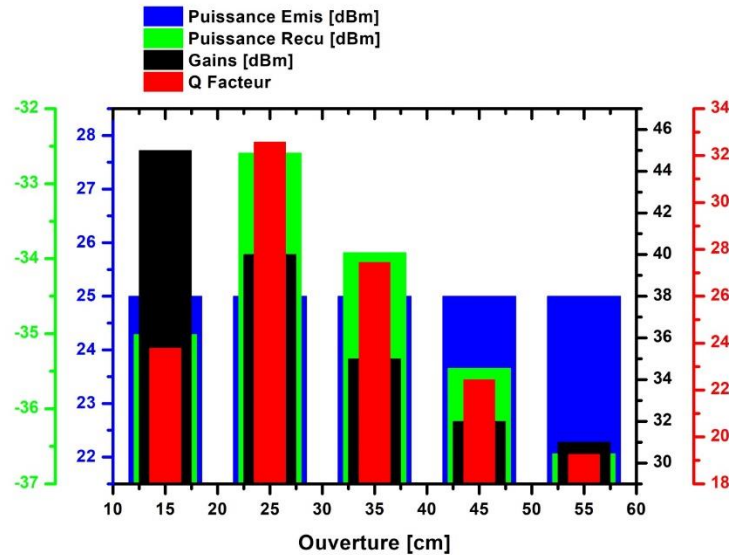


Figure III- 25 : Variation d'ouverture de télescope [cm].

Cette figure représente des colonnes graphiques d'ouverture télescope [cm].

Lors de l'utilisation de la lumière laser comme source de lumière, une ouverture de télescope relativement petite est nécessaire en raison de l'étroitesse du faisceau. À mesure que la portée de transmission augmente, le BER et le facteur Q diminuent en raison de la réduction de la puissance de réception.

En augmentant l'ouverture de télescope, le BER, le facteur Q et le gain peuvent être améliorés.

### III-5-5-C. Variation de fréquence

Le tableau suivant montre les changements du facteur Q et du BER avec la puissance émise et reçue et le gain en fonction de la variation de fréquence.

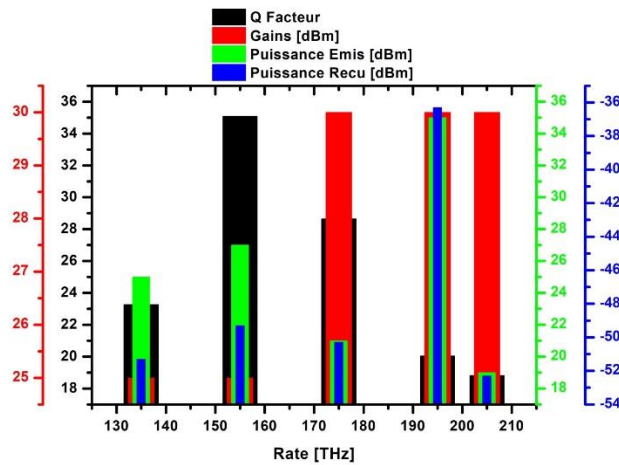
**Résultats et discussion de simulation intercommunication par Laser**

Fréquence [THz]	135	155	175	195	205
Longueur d'onde [nm]	2222	1935	1714	1538	1463
Q facteur	23.27	35.09	28.65	20.05	18.82
BER	4.42e-120	3.42e-270	7.03e-181	8.13e-090	2.25e-079
Puissance émis [dBm]	25	25	30	30	30
Puissance reçus [dBm]	-51.30	-49.30	-50.30	-36.30	-52.30
Gain [dB]	25	27	21	35	19

**Tableau III- 6 : Variation de fréquence.**

Une augmentation de la fréquence entraîne une augmentation du facteur Q et du BER ainsi que de la puissance et du gain de réception. Cependant, lorsque la fréquence augmente au-delà de 155 THz, le facteur Q, le BER et le gain diminuent avec la puissance émise et reçue.

Nous notons ce résultat de ce tableau dans la figure ci-dessous



**Figure III- 26 : Variation de fréquence [THz].**

Cette figure représente des colonnes graphiques de la variation de fréquence [THz].

Lorsque la fréquence d'émission augmente, le BER et le gain augmentent, ce qui réduit le facteur Q. Lorsque la portée de transmission augmente, le BER et le facteur Q diminuent en raison de la puissance de réception réduite.

A une fréquence de 155 THz, la valeur maximale du facteur Q est de 35,09 et le BER est de 3,42e-270.

### **III-6. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus lors de l'étude des systèmes de communication optique sans fil inter-satellites (IsOWC), en utilisant le logiciel OPTISYSTEM. On a étudié les paramètres de performance du système tels que la puissance, le BER, le facteur Q.

Nous concluons de ce travail, lorsque la puissance du signal émis par le satellite LEO est augmentée, le signal reçu au sol devient plus fort, ce qui améliore le taux d'erreur binaire (BER). Cela signifie que les bits de données sont transmis avec moins d'erreurs, ce qui améliore la qualité de la transmission sans oublier le gain qui est très important pour l'adaptation de diagramme l'œil. L'analyse soignée des graphes de puissance de transmission de données obtenus grâce à OptiSystem peut permettre de réduire les pertes et d'améliorer les performances de transmissions de données.

Dans ce projet, on suppose qu'aucune particule n'obstrue le signal lumineux, mais des particules petites et grandes, telles que des poussières spatiales et des météorites, peuvent se trouver dans le champ de vision du satellite.

La transmission de données depuis les orbites basses terrestres est une technologie en plein développement. Les avantages de la transmission LEO sont nombreux, les résultats fournissent des résultats précieux pour le développement de futures technologies de transmission.

# **Conclusion**

## **Générale**

### **CONCLUSION GENERALE**

Les systèmes de communication optique sans fil inter-satellites (IsOWC) sont l'une des applications importantes de la technologie FSO/OWC qui se développeront dans l'espace dans un avenir proche. Ces systèmes offrent une large bande passante, une petite taille, un poids léger, une faible consommation d'énergie et un faible coût par rapport aux systèmes de satellites à micro-ondes actuels.

Les liaisons inter-satellites sont nécessaires entre les satellites en orbite autour de la terre pour la transmission de données entre les satellites et pour un relais efficace d'un satellite à l'autre, puis aux stations terrestres. La communication optique sans fil inter-satellites traite de l'utilisation de la communication optique sans fil à l'aide de lasers au lieu de la communication radio conventionnelle.

Le problème majeur de cette communication optique sans fil pour les liaisons inter-satellites est l'effet des vibrations du satellite qui entraînent de graves erreurs de pointage qui dégradent les performances de ce système dépendent également de divers paramètres comme la puissance transmise, le débit de données et l'ouverture de l'antenne sont analysés à l'aide du logiciel de simulation OptiSystem.

Ce document modélise l'IsOWC pour les satellites en orbite terrestre basse en supposant que tous les satellites sont en ligne de vue et synchronisés. La performance d'un tel système de communication optique intersatellite dépend de divers paramètres tels que la puissance transmise au récepteur, le débit de données de la transmission et les ouvertures des antennes optiques d'émission et de réception. En raison du mouvement inhérent des satellites sur leurs orbites, des vibrations se produisent, ce qui entraîne des erreurs de pointage.

Étant donné que les systèmes laser sont dans les communications optiques sans fil intersatellites (IsOWC), cela affecte gravement la performance de la liaison, même en cas de synchronisation du récepteur et de l'émetteur. Parallèlement, la technologie de communication optique sans fil (OWC) s'est développée et a progressé tout au long de l'année. La communication laser est désormais capable d'envoyer des informations à des débits pouvant atteindre plusieurs Gbps et à des distances de plusieurs milliers de kilomètres. Cela a ouvert l'idée d'adapter la technologie de la communication sans fil optique à la technologie spatiale ; c'est ainsi qu'est née la communication optique sans fil inter-satellites a été développée.

La transmission LEO est une technologie évolutive qui continue de se développer et de s'améliorer pour répondre aux exigences futures des applications de transmission de données.

## *Conclusion générale*

Dans ce projet, les liaisons inter-satellites et l'application de la communication optique sans fil ont été bien comprises. La simulation et la modélisation de l'IsOWC peuvent être effectuées avec le logiciel OptiSystem entre deux satellites séparés par une distance de 400 km, 600km ensuite 800 km avec un débit de données de  $1e+009$  bit/s avec une longueur d'onde de fonctionnement égal à 1538 en utilisant la modulation NRZ.

La mission spatiale implique souvent la transmission de données à partir d'un satellite à la Terre. Cependant, la qualité et la force des signaux transmis peuvent être affectées par divers facteurs. Notre objectif principal est d'améliorer la puissance de transmission des données via LEO-Ground en fonction du taux d'erreur et le facteur Q.

D'après le modèle IsOWC et les résultats de la simulation, on peut conclure que la longueur d'onde du signal soit plus grande et produise plus d'erreurs. On peut observer que le facteur Q est inversement proportionnel à la distance.

Dans une transmission de données, la puissance est un paramètre clé qui influe sur la qualité et la fiabilité de la communication. Une augmentation de la puissance peut généralement améliorer la qualité du signal reçu au sol, réduire le taux d'erreur et augmenter le facteur Q.

Il est également important de prendre en compte d'autres facteurs dans l'amélioration de la transmission de données LEO-Ground, tels que la conception du système de communication, l'utilisation de techniques de codage et de modulation efficaces, la gestion du spectre et la gestion de l'interférence. Ces éléments peuvent tous contribuer à une amélioration globale des performances du système.

La technologie de transmission LEO Ground est en constante amélioration et permettra une connectivité fiable pour les futures missions spatiales.



## REFERENCES

- [1] J. Louis and Jr. Ippolito, « Satellite Communications Systems Engineering », 1st Edition John Wiley & Sons Ltd, Washington, DC, USA 2008.
- [2] G. Maral, “ Système de télécommunications par satellite”, Technique de l'ingénieur E 7560, 1995.
- [3] M. Kermani, “Modélisation des vibrations dans la communication optique par les satellites lasers”, Thèse de magister, Université de Constantine, 2001.
- [4] H. Hemmati, “Near-Earth Laser Communications”, CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.
- [5] S. Senouci, “L’approche Multi-Agents pour le contrôle adaptatif d’une constellation de satellites ”, Laboratoire PRISM Université de Versailles 45, Av. des États-Unis 78035 Versailles Cedex – France.
- [6] A. Niculae, “Mécanismes d'optimisation multi-niveaux pour IP sur satellites de nouvelle génération”, Thèse doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.
- [I-1] S.Arnon, S.R.Rotman and N.S.Kopeika, “ Performances limitations of free space optical communication satellite network due to vibrations: direct detection digital mode,”. Opt Eng 36, 11 3148-3157 november 1997.
- [I-2] M.H.Hadjitheodosiou,A.Ephremides and D.Friedman, “ Broadband access via satellite,” *Compteur Networks* 31 (1999) 353-378.
- [I-3] B. R. Elbert, *The satellite communication applications handbook*: Artech house, 2004.
- [I-4] S. Arnon and N. Kopeika, "The performance limitations of free space optical communication satellite networks due to vibrations-analog case," in *Proceedings of 19th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 1996, pp. 287-290.
- [I-5] S. Arnon and N. S. Kopeika, "Laser satellite communication network-vibration effect and possible solutions," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, pp. 1646-1661, 1997.
- [I-6] S. Ohmori, H. Wakana and S. Kawase, “Mobile satellite communications”, Artech House, Boston. London, 1998.
- [I-7] S. Arnon and N. S. Kopeika, “Laser satellite networks- vibration effects and possible solutions”, *Proceedings of IEEE*, Vol. 85, No. 10, pp. 1646-1661, 1997.
- [I-8] M. Wittig, L. van Holtz, D. E. L. Tunbridge, and H. C. Vermeulen, “In orbit measurements of microaccelerations of ESA’s communication satellite OLYMPUS,” in *Selected Papers on Free-Space Laser Communication II— SPIE Ms 100*, D. L.Begly and B. J. Thompson, Eds. Bellingham, WA: SPIE, 1994,pp.398-398.
- [I-9] S. J.C. Dyne, D. E. L. Tunbridge, and P. P. Collins, “The vibration environment on a satellite in orbit,” in *IEE Colloquium High Accuracy Platform Control in Space*, 1993, pp. 12/1–12/6.
- [I-10] S.J.C Dyne, P. P. Collins, and D.E.L Tunbridge, “Satellite mechanical healthmonitoring,” in *IEE Colloquium Advanced Vibration Measurements, Techniques and Instrumentation for the Early Predication of Failure*, 1992, pp. 4/1–4/8.
- [I-11] S. Arnon and N. S. Kopeika, "Laser satellite communication network-vibration effect and possible solutions," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, pp. 1646-1661, 1997.
- [I-12] S. G. Lambert, *Laser communications in space / Stephen G. Lambert and William L. Casey*. Boston: Artech House, 1995.
- [I-13] S. Arnon and N. Kopeika, "The performance limitations of free space optical communication satellite networks due to vibrations-analog case," in *Proceedings of 19th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 1996, pp. 287-290.
- [I-14] M. Kermani, “Modélisation des vibrations dans la communication optique par les satellites lasers”, Thèse de magister, Université de Constantine, 2001.

## Références

- [I-15] M. Ouacifi, "Modélisation des vibrations au niveau des satellites lasers", Thèse de magister, Université de Batna, 2009.
- [I-16] S. Arnon, S. Rotman, and N. Kopeika, "Optimum transmitter optics aperture for satellite optical communication," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 34, pp. 590-596, 1998
- [I-17] C.-C. Chen and C. S. Gardner, "Impact of random pointing and tracking errors on the design of coherent and incoherent optical intersatellite communication links," IEEE Transactions on communications, vol. 37, pp. 252-260, 1989.
- [I-18] S. Arnon, S. R. Rotman, and N. S. Kopeika, "Performance limitations of free-space optical communication satellite networks due to vibrations: direct-detection digital mode," in 10th Meeting on Optical Engineering in Israel, 1997, pp. 357-368.
- [I-19] Pierre Lecoy, «Télécom sur fibres optiques», 3<sup>ème</sup> édition revue et augmentée.
- [I-20] E.Yablonivitch and al, " Optoelectronic quantum telecommunication based on Spins In Semiconductors," Proceedings of the IEEE, vol 91 May 2003.
- [I-21] S. Arnon, S. Rotman, and N. S. Kopeika, "Optimum transmitter optics aperture for satellite optical communication", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systeme, Vol. 34, No. 2, 1998.
- [I-22] Vincent Foucal, " Conception d'interconnexions optiques haut débit courte distance en espace libre. Prototypage de modules de communication pour applications embarquées ".FOUCAL\_Vincent\_2010.
- [I-23] Rapport UIT-R F.2106, " Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre ".
- [I-24] M. Al Aboulai, « Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques propagation, disponibilité et fiabilité », Thèse de doctorat l'université de Bourgogne, France, 2005.
- [I-25] Zaman, Imam Uz, et al. « Polarization mode dispersion-based physical layer key generation for optical fiber link security », Optical Sensors. Optical Society of America, 2017.
- [I-26] H.T. Yura, W.G. McKinley, « Optical scintillation statistics for IR ground-to-space laser communication systems », Appl. Opt. 22(21), 3353–3358 (1983)
- [I-27] Arief, A.R., Aljunid, S.A., Anuar, M.S., Junita, M.N., Ahmad, R.B., Ghani, F.« Enhanced performance of new family modified double weight codes spectral amplitude coding optical CDMA system network », In: IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, pp. 488–494 (2011).
- [I-28] 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.
- [I-29] Hasoon, F.N., Aljunid, S.A., Abdullah, M.K., Shaari, S, « Multi-rate transmissions on SACOCDMA system using new enhancement double-weight (EDW) codes » In: 2nd Information and Communication Technologies (ICTTA) (2006).
- [I-30] Ahmed, N, Aljunid, S.A., Ahmad, R.B, Rashid, M.A.: Novel OCDMA detection technique based on modified double weight code for optical access network. Elektron. Ir Elektrotech. 18, 117–121 (2012)
- [I-31] 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.
- [I-32] Mesri Lamia, « Etude et analyse des performances du système FSOSAC-OCDMA sous l'effet de mauvaises conditions météorologiques », thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi- BelAbbes, 2019.
- [I-33] 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
- [I-34] 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.

## Références

- [I-35] 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
- [I-36] Vincent Foucal, " Conception d'interconnexions optiques haut débit courte distance en espace libre. Prototypage de modules de communication pour applications embarquées ".FOUCAL\_Vincent\_2010.
- [I-37] O. RINGAR, " Utilisation des techniques avancées d'Emission/Réception multi- antennes pour une transmission optique large bande ", Thèse de l'université de LIMOGES, France, 2015.
- [I-38] F.Ben Ahmed,B.Kanoun. 'Analyse des performances d'une communication optique en espace libre', Thèse de doctorat écolesupérieure des communications de Tunis, 2015.
- [I-39]J.Barry, Wireless optical communication systems. Springer, 1994.
- [I-40] J. Kahn and J. Barry, "Wireless infrared communications," Proceedings of the IEEE, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, 1997.
- [I-42] S. Arnon, J.R. Barry, G.K. Karagiannidis, R. Schober, and M. Uysal (Eds.): Advanced Optical Wireless.
- [I-43] F. R. Gfeller and U. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuseinfrared radiation," Proceedings of the IEEE, vol. 67, no. 11, pp. 1474– 1486, 1979
- [I-44] M. Paksuniemi, H. Sorvoja, E. Alasaarela, and R. Myllyla, "Wireless sensor and data transmission needs and technologies for patient monitoring in the operating room and intensive care unit," in Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005.27th Annual International Conference of the. IEEE, 2006, pp. 5182–5185.
- [I-45] Murat Uysal and Hatéf Nouri, «Optical Wireless Communications – An Emerging Technology », Department of Electrical and Electronics Engineering, Ozyegin University, 34794 Istanbul, Turkey, 2014.
- [I-46] S.-H. Yu, O. Shih, H.-M. Tsai, and R. Roberts: Smart automotive lighting for vehicle safety, IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 12, pp. 50-59, Dec. 2013.
- [I-47] <http://cir-inc.com/> (last accessed at 06/07/2014).
- [I-48] C. Danakis, M. Afgani, G. Povey, I. Underwood, and H. Haas: Using a CMOS camera sensor for visible light communication, in Proc.IEEE Globecom Workshop on OWC, 2012.
- [I-49] H. Haan, M. Gerken, and M. Tausendfreund: Long-range laser communication terminals: Technically interesting, commercially incalculable, in Proc. 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), Jul. 2012.
- [I-50] C. Kachris, K. Bergman, Keren, and I. Tomkos (Eds.): Optical Interconnects for Future Data Center Networks, Springer, 2013.
- [I-51] J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications," Proc. IEEE, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, 1997.
- [I-52] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bölcskei, "An overview of MIMO communications - A key to gigabit wireless," in Proceedings of the IEEE, 2004, vol. 92, no. 2, pp. 198–217.
- [I-53] Z. Ghassemlooy, L. N. ALves, S. Zvanovec, and M.-A. Khalighi, Visible light communications: Theory and applications. 2017.
- [I-54] Z. Wang, Q. Wang, W. Huang, and Z. Xu, Visible Light Communications: Modulation and Signal Processing. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.2017.
- [I-55] a. J. C. Moreira, R. T. Valadas, and A. M. de Oliveira Duarte, "Performance of infrared transmission systems under ambient light interference," IEE Proc. -Optoelectron., vol. 143, no. 6, pp. 339–346, 1996.

## Références

- [I-56] D. shan Shiu and J. M. Kahn, "Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 8, pp. 1201–1210, 1999.
- [I-57] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab*. Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
- [I-58] C. Singh, J. John, Y. N. Singh, and K. K. Tripathi, "A review of indoor optical wireless systems," *IETE Technical Review (Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, India)*, vol. 19, no. 1–2, pp. 3–17, 2002.
- [I-59] J. B. Carruthers and J. M. Kahn, "Multiple-subcarrier modulation for nondirected wireless infrared communication," in *Global Telecommunications Conference*, 1994.
- [I-60] O. Gonzalez, R. Perez-Jimenez, S. Rodriguez, J. Rabadan, and A. Ayala, "OFDM Over Indoor Wireless Optical Channel," *Optoelectron. IEE Proc.*, vol. 152, no. 4, pp. 199–204, 2005.
- [I-61] J. Armstrong, "OFDM for optical communications," in *Journal of Lightwave Technology*, 2009, vol. 27, no. 3, pp. 189–204.
- [I-62] S. H. Younus and J. M. H. Elmirghani, "WDM for high-speed indoor visible light communication system," in *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2017.
- [I-63] A. Neumann, J. J. Wierer, W. Davis, Y. Ohno, S. R. J. Brueck, and J. Y. Tsao, "Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality," *Opt. Express*, vol. 19, no. S4, p. A982, 2011.
- [I-64] F. R. Gfeller and U. Bapst, "Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation," *Proc. IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1474–1486, 1979.
- [I-65] R. Ramirez-Iniguez and R. Green, "Indoor optical wireless communications," in *Optical Wireless Communications (Ref. No. 1999/128)*, *IEE Colloquium on. IET*, 1999, pp. 14–1.
- [I-66] Z. Ghassemlooy and A. Hayes, "Indoor optical wireless communications systems – part 1 : Review," *School of Engineering, Northumbria University*, 2003.
- [I-67] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication : potential and state-of-the-art," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 9, pp. 56–62, 2011.
- [II-1] S. Arnon and N. S. Kopeika, "Laser satellite networks- vibration effects and possible solutions,".
- [II-2] R. J. Leopold and A. Miller, "The IRIDIUM communications system," *IEEE Potentials*, vol. 12, .6–. Motorola Satellite Communications, pp. 575-578, Chandler, Arizona USA, 1993.
- [II-3] O. Kodheli, E. Lagunas, N. Maturo, S. K. Sharma, B. Shankar, J. F. M. Montoya, J. C. M. Duncan, D. Spano, S. Chatzinotas, S. Kisseleff et al., "Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020.
- [II-4] S. C Ekpo, B. Adebisi, D. George, R. Kharel, and M. Uko, "System-level multicriteria modelling of payload operational times for communication satellite missions in LEO," *Recent Progress in Space Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 67–77, 2014.
- [II-5] N. Saeed, A. Elzanaty, H. Almorad, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, "Cubesat communications: Recent advances and future challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 3, pp. 1839–1862, 2020.
- [II-6] R. Wang, M. A. Kishk, and M.-S. Alouini, "Ultra-dense LEO satellite-based communication systems: A novel modeling technique," *IEEE Communications Magazine*, vol. 60, no. 4, pp. 25–31, 2022.
- [II-7] F. Vatalaro, G. E. Corazza, C. Caini, and C. Ferrarelli, "Analysis of LEO, MEO, and GEO global mobile satellite systems in the presence of interference and fading," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 13, no. 2, pp. 291–300, 1995.
- [II-8] Y. Yaiche, "Contrôle des vibrations des communications optiques dans les satellites lasers," *Thèse de magister, Université de Constantine*, 2003.

## Références

- [II-9] [Toyoshima, 2006] Toyoshima, M. (2006). Trends of research and development on optical space communications technology. In IEICE General Conference.
- [II-10] [Toyoshima et al., 2015] Toyoshima, M., Fuse, T., Kolev, D. R., Takenaka, H., Munemasa, Y., Iwakiri, N., Suzuki, K., Koyama, Y., Kubooka, T., Akioka, M., and Kunimori, H. (2015). Current status of research and development on space laser communications technologies and future plans in nict. In 2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), pages 1–5.
- [II-11] [Hemmati and Caplan, 2013] Hemmati, H. and Caplan, D. (2013). Chapter 4 - optical satellite communications. In Kaminow, I. P., , Li, T., , and Willner, A. E., editors, Optical Fiber Telecommunications (Sixth Edition), Optics and Photonics, pages 121 – 162. Academic Press, Boston, sixth edition edition.
- [II-12] G. Maral, “ Système de télécommunications par satellite”, Technique de l’ingénieur E 7560, 1995.
- [II-13] [Jono et al., 2007] Jono, T., Takayama, Y., Shiratama, K., Mase, I., Demellenne, B., Sodnik, Z., Bird, A., Toyoshima, M., Kunimori, H., Giggenbach, D., Perlot, N., Knappek, M., and Arai, K. (2007). Overview of the inter-orbit and the orbit-to-ground laser communication demonstration by oicets. Proc.SPIE, 6457:6457 – 6457 – 10.
- [II-14] [Giggenbach et al., 2009] Giggenbach, D., Horwath, J., and Knappek, M. (2009). Optical data downlinks from earth observation platforms. Proc.SPIE, 7199:7199 – 7199 – 14.
- [II-15] [Wright et al., 2015] Wright, M. W., Morris, J. F., Kovalik, J. M., Andrews, K. S., Abrahamson, M. J., and Biswas, A. (2015). Adaptive optics correction into single mode fiber for a low earth orbiting space to ground optical communication link using the OPALS downlink. Opt. Express,23(26):33705–33712.
- [II-16] [Petit et al., 2016] Petit, C., Védrenne, N., Velluet, M.-T., Michau, V., Artaud, G., Samain, E., and Toyoshima, M. (2016). Investigation on adaptive optics performance from propagation channel characterization with the small optical transponder. Optical Engineering, 55:55 – 55 – 17.
- [II-17] G. Massaoud, “Modélisation d’un système de couverture à base d’une constellation de satellites étude du problème de Handover,” Thèse de Magister, Université de Batna, 2004.
- [II-18] Cours de Systèmes de télécommunications par satellite, Dr BELL Georges, 2015
- [II-19] R. E. Bruce, “Introduction to Satellite Communication”, third edition, Artech House, 2008.
- [II-20] J. Pares et V. Toscer, “Les systèmes de télécommunications spatiales,” Ecole nationale supérieure de techniques avancées, Paris, 1975.
- [II-21] A. Jamalipour, “Low earth orbital satellites for personal communication networks”, Artech House, Boston. London, 1998.
- [II-22] L’antenne de la station terrienne suisse pour satellite, P.T.T. Bull. Techn., n03, pp 68-84, 1977.
- [II-23] J.-E. Berg, R. Bownds, and F. Lotse, “Path loss and fading models for microcells at 900 MHz,” Vehic. Technol. Conf. Rec., pp. 666–671, May 1992.
- [II-24] Nadeem, Farukh, et al. "Weather effects on hybrid FSO communication link." IEEE journal on selected areas in communications 27.9 (2009).
- [II-25] Djebri manar et Maidaat nour elhouda ,« Etude d’un bilan de liaison satellitaire », Université Akli Mohand OulhadjBOUIRA Département de GénieElectrique,2016 /2017.
- [II-26] NTSAMA RITA, « Liaisons satellitaires : Calculateur de bilan de liaison et performances de la bande Ka », mémoire de fin d’étude présenté en vue de l’obtention du « Diplôme d’ingénieur de conception en télécommunications »,2016.

## Références

- [II-27] A. Kinane, “Optimisation de la mise a poste d’une constellation de satellites”, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2006.
- [II-28] S. Nacouz, “Réseaux de Télécommunications”, stage de DEA, département Informatique et Réseaux de l’ENST, Paris, France, 2005.
- [II-29] DJIDEL Saadi, <<Gestion de la mobilité radio dans une constellation de satellite à basse orbite (LEOs)>>, UNIVERSITE DE M’SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE L’ELECTRONIQUE, MEMOIRE, juin 2012. De fin d’étude présentée en vue de l’obtention du diplôme de Master, JUIN 2012.
- [II-30] G. Maral, Jean J. Derider. “Basic Concepts of Low Earth Satellite Systems for Communications”. ENST Toulouse. France, Report 1991.
- [II-31] N. Hedjazi, “Optimisation du problème du Handover dans les constellations de satellites en orbites basses”, Mémoire de Magister en Electronique, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [II-32] F. Christophy, “Routage dans les constellations de satellites LEO,” Diplôme d’études approfondies réseaux de télécommunications, Université de SAINT-JOSEPH, Lebanon 1999.
- [II-33] Khan, T.A.; Afshang, M. A Stochastic Geometry Approach to Doppler Characterization in a LEO Satellite Network. In Proceedings of the ICC 2020—2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, Ireland, 7–11 June 2020; pp. 1–6. [CrossRef]
- [II-34] Hou, Y.; Xiong, H.; Xiang, H.; Ma, B.; Xiong, J. Simulation Analysis of Multipath Fading Channel Characteristics in Satellite Communication System. In Proceedings of the 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Chongqing, China, 11–13 October 2019; pp. 1367–1370. [CrossRef]
- [II-35] Liu, T.; Sun, B.; Li, Z.; Dou, Z. Analysis of channel characteristics and channel model for satellite communication system. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Harbin, China, 20–22 August 2016; pp. 166–169. [CrossRef]
- [II-36] CCSDS. 401.0-B-29, Radio Frequency and Modulation Systems—Part 1 Earth Stations and Spacecraft; CCSDS: Washington, DC, USA, 2019.
- [II-37] <https://www.mdpi.com/journal/remotesensing>.
- [II-38] Jiang, W.; Yang, X.; Tong, F.; Yang, Y.; Zhou, T. A Low-Complexity Underwater Acoustic Coherent Communication System for Small AUV. *Remote Sens.* 2022, 14, 3405. [CrossRef]
- [II-39] Ming, L.; Lin, Z.; Yide, Z. A novel Doppler frequency shift compensation algorithm for OFDM underwater acoustic communication system. In Proceedings of the 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Guiyang, China, 25–27 May 2013; pp. 1571–1575. [CrossRef]
- [II-40]. N. Okati, T. Riihonen, D. Korpi, I. Angervuori, and R. Wichman, “Downlink coverage and rate analysis of low Earth orbit satellite constellations using stochastic geometry,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 8, pp. 5120–5134, 2020.
- [II-41] K. Belbase, Z. Zhang, H. Jiang, and C. Tellambura, “Coverage analysis of millimeter wave decode-and-forward networks with best relay selection,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 22 670–22 683, 2018.
- [II-42] Ruibo Wang, Anna Talgat, Student Member, IEEE Mustafa A. Kishk, Member, IEEE and Mohamed-Slim Alouini, Fellow, IEEE, « Conditional Contact Angle Distribution in LEO Satellite-Relayed Transmission », 2 aug 2022.
- [II-43] A. Gaber, M. A. ElBahaay, A. M. Mohamed, M. M. Zaki, A. S. Abdo, and N. AbdelBaki, “5G and satellite network convergence: Survey for opportunities, challenges and enabler technologies,” in 2nd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES). IEEE, 2020, pp. 366–373.
- [II-44] R. Wang, M. A. Kishk, and M.-S. Alouini, “Stochastic geometry-based low latency routing in massive LEO satellite networks,” available online: <https://arxiv.org/abs/2204.03802>.
- [II-45] A. Boyer, "Canaux de transmission bruités", Support de cours énoncé de travaux dirigés, institut national des sciences appliquées, Toulouse, 2011.

## Références

- [II-46] AISSAOUI Abderraouf et ABDELLI Ahmed, « Les communications satellitaires : principe de fonctionnement et analyses des performances », Mémoire de fin d'étude, 2018/2019.
- [II-47] D. Roddy, "Satellite communications", McGraw-Hill Prof Med/Tech, New York, 2006.
- [II-48] H. Boutayeb, "Eléments De Base Des Communications Par Satellite" , École Polytechnique, Montreal, 2006.
- [II-49] J. M. Kamatiki, "Influence de la PIRE sur la transmission par satellite géostationnaire", mémoire d'Ingénieur technicien en Radio transmission ISTA Goma, Congo, 2014.
- [II-50] M. Meriah, « Liaison hertzienne », Université de Tlemcen, 2016-2017.
- [II-51] ZEGGAI Sara et ZOUAG Bilal Mohamed, « Étude d'une liaison radio avec relais et calcul du bilan de liaison », Université de tlemcen, juin 2016-2017.
- [II-52] DJIAR OUSSAMA ELAMINE et SALIM DJEZZAR - ZOUGHBI ALA, « Optimisation de la bande passante d'une transmission par satellite en utilisant la technologie Carrier-In-Carrier », Université BLIDA 1, Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme de Master en Aéronautique, 2018 /2019.
- [II-53] Dr. ramoun Mata calvo, « optical communications for satellites-link budget », July 2022.
- [III-1] Space Exploration Technologies. SpaceX non-geostationary satellite system attachment A: technical information to supplement schedule S. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20190830-00087/1877671.pdf>, achieved on Aug. 16 2020.
- [III-2] Reid, T. G. R., A. M. Neish, T. Walter, and P. K. Enge. 2018. "Broadband LEO Constellations for Navigation." *Navigation, Journal of the Institute of Navigation* 65 (2):205–220. doi:10.1002/navi.234.
- [III-3] Space Exploration Technologies. SpaceX non-geostationary satellite system attachment A: technical information to supplement schedule S. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083/1569860.pdf>, achieved on Aug. 16 2020.
- [III-4] Montenbruck, O., and E. Gill. 2000. "Around the World in a Hundred Minutes." In *Satellite Orbits Models, Methods*,
- [III-5] LOW ORBIT (LEO) SATELLITE MARKET-SAMPLE.
- [III-6] Chaabane Chaouche Hicham, « Calcule exact du SNR et BER pour les systèmes SAC-OCDMA ». Mémoire de fin d'études master. Université Dr Tahar Moulay - SAIDA.
- [III-7] DJEHICHE Hanane, TABET Yasmine, « Etude et simulation d'un réseau optique de transmission DWDM d'un réseau dorsal », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en Electronique option traitement de l'information et systèmes électroniques, université de BLIDA 1, 2015, p23
- [III-8] Benzerdjeb Choukri, Selka soufyane, « Encodage de l'amplitude spectrale pour OCDMA », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2013, p4, p17, p27.
- [III-9] KAHLOUCHE Ahmed, « Initiation à l'utilisation du logiciel OptiSystem », Travaux pratique de master en Electronique option STLC, Université de Mohamed Boudiaf de M'sila, 2019.
- [III-10] TP N°1, « Initiation à l'utilisation du logiciel « OptiSystem » », Université de Mohamed Boudiaf – M'sila Faculté de Technologie Département d'Electronique, Option : M2 – STLC, Année Universitaire 2021/2022.
- [III-11] Mohammed Amine MOKRETAR, Nabil NOURA, « Étude et Conception d'un Système de Transmission Optique en utilisant la Technologie WDM 4 x 20 Gbit/s », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, université de HASSIBA BENBOUALI de chlef, 2019, p7.
- [III-12] BILLAMI Hanane, BENDAHMANE Raouida, « Etude d'un réseau optique ADM 10 Gbit/s », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2013, p8, p9.

## ***Références***

[III-13] O. Bands, B. Laurent, and G. Draka, “From O to L: The Future of optical wavelength-bands”. <http://www.broadbandproperties.com>, June 2008, pp. 83–85.

[III-14] <https://www.vcalc.com/wiki/slant-range>.

[III-15] [https://www.google.com/search?q=plateau+lalla+setti+photos&client=firefox-b-d&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiS38eTo5P\\_AhXcxwIHHVr\\_BdoQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=671&bih=632&dpr=1](https://www.google.com/search?q=plateau+lalla+setti+photos&client=firefox-b-d&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiS38eTo5P_AhXcxwIHHVr_BdoQ_AUoAXoECAEQAw&biw=671&bih=632&dpr=1).



## Résumé

### \*\*\*Résumé\*\*\*

Récemment, des recherches actives ont été menées sur les systèmes de petits satellites utilisant des liaisons laser intersatellites dans plusieurs organismes de recherche. Pour tels systèmes, les liaisons laser semblent intéressantes, en raison de leur petite taille et de leurs composants légers, en plus de l'absence d'interférences mutuelles de communication. Lors de la conception d'un système de contrôle de faisceau optique. Les paramètres de poursuite dans le système de poursuite/pointage équipé sur d'autres satellites terrestres bas (LEO) qui poursuivent d'autres LEO ou un satellite géostationnaire (GEO). La structure de conception d'un dispositif laser simplifiée pour le suivi de satellites géostationnaires à partir d'orbites terrestres basses est discuté Une nouvelle méthode est proposée, elle est simulée par OptiSystem.

\*\*\*Mots-clés\*\*\* : Satellite, Optique, Intercommunication, Laser semiconducteur, OptiSystem.

---

### \*\*\*Abstract\*\*\*

Recently, several research organizations have been actively investigating small satellite systems using inter-satellite laser links. For such systems, laser links seem attractive, due to their small size and lightweight components, plus the absence of mutual communication interference. When designing an optical beam control system. Tracking parameters in the tracking/pointing system equipped on other low earth satellites (LEO) that track other LEO or a geostationary satellite (GEO). The design structure of a simplified laser device for tracking geostationary satellites from low-Earth orbits is discussed A new method is proposed, simulated by OptiSystem.

\*\*\*Keywords\*\*\*: Satellite, Optical, Intercommunication, Semiconductor laser, OptiSystem.

---

### \*\*\*تلخيص\*\*\*

في الأونة الأخيرة، تم إجراء بحث نشط على أنظمة الأقمار الصناعية الصغيرة باستخدام وصلات الليزر بين الأقمار الصناعية في العديد من المنظمات البحثية. بالنسبة لمثل هذه الأنظمة، تبدو روابط الليزر مثيرة للاهتمام، نظرًا لصغر حجمها ومكوناتها الضوئية، بالإضافة إلى عدم وجود تداخل في الاتصال المتبادل. عند تصميم نظام التحكم في الحزمة الضوئية. معلمات التتبع في نظام التتبع / التوجيه المجهز على أقمار صناعية أخرى في مدار منخفض (LEO) تتعقب المدارات الأرضية المنخفضة الأخرى أو قمر صناعي ثابت بالنسبة للأرض (GEO). تمت مناقشة هيكل تصميم جهاز ليزر مبسط لتتبع الأقمار الصناعية المستقرة بالنسبة إلى الأرض من المدارات الأرضية المنخفضة. تم اقتراح طريقة جديدة، يتم محاكاتها بواسطة OptiSystem. \*\*\*الكلمات المفتاحية\*\*\*: القمر الصناعي، البصري، التواصل، ليزر أشباه الموصلات، البصريات OptiSystem