

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعلّم والعالي 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 : Télécommunications Optiques

Par:

- CHOUGRANI Oussama - KEBLI Ilyes

Sujet

Intercommunication Optique entre Satellites LEO et GEO

Soutenu publiquement, le /06/2025 , devant le jury composé de :

M. BAHRI Sidi Mohammed	MCA	Université de Tlemcen	Président
M. KARIM Fath Allah	Pr	Université de Tlemcen	Examineur
M. IRID Sidi Mohammed Hadj	Pr	Université de Tlemcen	Encadrant
M. KOURDI Zakarya	MRA	CDS Oran	Co-Encadrant

Année universitaire : 2024/2025

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**, Professeur 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 m'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 **M. BAHRI Sidi Mohammed**, Maître de conférences classe A 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**, Professeur 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.

DÉDICACES

*** DEDICACES ***



Dédicace

A mes chers parents

A ma chère femme et mon fils Rayan

*Pour l'amour que m'ont toujours donnés, ses encouragements et toute l'aide que m'ont apportés
durant mes études.*

*A mes
Frères et mes Sœurs*

*A mes amis
A
toute ma famille
A mon binôme
A tous les gens
qui m'aiment.*

OuSsama



Dédicace

À mes chers parents

Pour la confiance et l'amour qu'ils m'ont toujours donnés, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée pendant mes études. Je souhaite à Dieu de vous accorder une bonne santé et une longue vie, en espérant que vous serez toujours fier de moi. Et sans oublier ma grand-mère - الله يرحمها - qui m'a aidé et soutenu avec tout ce qu'elle avait يدخلها الفردوس الأعلى من الجنة الله يرحمها و يغفر لها

À tous ceux qui m'ont enseigné

et ont pris soin de mon éducation et de mes conseils

À mes frères et sœurs qui ont partagé avec moi tous les moments de passion lors de la réalisation de ce travail.

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

À mon ami Qui m'a aidé à faire ce travail et m'a guidé grâce à son expérience

À mes professeurs qui nous ont aidés à arriver à ce moment

À toute ma famille

Et à tous ceux qui m'aiment.

******ILYES******

Abréviations

*** ABREVIATIONS***

AI : Intelligence Artificielle
APD : Photodétecteur à Avalanche
BER : Bit Error Rate (Taux d'Erreur Binaire)
BP : Bande Passante
C : Célérité de la lumière dans le vide ($c = 3 \times 10^8$ m/s)
CCD : Charge-Coupled Device
DEL : Diode Électroluminescente
E/O : Électrique/Optique
FEC : Forward Error Correction
FSO : Free Space Optical Communication (Communication Optique en Espace Libre)
GEO : Satellites Géostationnaires
IM : Intensity Modulation (Modulation d'Intensité)
IMZ : Mach-Zehnder (Modulateur Mach-Zehnder)
ISL : Inter-Satellite Links (Liens Inter-Satellites)
LEO : Low Earth Orbit (Satellites en Orbite Basse)
MEA : Modulateur Électro-Absorbant
MEO : Medium Earth Orbit (Satellites en Orbite Moyenne)
MEMS : Micro-Electro-Mechanical Systems (Systèmes Micro-Électro-Mécaniques)
PAT : Pointing, Acquisition, and Tracking (Pointage, Acquisition et Suivi)
RCST : Return Channel Satellite Terminal
RF : Radio Frequency (Radiofréquence)
TTC&M : Telemetry, Tracking, and Command Control & Maintenance
VSAT : Very Small Aperture Terminal
WOC : Wireless Optical Communications (Communications Optiques Sans Fil)
AEL : atténuation entre liaison

***** SOMMAIRE *****

*** REMERCIEMENTS ***	I
*** DEDICACES ***	II
*** ABREVIATIONS***	IV
*** SOMMAIRE ***	V
LISTE DES FIGURES	X
LISTES DES TABLEAUX	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: INTRODUCTION A LA COMMUNICATION PAR SATELLITE	3
I.1 Introduction.....	3
I.2. Définition du satellite de télécommunications.....	3
1.2.1 Quelques définitions de base des systèmes de communications par satellite.....	3
I.2.1.1. Segments de communications par satellite	3
I.2.1.1.a. Le segment spatial.....	4
I.2.1.1.b. Le segment terrien.....	4
I.3. Constitution d'un satellite de télécommunications.....	4
I.3.1. La plate-forme	4
I.3.3. Le contrôle d'altitude et d'orbite et les équipements de propulsion	4
I.3.4. Le système de commande	5
I.3.5. Les équipements de poursuite, de télémessure et de télécommande TT&C	5
I.4. La charge utile d'un satellite	5
I.5. Bandes de fréquences	5
I.6. Les orbites des satellites	6
I.6.1. Les lois de Kepler	6
I.6.2. Types d'orbites	7
I.6.2.a Orbites circulaires terrestres basses (LEO).....	8
I.6.2.b Les orbites circulaires terrestres moyennes (MEO).....	8
I.6.2.c Orbites circulaires à inclinaison nulle (orbites équatoriales)	8
I.6.3. Perturbations orbitales :.....	8
I.6.3.a Perturbations du troisième corps.....	9
I.6.3.b Perturbations dues à une Terre non sphérique	9

Sommaire

I.6.3.c Perturbations dues à la traînée atmosphérique	9
I.6.3.d Perturbations dues au rayonnement solaire.....	9
I.7. Les constellations de satellites	9
I.7.1. Les facteurs à définir au cours de conception de la constellation	10
I.7.1.a Facteurs principaux de conception.....	10
I.7.1.b. Facteurs secondaires de conception	10
I.7.2. Méthodes de conception optimales de constellation par satellite.....	10
I.7.2.a. Méthode Streets of Coverage (SOC).....	10
I.7.2.b. La méthode de Walker	11
I.7.3. Évaluation et atténuation des risques de collision et de débris	11
I.8. Liens inter-satellites	12
I.8.1. Avantages de la communication FSO par rapport à la communication RF.....	12
I.8.1.a Bande passante élevée	12
I.8.1.b Moins de puissance et de masse requise	13
I.8.1.c. Haute directivité	13
I.8.1.d. Spectre sans licence	13
I.8.1.e. Haute sécurité.....	13
I.8.2. Les avantages d'une liaison inter-satellites.....	13
I.9 Conclusion	14
CHAPITRE II : Conception d'un Système de Communication.....	16
II .1 Introduction.....	16
II .1.1 Contexte et motivation.....	16
II .1.2 Objectifs du chapitre	16
II .2 Principes de la Communication Optique.....	17
II .2.1 Définition de la communication optique.....	17
II .2.2 Avantages par rapport aux systèmes traditionnels.....	17
II.2.2.a Débits de données élevés	18
II.2.2.b Faible latence	18
II.2.2.c. Sécurité et confidentialité	18
II .2.3. Inconvénients et limitations	18
II.2.3.a. Performance liée aux conditions climatologiques	18
II.2.3.b Coût des infrastructures	18
II .2.4 Composants d'un Système de Communication Optique	19

Sommaire

II.2.4.1 Émetteur (types de lasers, schémas d'émission).....	20
II.2.4.1.a Les diodes électroluminescentes (LED)	21
II.2.4.1.b Les diodes laser.....	21
II.2.4.1.c.La modulation d'intensité (IM : Intensity Modulation)	21
II.2.4.1.d. La modulation externe	21
II.2.4.2 Canal de propagation	22
II.2.4.3 Récepteur (photodétecteurs, méthodes de détection)	22
II.2.4.4 Système d'Optique (lentilles, miroirs, éléments de focalisation)	23
II.2.4.5 Système de Tracking (techniques de suivi, considérations de design)	23
II .3 Caractéristiques des Satellites LEO et GEO	24
II .3.1 Satellites en Orbite Basse (LEO).....	24
II.3.1.a. Altitude et Environnement des Satellites LEO	25
II.3.1.b Latence de Communication	25
II.3.1.c.Modèle de Constellation	26
II .3.2 Satellites en Orbite Géostationnaire (GEO).....	26
II.3.2.a Caractéristiques Orbitales	27
II.3.2.b Avantages et Inconvénients :	27
II .4. Considérations de Conception pour un Système LEO/GEO	28
II .4.1. Alignement et Suivi du Faisceau	28
II.4.1.1 Méthodes d'Alignement	29
II.4.1.2. Technologies Émergentes	30
II.4.1.2.a Optiques Adaptatives :	30
II.4.1.2.b Suivi Basé sur l'Intelligence Artificielle (IA) :	30
II.4.1.2.c Systèmes Micro-Électro-Mécaniques (MEMS) :	31
II .4.2 Conditions Atmosphériques	31
II.4.2.1.Effets des Intempéries sur la Communication	32
II.4.2.1.a Atténuation du Signal :	32
II.4.2.1.b Distorsion du Faisceau :	32
II.4.2.1.c Solutions Possibles.....	33
II .4.3 Débit de Données et Modulation	33
II.4.3.1. Techniques de Modulation	33
II.4.3.a. Modulation d'Intensité avec Détection Directe (IM/DD) :	33
II.4.3.1.b. Le Modulateur par Électro-Absorption	34
II.4.3.1.c. Le modulateur de phase	34

Sommaire

II .5. Applications et cas d'utilisation	34
II .5.1 Communication entre satellites	34
II .5.2 Applications militaires et de sécurité	35
II .5.3 Services de connectivité à large bande	35
II .6 Conclusion	36
CHAPITRE III : Modélisation par OptiSystem et Transmission Optique Sans Fil (OWC)	38
III .1 Introduction.....	38
III .1.1 Objectifs du chapitre	38
III .1.2 Rôle stratégique de la simulation dans les systèmes OWC.....	38
III .2 OptiSystem : Présentation générale.....	39
III .2.1 Historique et évolution.....	39
III .2.2 Caractéristiques principales	40
III.2.2.a Interface graphique	40
III.2.2.b. Bibliothèque :	40
III.3.2.c. Navigateur du Projet:.....	41
III.3.2.d. Editeur du couche (Layout):.....	41
III.3.2.e. Projet en cours (description du layout).....	42
III.3.2.f. Lancer une simulation	42
III .4. Paramètres clés à évaluer dans une simulation OWC	43
III .4.1. Taux d'erreur binaire (BER):	43
III .4.2. Facteur de qualité du signal (Q)	43
III .4.3. Diagramme de l'oeil.....	43
III .4.4 Utilisation de la fonction d'analyse d'OptiSystem.....	44
III.4.4.a Outils d'analyse et de rapport	44
III.4.4.b Interprétation des résultats.....	44
III .5 Études de Cas	45
III .5.1 Calcul le bilan du liaison	45
III.5.1.a. Rapport signal sur bruit (C/N_0).....	45
III.5.1.b. Rapport énergie par bit sur bruit (E_x/N_0)	45
III.5.1.c. Affaiblissement de propagation (AP)	45
III.5.1.d. Affaiblissement d'espace libre (AEL).....	46
III.5.1.e. Gain d'une antenne	46
III.5.1.f. Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE).....	46

Sommaire

III.5.1.g. Antenne isotrope.....	47
III.5.1.h. Facteur de mérite G/T.....	47
III.5.1.i. Capacité du canal (Shannon-Hartley).....	47
III.5.1.j. Température de bruit	47
III.5.1.k. Efficacité spectrale	48
III.5.1.l. Bilan de liaison pour la voie montante.....	48
III.5.1.m. Bilan de liaison global.....	48
III.5.1.n. Puissance reçue (Équation de Friis)	49
III.5.2. Calcul de bilan de liaison	49
III.5.2.1. Scénario et configuration:.....	52
III.5.2.2 Résultats et interprétation :.....	52
III.5.2.2.a. Pour une Intercommunication satellitaire LEO-GEO pour une distance de 35400 km.....	52
III.5.2.2.b. Pour Intercommunication satellitaire LEO-GEO pour une distance de 35600 km	55
III.5.2.2.c Intercommunication satellitaire LEO-GEO pour une distance de 35800 km.....	58
III.5.2.2.d. Intercommunication satellitaire LEO-GEO pour une distance de 36000 km.....	59
III.5.2.2.e. Résultats de l'analyse:	61
III.5.2.2.f. Comparaison avec autre simulation	62
III.6. Conclusion	67
CONCLUSION GENERALE	69
REFERENCES.....	A
Résumé	E
Abstract	E
تلخيص	E

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I.1 :la transmission et la gestion des signaux dans l'espace[1].	4
Figure I.2 :Structure d'un satellite. [21]	5
Figure I.3 : Première loi de Kepler [1].	7
Figure I.4 : Deuxième loi de Kepler [1].	7
Figure I.5 : Orbite terrestre polaire circulaire basse (LEO) [3].	8
Figure I.6 : Variations séculaires et périodiques d'un élément orbital [3].	9
Figure I.7 : La «rue de couverture» est une bande centrée sur la voie au sol pour laquelle il existe une couverture continue [3].	10
Figure I.8 : Couverture dans les plans adjacents [3].	10
Figure I.9 : Modèle de constellation "Streets of Coverage" Vue du pôle nord [3].	11
Figure I.10 : La méthode de Walker	11
Figure I.11 : Angle d'élévation tel que déterminé par un ISL [4].	11
Figure I.12 :Recherche de la distance d entre deux satellites GEO [4]	12
Figure I.13 : Comparaison de la divergence des faisceaux optiques et RF de mars vers la terre [31].	13

Chapitre II :

Figure II.1 : Liaisons optiques sans fil[56]	17
Figure II.2 : Système de communication optique FSO/OWC [16]	20
Figure II.3 : Schéma synoptique du bloc émetteur FSO/OWC.	20
Figure II.4 : Principe de base d'une modulation directe[64].	21
Figure II.5 : Principe de base d'une modulation externe[64].	22
Figure II.6 : Les phénomènes qui affectent le faisceau optique[17]	22
Figure II.7 : Schéma bloc du récepteur optique	23
Figure II.8 : Système de Tracking en communication optique spatiale[65]	24
Figure II.9 : Satellite en Orbite Basse (LEO)[66]	24
Figure II.10 : Satellite en Orbite Géostationnaire (GEO)[67]	27
Figure II.11 : La démonstration de communications laser lunaires (LLCD) [68].	30
Figure II.12 : : température moyenne de l'atmosphère en fonction de l'altitude[69].	31
Figure II.13 : Spectre d'atténuation atmosphérique [69].	32
Figure II.14 : Schéma de principe d'une modulation directe (a) avec une diode VCSEL (b)[31]	34
Figure II.15 : Communication entre satellites[68].	35

Liste des figures

Chapitre III :

Figure III.1 : OptiSystem simulateur [49]	39
Figure III.2 : L'interface de travail sur OptiSystem	40
Figure III.3 Bibliothèque des composants	41
Figure III.4 : Navigateur du Projet.....	41
Figure III.5: Fenêtre de présentation du projet en cours.....	42
Figure III.6 : Fenêtre de description du projet en cours.....	42
Figure III.7: Fenêtre montre le lancement de la simulation.....	42
Figure III.8 : Exemple d'un diagramme de l'oeil [51]	44
Figure III.9 : Schéma de la structure proposé pour intercommunication satellitaire LEO GEO.....	51
Figure III.10 : Puissance optique transmise pour une portée de liaison de 35400km	52
Figure III.11: Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 35400 km.....	53
Figure III.12 : La qualité de facteur Q avec un diagramme l'oeil dans une distance de 35400 km.....	54
Figure III.13 : Puissance optique reçu pour une portée de liaison de 35600km.....	55
Figure III.14: La qualité de facteur Q avec un diagramme l'oeil dans une distance de 35600 km	56
Figure III.15: Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 35800 km	57
Figure III.16 : La qualité de facteur Q avec un diagramme l'oeil dans une distance de 35800 km.....	58
Figure III.17: Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 35600 km.....	59
Figure III.18 : La qualité de facteur Q dans une distance de 36000 km.....	60
Figure III.19 : Gain en fonction de la distance.....	62
Figure III.20 : Facteur Q en fonction de la distance	62
Figure III.21: BER minimal en fonction de la distance	63
Figure III.22: Puissance reçue maximale en fonction de la distance.....	63
Figure III.23 : Gain en fonction du débit	64
Figure III.24 : Facteur Q en fonction du débit	65
Figure III.25 : BER minimal en fonction du débit	65
Figure III.26 : Puissance reçue maximale en fonction du débit	71

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Bandes de fréquences utilisées pour les communications par satellite	6
Tableau 2 : Comparaison entre les communications Radiofréquence (RF) et Optiques (FSO/Laser).....	19
Tableau 3 : les avantages et les inconvénient du satellite GEO[28]	28
Tableau 4 : Les paramètres du bilan de liaison	50
Tableau 5 : Les résultats finaux du bilan de liaison.....	50
Tableau 6: les paramètres de simulation pour une liaison à 1538 nm en utilisant modulation NRZ.....	52
Tableau 7 : Les résultats finaux de l'analyse.....	60

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Avec l'expansion rapide des besoins en débit de données dans les télécommunications spatiales, 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,

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 systèmes de communication optique en espace libre (FSO) émergent comme une alternative prometteuse aux liaisons radiofréquences traditionnelles. Offrant des débits élevés, une faible latence, une haute directivité et une sécurité accrue, ces systèmes répondent aux exigences croissantes des constellations de satellites modernes, telles que Starlink ou OneWeb, tout en surmontant les limitations des infrastructures RF en termes de bande passante et de consommation énergétique.

Ce travail explore les principes fondamentaux des communications par satellite, en détaillant les composants essentiels, les types d'orbites, les perturbations orbitales et les méthodes de conception des constellations. Il met particulièrement l'accent sur la communication optique inter-satellites, en analysant les avantages et les défis de la technologie FSO, les composants clés (émetteurs, récepteurs, systèmes de pointage), ainsi que les impacts environnementaux et atmosphériques. Une simulation réalisée à l'aide du logiciel OptiSystem permet d'évaluer les performances d'une liaison optique LEO-GEO sur une distance de 36 000 km, en tenant compte des paramètres critiques tels que le taux d'erreur binaire (BER), le facteur de qualité (Q) et la puissance reçue. Ce mémoire vise à fournir une analyse approfondie et pratique des systèmes de communication optique spatiale, tout en soulignant leur potentiel pour les applications commerciales, militaires et de connectivité à large bande.

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres:

Le premier chapitre présente les bases des systèmes de communication par satellite, incluant les segments spatiaux et terrestres, les types d'orbites (LEO, MEO, GEO), les lois de Kepler, ainsi que les perturbations orbitales affectant les trajectoires des satellites.

Le deuxième chapitre détaille les principes des communications optiques en espace libre, les composants essentiels (émetteurs, récepteurs, systèmes de pointage), les techniques de modulation (NRZ, DPSK, PPM), et compare les avantages et limitations des systèmes FSO par rapport aux systèmes RF.

Le troisième chapitre décrit la simulation d'une liaison optique LEO-GEO à l'aide d'OptiSystem, en analysant les résultats pour différentes distances. Les paramètres tels que le BER, le facteur Q, et la puissance reçue sont évalués, et les performances du système sont discutées

Chapitre I :
INTRODUCTION A LA
COMMUNICATION PAR
SATELLITE

CHAPITRE I: INTRODUCTION A LA COMMUNICATION PAR SATELLITE

I.1 Introduction

Les satellites occupent une place centrale dans les systèmes de communication modernes, comme en témoignent les nombreuses antennes paraboliques installées sur les toits pour capter des signaux télévisés. Bruits dans un lien de communication par satellite

Moins visibles mais tout aussi cruciaux, ils jouent un rôle clé dans les télécommunications mondiales en transportant d'importants volumes de données numériques et de trafic téléphonique, en complément des services de télévision.

Ce chapitre introductif vise à poser les bases de la communication par satellite. Il explore la nature des satellites, leurs composants essentiels, les types d'orbites qu'ils empruntent, ainsi que les méthodes permettant d'organiser des groupes de satellites en constellations pour optimiser la couverture terrestre. Enfin, il aborde les stratégies d'optimisation visant à réduire les coûts et à améliorer les liaisons entre satellites, avant de conclure avec une réflexion sur les tendances actuelles du domaine.

Ces dispositifs spatiaux offrent des avantages uniques par rapport aux infrastructures terrestres. Leur position en orbite leur permet de couvrir de vastes zones géographiques, facilitant ainsi la connexion simultanée de multiples utilisateurs éloignés les uns des autres. Cette capacité est particulièrement précieuse pour relier des régions isolées ou difficiles d'accès, où les moyens de communication traditionnels sont limités. De plus, les signaux satellites transcendent les frontières, qu'elles soient géographiques ou politiques, ce qui peut être perçu comme un atout ou une contrainte selon les contextes.

I.2. Définition du satellite de télécommunications

Un satellite de télécommunications est un objet artificiel en orbite autour de la Terre, conçu pour réceptionner un signal émis depuis une station terrestre, l'amplifier, le traiter si nécessaire, puis le renvoyer vers une ou plusieurs stations réceptrices au sol. Il agit comme un relais actif, comparable aux tours hertziennes terrestres, sans être la source ni la destination finale des données qu'il transmet. [1]

1.2.1 Quelques définitions de base des systèmes de communications par satellite

Cette section présente les concepts fondamentaux et les termes clés des systèmes de communication par satellite, qui serviront de base pour analyser leur conception et leurs performances tout au long de la thèse. Ces définitions clarifient les éléments essentiels du domaine et facilitent la compréhension des sections suivantes.

I.2.1.1. Segments de communications par satellite

Les systèmes de communication par satellite se divisent en deux grands domaines : le segment spatial et le segment terrestre. Le premier englobe les satellites en orbite et les infrastructures qui les soutiennent, tandis que le second regroupe les équipements au sol qui émettent et reçoivent les signaux.

I.2.1.1.a. Le segment spatial

Le segment spatial inclut les satellites en orbite et la station terrestre dédiée à leur gestion, formant le cœur opérationnel du système de télécommunications par satellite. Ces éléments, illustrés dans la figure 1, assurent la transmission et la gestion des signaux dans l'espace.

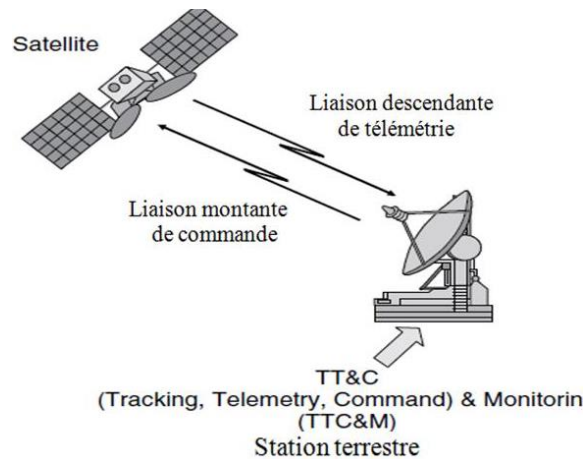


Figure I.1:la transmission et la gestion des signaux dans l'espace[1].

I.2.1.1.b. Le segment terrien

Le segment terrien regroupe les installations au sol, telles que les stations de transmission et de réception, qui interagissent avec les satellites pour assurer les communications. Ces infrastructures émettent les signaux vers l'espace (liaison montante) et captent ceux renvoyés par les satellites (liaison descendante), jouant un rôle clé dans la connectivité globale. [1, 22].

I.3. Constitution d'un satellite de télécommunications

Un satellite de télécommunications se compose de deux parties principales : la plate-forme, qui assure les fonctions vitales comme l'alimentation et la propulsion, et la charge utile, dédiée à la réception, au traitement et à la retransmission des signaux. Ensemble, ces éléments permettent au satellite de remplir sa mission de relais spatial.

I.3.1. La plate-forme

La plate-forme constitue le socle technique du satellite, regroupant les systèmes indispensables à son fonctionnement, tels que l'alimentation électrique, le contrôle d'orbite et les équipements de communication avec la Terre. Elle garantit la stabilité et la survie du satellite en orbite

I.3.2. L'alimentation électrique

L'alimentation électrique, souvent fournie par des panneaux solaires et des batteries, fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement des systèmes du satellite, tant pour la plate-forme que pour la charge utile, en assurant une autonomie énergétique en orbite.

I.3.3. Le contrôle d'altitude et d'orbite et les équipements de propulsion

Les équipements de propulsion et de contrôle d'altitude et d'orbite maintiennent le satellite sur sa trajectoire prévue, compensant les dérives dues aux perturbations externes et ajustant sa position pour une

couverture optimale.

I.3.4. Le système de commande

Le système de commande gère les opérations internes du satellite, coordonnant les différentes fonctions pour maintenir son orientation, ajuster sa trajectoire et répondre aux instructions venues du sol, assurant ainsi une mission fluide.

I.3.5. Les équipements de poursuite, de télémétrie et de télécommande TT&C

Les systèmes TT&C (Telemetry, Tracking, and Command) permettent de suivre la position du satellite, de recueillir des données sur son état (télémétrie) et de lui envoyer des ordres depuis la Terre (télécommande), assurant un contrôle constant [21].

I.4. La charge utile d'un satellite

La charge utile est l'ensemble des équipements dédiés à la mission de communication, comme les antennes et les transpondeurs, qui réceptionnent, amplifient et retransmettent les signaux, constituant le cœur fonctionnel du satellite [21]. Comme le montre la figure I.2, la structure d'un satellite comprend plusieurs sous-systèmes.

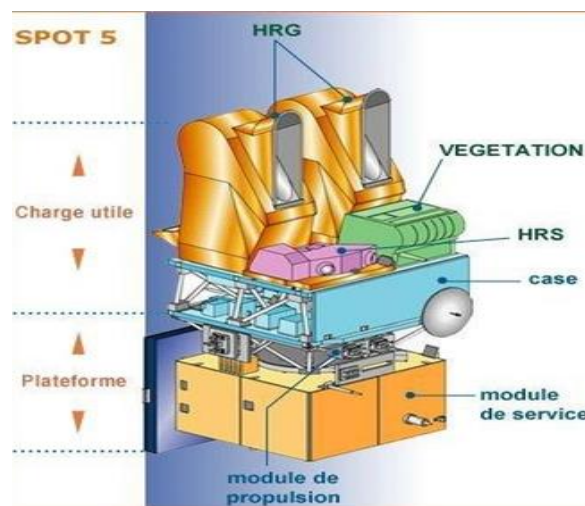


Figure I.2 : Structure d'un satellite. [21]

I.5. Bandes de fréquences

Les communications par satellite exploitent différentes bandes de fréquences, telles que les bandes C, Ku ou Ka, choisies selon les besoins en bande passante, la résistance aux interférences et les conditions atmosphériques, influençant directement les performances du système [21]. Le tableau 1 présente les bandes de fréquences utilisées pour les communications par satellite..

CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA COMMUNICATION PAR SATELLITE

Dénomination actuelle	Chemin ascendant (bande passante)	Chemin descendant (bande passante)	Utilisation typique
6/4 (C-Band)	5.725-6.275 (550 MHz)	3.4-3.95 (550 MHz)	Satellite national [Russie : Stasionar et Express International (Interspoutnik)]
	5.850-6.425 (575 MHz)	3.625-4.2 (575 MHz)	Les satellites internationaux et nationaux. Satellites nationaux: Westar, Satcom et Comstar (États-Unis), Anik (Canada), Stw et Chinasat (Chine),
	5.850-6.425 (575 MHz)	3.625-4.2 (575 MHz)	Satellite national (Plan FSS, RR Appendice S30B)
8/7 (X-Band)	7.925-8.425 (500 MHz)	7.25-7.75 (500 MHz)	Satellite gouvernemental et Militaire
13/11 (Ku-Band)	12.75-13.25 (500 MHz)	10.7-10.95 11.2-11.45 (500 MHz)	Satellite national (Plan FSS, RR Appendice S30B)
13-14/11-12 (Ku-Band)	13.75-14.5 (750 MHz)	10.95-11.2 11.45-11.7 12.5-12.75 (1 000 MHz)	Satellites internationaux et nationaux dans la Région 1. DFS Kopernikus(Allemagne), Hispasat-1 (Espagne)
		10.95-11.2 11.45-11.7 12.5-12.75 (750 MHz)	Satellites internationaux et nationaux dans la Région 2. Intelsat, Anik B et C (Canada), G-Star (États Unis), Hispasat-1 (Espagne)

Tableau 1 : Bandes de fréquences utilisées pour les communications par satellite [21]

I.6. Les orbites des satellites

Dans cette section, vous interprétez vos résultats en relation avec vos hypothèses et questions de recherche. Comparez vos découvertes avec les études précédentes, en discutant des similitudes et différences [1, 21].

I.6.1. Les lois de Kepler

Les planètes suivent des trajectoires elliptiques autour du Soleil, avec ce dernier situé à l'un des foyers de l'ellipse. Ce mouvement se déroule dans un plan défini Les figures I.3 et I.4 présentent respectivement la première et la deuxième loi de Kepler

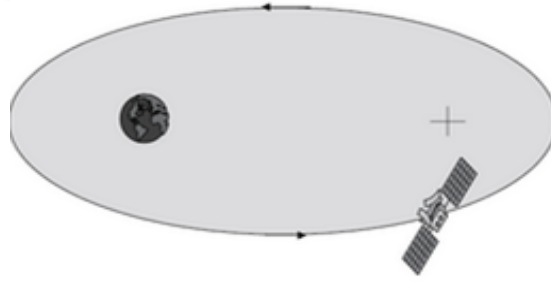


Figure I.3: Première loi de Kepler [1].

La ligne reliant une planète au Soleil balaie des aires égales pendant des intervalles de temps égaux. Cette loi implique que la vitesse orbitale d'une planète varie en fonction de sa distance au Soleil : elle est maximale au périhélie (point le plus proche du Soleil) et minimale à l'aphélie (point le plus éloigné)

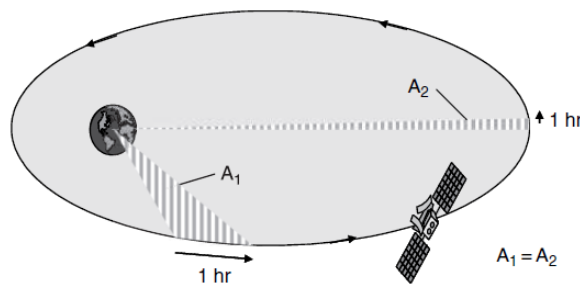


Figure I.4.: Deuxième loi de Kepler [1].

Le carré de la période orbitale (T^2) d'une planète est proportionnel au cube de la longueur du demi-grand axe (a^3) de son orbite. Cette relation est constante pour toutes les planètes du système solaire, permettant de calculer leurs orbites avec précision [1, 3, 4, 21].

I.6.2. Types d'orbites

Les satellites suivent différents types d'orbites (basses, moyennes, géostationnaires, etc.), chacun adapté à des missions spécifiques comme la couverture globale, la faible latence ou la stabilité, selon leur altitude et leur inclinaison [23, 24] La figure I.5 représente une orbite terrestre basse de type polaire..

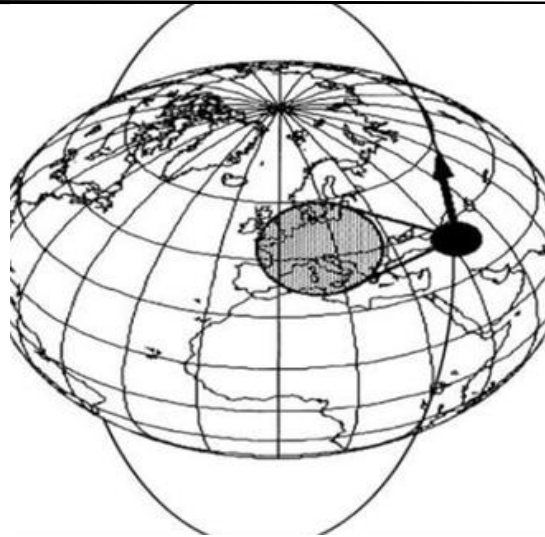


Figure I.5 : Orbite terrestre polaire circulaire basse (LEO) [3].

I.6.2.a Orbites circulaires terrestres basses (LEO)

Les orbites LEO, situées à faible altitude (environ 500-2000 km), offrent une faible latence et une couverture rapide mais limitée, nécessitant souvent des constellations pour une portée globale, idéales pour l'observation ou les communications dynamiques.

I.6.2.b Les orbites circulaires terrestres moyennes (MEO)

Les orbites MEO, à environ 10 000 km avec une inclinaison d'environ 50° et une période de 6 heures, permettent une couverture mondiale continue avec 10 à 15 satellites, comme dans le projet ICO, optimisant les communications en temps réel.

I.6.2.c Orbites circulaires à inclinaison nulle (orbites équatoriales)

Les orbites équatoriales, notamment les géostationnaires à 35 786 km, synchronisées avec la rotation terrestre, fixent le satellite dans le ciel, couvrant 43 % de la Terre en continu, parfaites pour les relais radio constants.

I.6.3. Perturbations orbitales :

L'orbite képlérienne sert de modèle de référence, mais des forces perturbatrices altèrent les paramètres orbitaux des satellites. Ces perturbations se classent en variations séculaires (linéaires, à effet persistant), de courte période (périodiques, avec une période \leq à la période orbitale) et de longue période (période $>$ période orbitale). Les variations séculaires influencent durablement la prédiction de l'orbite, tandis que les variations périodiques sont essentielles pour une détermination précise. Les principales sources de perturbations incluent l'attraction gravitationnelle du Soleil et de la Lune, l'a sphéricité de la Terre, la traînée atmosphérique et la pression radiative solaire. Des approches pour analyser ces perturbations sont proposées par Battin (1999), Danby (1962) et Escobal (1965) [3, 4, 21, 22] La figure I.6 met en évidence les variations séculaires et périodiques des éléments orbitaux..

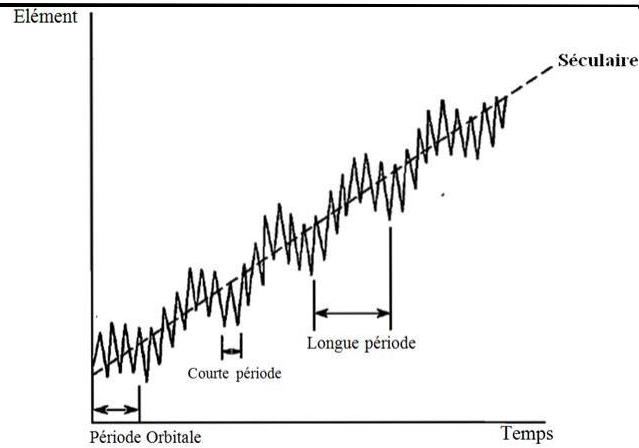


Figure I.6: Variations séculaires et périodiques d'un élément orbital [3]

I.6.3.a Perturbations du troisième corps

La Terre, avec son renflement équatorial et son aplatissement polaire, perturbe les orbites par une distribution gravitationnelle irrégulière, modifiant l'accélération des satellites par rapport au modèle sphérique idéal.

I.6.3.b Perturbations dues à une Terre non sphérique

Les attractions gravitationnelles du Soleil et de la Lune induisent des variations périodiques et séculaires (précession) sur les éléments orbitaux, particulièrement marquées pour les orbites élevées, affectant surtout le nœud ascendant et le périégée.

I.6.3.c Perturbations dues à la traînée atmosphérique

En orbite basse, la traînée atmosphérique freine les satellites, réduisant leur énergie et leur altitude, jusqu'à une rentrée éventuelle, selon une équation reliant densité, vitesse et masse.

I.6.3.d Perturbations dues au rayonnement solaire

La pression du rayonnement solaire provoque des variations périodiques, plus fortes sur les satellites légers à grande surface, dominant au-dessus de 800 km où elle surpasse la traînée atmosphérique.

I.7. Les constellations de satellites

Les constellations réunissent plusieurs satellites travaillant ensemble pour une couverture terrestre étendue, plus fréquente qu'avec un seul satellite. Leur conception optimise la performance (couverture) face au coût (nombre de satellites) parfois via des orbites ajustées : [3, 4, 21, 22].

- Les facteurs à définir au cours de conception de la constellation
- Méthodes de conception optimales de constellation par satellite
- Évaluation et atténuation des risques de collision et de débris

I.7.1. Les facteurs à définir au cours de conception de la constellation

Concevoir une constellation implique des choix clés (nombre de satellites, altitude) et secondaires (inclinaison, excentricité) pour maximiser la couverture tout en minimisant les coûts et les risques, comme les collisions.

I.7.1.a Facteurs principaux de conception

Les facteurs principaux incluent le nombre minimal de satellites, le modèle de constellation, l'altitude optimale, et la disposition des plans orbitaux, visant une couverture efficace tout en réduisant les coûts et les risques de collision.

I.7.1.b. Facteurs secondaires de conception

Les facteurs secondaires, comme l'inclinaison, l'excentricité ou la gestion de fin de vie, ajustent la couverture et les coûts de lancement, influençant la flexibilité et la durabilité de la constellation [3, 25].

I.7.2. Méthodes de conception optimales de constellation par satellite

Ces méthodes visent à minimiser le nombre de satellites pour une couverture continue, utilisant des approches comme « Streets of Coverage » ou Walker pour optimiser la répartition selon l'altitude et les besoins [3, 13, 26, 27]. Les figures I.7 à I.10 présentent les concepts de rues de couverture, plans adjacents et la méthode de Walker.

I.7.2.a. Méthode Streets of Coverage (SOC)

La méthode SOC organise les satellites dans des plans orbitaux pour une couverture continue, ajustant leur espacement selon leur direction de mouvement, formant des « rues » de couverture, souvent pour des constellations polaires

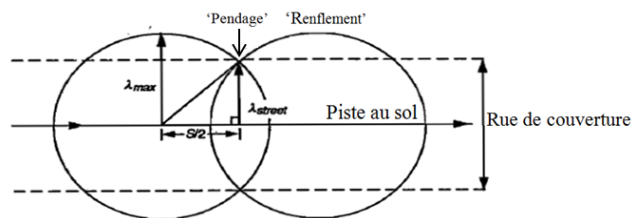


Figure I.7: La «rue de couverture» est une bande centrée sur la voie au sol pour laquelle il existe une couverture continue [3].

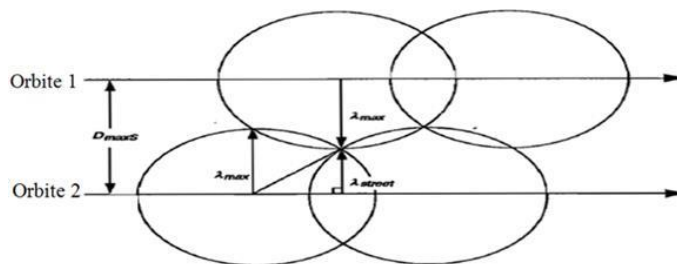


Figure I.8: Couverture dans les plans adjacents [3]

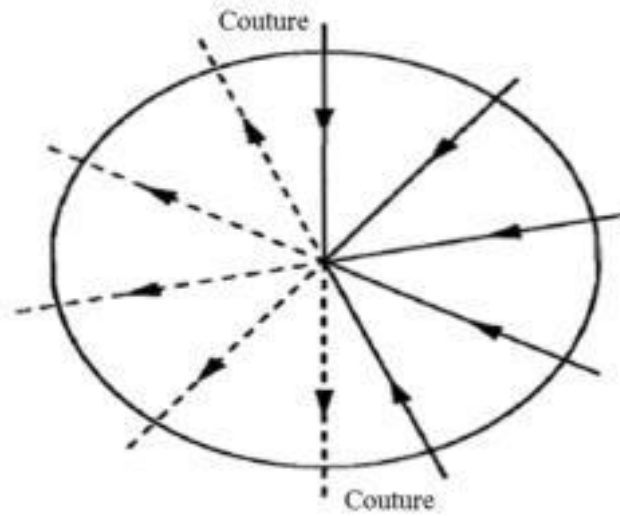


Figure I. 9 : Modèle de constellation "Streets of Coverage" Vue du pôle nord [3].

I.7.2.b. La méthode de Walker

La méthode Walker répartit les satellites en plans orbitaux inclinés avec un phasage précis, garantissant une couverture homogène et globale, particulièrement adaptée aux constellations complexes nécessitant une distribution équilibrée [4, 10, 12, 13].



Figure I.10: La méthode de Walker [63]

I.7.3. Évaluation et atténuation des risques de collision et de débris

Cette section analyse les risques de collisions et de débris spatiaux dans les constellations, proposant

des stratégies pour les réduire, comme des ajustements orbitaux ou des plans de fin de vie, afin de préserver la sécurité spatiale [4,12].

Diverses techniques, comme la surveillance des trajectoires, les manœuvres d'évitement et l'espacement orbital, sont employées pour empêcher les collisions entre satellites, minimisant les risques dans des constellations denses [4,12].

I.8. Liens inter-satellites

Les liens inter-satellites (ISL) permettent une communication directe entre satellites, via radio ou optique, sans dépendre des stations terrestres, améliorant la flexibilité et la couverture des constellations modernes. L'angle d'élévation déterminé par un ISL est représenté dans la figure I.11

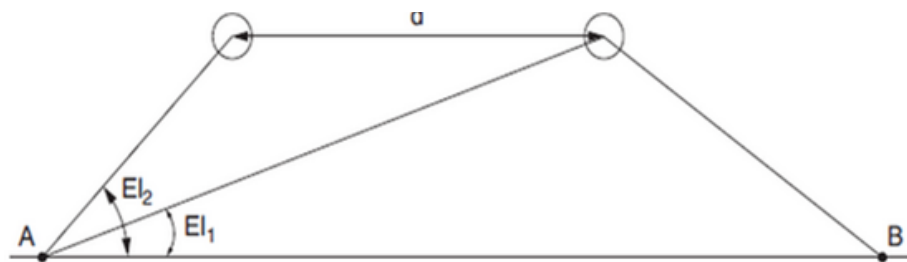


Figure I.11 : Angle d'élévation tel que déterminé par un ISL [4].

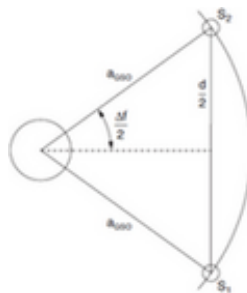


Figure I.12: Recherche de la distance d entre deux satellites GEO [4]

I.8.1. Avantages de la communication FSO par rapport à la communication RF

La communication optique en espace libre (FSO) surpasse la radiofréquence (RF) grâce à une bande passante accrue, une faible consommation, une directivité élevée, un spectre libre et une sécurité renforcée, révolutionnant les liens inter-satellites [4, 31, 32].

I.8.1.a Bande passante élevée

La FSO utilise des fréquences optiques élevées, offrant une bande passante bien plus large que les RF, permettant des transferts de données massifs et rapides entre satellites.

I.8.1.b Moins de puissance et de masse requise

Les systèmes FSO nécessitent moins d'énergie et d'équipements lourds que les RF, réduisant la masse et la consommation des satellites, un avantage clé pour leur conception et leur lancement. La figure I.13 compare la divergence des faisceaux optiques et RF de Mars vers la Terre.

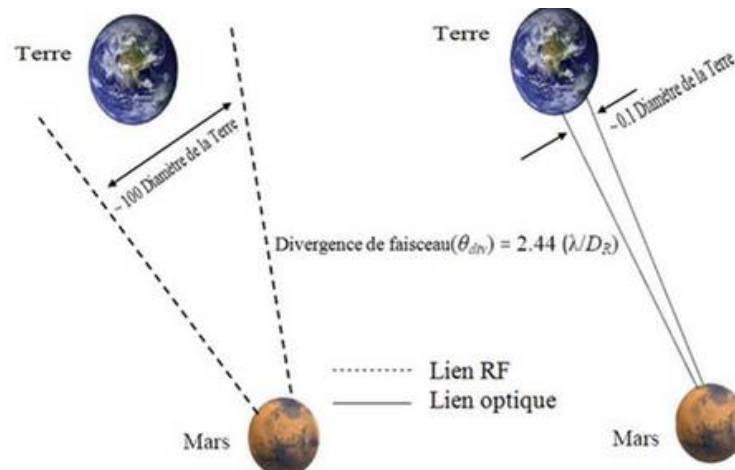


Figure I.13: Comparaison de la divergence des faisceaux optiques et RF de Mars vers la terre [31].

I.8.1.c. Haute directivité

La directivité élevée des faisceaux optiques en FSO permet une transmission précise sur de longues distances, minimisant les pertes et les interférences par rapport aux signaux RF plus diffus[14].

I.8.1.d. Spectre sans licence

Contrairement aux RF, le spectre optique utilisé par la FSO n'exige pas de licences, simplifiant les déploiements et réduisant les contraintes réglementaires pour les constellations. [48]

I.8.1.e. Haute sécurité

La finesse des faisceaux FSO rend leur interception difficile, offrant une sécurité accrue contre l'espionnage ou le brouillage, surpassant les RF plus vulnérables. [33]

I.8.2. Les avantages d'une liaison inter-satellites

Les ISL améliorent la connectivité au sein des constellations, réduisant la dépendance aux stations terrestres, accélérant les communications et augmentant la résilience et la couverture globale du système [7, 31].

I.9 Conclusion

Ce chapitre a posé les bases des systèmes de communication par satellite, détaillant leurs composants, orbites, perturbations et la conception des constellations. Il souligne l'importance des optimisations, comme les ISL et les méthodes SOC ou Walker, pour une couverture efficace et économique.

Chapitre II :
**Conception d'un Système
de Communication**

CHAPITRE II : Conception d'un Système de Communication

II.1 Introduction

La demande de débit dans le secteur des télécommunications spatiales connaît une expansion rapide. Les satellites actuels génèrent et transmettent des volumes de données croissants (comme l'imagerie haute résolution, les données scientifiques et la vidéo), ce qui amène les concepteurs à rechercher des solutions différentes des liaisons radio traditionnelles. Dans ce contexte, la communication optique en espace libre (FSO) entre satellites émerge comme une voie d'avenir, utilisant des lasers (proche infrarouge) pour transporter des données à très grande vitesse et avec un délai de transmission minimal sur les distances spatiales [18]. Le présent Chapitre 2 met l'accent sur la conception d'un système de communication optique laser entre satellites en orbite terrestre basse (LEO) et en orbite géostationnaire (GEO), en détaillant les principes de fonctionnement, les éléments constitutifs et les enjeux associés.

II.1.1 Contexte et motivation

Les liaisons radiofréquences traditionnelles présentent des limitations en termes de bande passante et nécessitent des antennes de grande taille et consommatrices d'énergie pour accroître le débit. Avec la complexification croissante des missions spatiales, les quantités de données à transmettre augmentent à un rythme bien supérieur aux capacités des liaisons RF actuelles. De plus, l'émergence de vastes constellations de satellites en orbite basse (LEO), telles que Starlink et OneWeb, requiert des connexions inter-satellites performantes pour diminuer la dépendance aux stations terrestres et améliorer la couverture globale.

La communication optique par laser en espace libre propose des débits potentiels de plusieurs dizaines de gigabits par seconde, des liaisons plus sécurisées grâce à un faisceau étroit difficile à intercepter, et une latence réduite en raison de la proximité des satellites LEO. Ces atouts stimulent le développement de systèmes optiques spatiaux entre les orbites LEO et GEO, dans le but de relayer rapidement les données collectées vers le sol et entre les satellites eux-mêmes[18,34,58].

II.1.2 Objectifs du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de fournir une analyse détaillée des principes fondamentaux et des composants essentiels d'un système de communication optique spatiale, en mettant en lumière les particularités associées aux satellites évoluant en orbite basse (LEO) et géostationnaire (GEO).

Dans un premier temps, nous définirons la communication optique et examinerons ses avantages et inconvénients en comparaison avec les liaisons radiofréquences traditionnelles. Ensuite, nous décrirons les éléments constitutifs de base indispensables à une liaison optique en espace libre (FSO) spatiale, tels que l'émetteur laser, le récepteur optique, le système optique d'antenne et le mécanisme de pointage. Les caractéristiques distinctives des orbites LEO et GEO (notamment l'altitude, la latence, la couverture et les contraintes orbitales) feront l'objet d'une comparaison. Les aspects cruciaux de la conception – alignement du faisceau, impacts atmosphériques, débit de données et techniques de modulation – seront analysés dans le contexte d'une liaison entre un satellite LEO et un satellite GEO. Pour conclure, nous aborderons les applications typiques de cette technologie, incluant les communications inter-satellites commerciales, les utilisations militaires et sécurisées, ainsi que la fourniture d'une connectivité à large bande (par exemple, l'Internet par satellite). [34]

II.2 Principes de la Communication Optique

La communication optique en espace libre (FSO) emploie des faisceaux de lumière, situés dans le spectre infrarouge ou visible, pour la transmission d'informations sans nécessiter de connexion physique. À la différence de la fibre optique, qui constitue un guide physique, les systèmes FSO propagent la lumière à travers l'air ou le vide spatial, ce qui les rend particulièrement pertinents pour les liaisons entre satellites ou entre un satellite et la Terre. [56]

L'emploi de lasers assure un faisceau hautement directionnel, apte à transporter des données sur des distances considérables, de l'ordre de centaines de milliers de kilomètres, avec une atténuation

de puissance relativement faible dans le vide. La modulation peut être réalisée en encodant la phase, l'amplitude ou la position temporelle des impulsions lumineuses, par exemple via les techniques OOK, PSK, DPSK ou PPM, permettant d'atteindre des débits très élevés, de 10 à 100 Gbps et au-delà. En résumé, la communication optique spatiale se caractérise par une large bande passante, une directivité extrême du faisceau, et une immunité aux interférences électromagnétiques externes. Les figures II.1 à II.3 exposent les architectures des liaisons optiques sans fil et les blocs émetteurs..

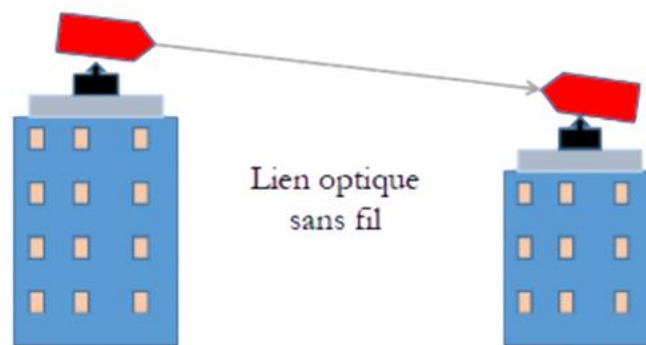


Figure II.1 : Liaisons optiques sans fil [56]

II.2.1 Définition de la communication optique

La communication optique en espace libre, également désignée par l'acronyme FSO ou sous le nom de "Wireless Optical Communications" (W.O.C.), englobe toute liaison de télécommunication qui utilise la propagation de la lumière à travers un milieu transparent tel que l'air ou le vide intersidéral pour connecter deux points éloignés. En pratique, un terminal optique spatial comprend un émetteur laser et un récepteur optique (composés de télescopes et de détecteurs), permettant ainsi l'échange de données entre satellites ou avec une station optique au sol.

Cette technologie est employée depuis plusieurs décennies, comme en témoignent la liaison SatNet [ETS-VI] en 1995 et l'expérience Artemis de l'ESA en 2005. Elle s'appuie généralement sur des longueurs d'onde infrarouges (850 nm, 1064 nm, 1550 nm) afin de minimiser l'atténuation due à l'atmosphère et de faciliter l'intégration avec les équipements de fibre optique. En résumé, les communications optiques spatiales mettent à profit la propagation directe de la lumière laser dans l'espace libre pour établir des liaisons à très haut débit et hautement sécurisées. [34]

II.2.2 Avantages par rapport aux systèmes traditionnels

Les systèmes optiques présentent plusieurs avantages marqués par rapport aux liaisons radiofréquences (RF) conventionnelles [19,20] :

II.2.2.a Débits de données élevés

Grâce à la très grande largeur de bande du domaine optique (fréquences infrarouges), les liaisons laser peuvent transmettre des débits de l'ordre de gigabits par seconde par canal . Par exemple, des modulations avancées (DPSK, PPM) ont démontré plusieurs canaux à 10 Gbps chacun sans erreur. Les terminaux lasers modernes visent des centaines de Gbps dans les relais GEO actuels, permettant de raccorder d'importants ensembles de données scientifiques ou multimédia. [34]

II.2.2.b Faible latence

Les photons se propagent à la vitesse de la lumière dans le vide, et les satellites LEO étant proches de la Terre (quelques centaines de kilomètres), le retard aller-retour reste très faible (quelques dizaines de millisecondes). À titre d'exemple, une liaison LEO terrestre (~500 km de trajet optique) induit une latence inférieure à ~5 ms, ce qui est nettement mieux qu'un GEO (~250 ms). Cette faible latence est essentielle pour les applications temps-réel (contrôle de véhicules, communications voix/vidéo, trading haute fréquence, etc.). [33]

II.2.2.c. Sécurité et confidentialité

Les faisceaux optiques sont extrêmement étroits (divergence microradian) et pointés avec une grande précision, de sorte que la zone couverte est très limitée. Cette directivité réduit drastiquement la probabilité d'interception ou de brouillage du signal. De plus, il est possible de chiffrer les données avant modulation. [33]

II.2.3. Inconvénients et limitations

Pour autant, les liaisons optiques en espace libre présentent des inconvénients significatifs qui compliquent leur déploiement :

II.2.3.a. Performance liée aux conditions climatologiques

à travers l'atmosphère terrestre (dans le cas de liaisons satellites↔sol), le faisceau laser est fortement affecté par la turbulence, l'absorption et la diffusion. En présence de nuages, de pluie, de brouillard ou de poussières, l'atténuation peut atteindre 10–100 dB/km, rendant la liaison impossible sans station-sol supplémentaire. Même dans l'espace proche (orbite basse vers orbite géostationnaire) les passages à travers l'atmosphère (ou l'ozone) imposent des pertes. Ces effets peuvent provoquer des scintillations, des évasions et une instabilité du pointage, augmentant le taux d'erreurs (BER) si aucune compensation n'est effectuée. Les agences prévoient toutefois de contourner ce problème en disposant de multiples stations réceptrices terrestres ou en utilisant des longueurs d'onde moins atténuées (typiquement ~1550 nm).

II.2.3.b Coût des infrastructures

le déploiement de systèmes optiques spatiaux requiert des lasers de haute fiabilité, des télescopes de

Chapitre II : Conception d'un Système de Communication

précision, des détecteurs ultrasensibles et des plate-formes de pointage sophistiquées. Ces composants de pointe sont généralement plus coûteux à développer et à qualifier pour l'espace qu'un simple transpondeur RF. Par exemple, les dispositifs de pointage fin (sur platines piézoélectriques ou miroirs déformables) et les détecteurs à comptage de photons imposent des surcoûts importants. De même, les stations terrestres optiques (télescopes, cryogénie éventuelle) restent plus onéreuses que les antennes paraboliques classiques. Néanmoins, ces coûts décroissent avec l'industrialisation des terminaux lasers et sont partiellement compensés par les économies sur la puissance et la taille de l'équipement embarqué.

Le tableau 2 suivant montre une Comparaison entre les communications Radiofréquence (RF) et Optiques (FSO/Laser) :

Critère	Radiofréquence (RF)	Communication Optique (FSO/Laser)
Bande passante & Débit	Limitée (MHz-GHz), débits modérés (Gbps avec difficulté)	Très élevée (THz potentiel), débits > 100 Gbps
Portée	Longue portée (satellites, interplanétaire)	Moyenne à courte (sauf espace profond)
Atténuation	Faible en espace libre, mais sensible aux interférences	Forte en atmosphère (pluie, brouillard, turbulence)
Sécurité	Vulnérable aux interceptions et brouillage	Sécurisé (faisceau étroit, difficile à intercepter)
Directionnalité	Omnidirectionnelle ou large couverture	Hautement directionnelle (nécessite alignement précis)
Coût des infrastructures	Antennes standard, coûts modérés	Composants optiques coûteux (lasers, détecteurs, systèmes de pointage)
Impact environnemental	Perturbations électromagnétiques possibles	Aucune pollution RF, mais risques laser (yeux, aviation)
Résistance aux conditions climatiques	Peu affectée par la pluie/brouillard (sauf hautes fréquences)	Très sensible aux intempéries (atténuation forte)
Applications typiques	Téléphonie mobile, Wi-Fi, satellites, radar	Liaisons inter-satellites, fibre optique sans fil, militaires

Tableau 2 : Comparaison entre les communications Radiofréquence (RF) et Optiques (FSO/Laser) [38]

II.2.4 Composants d'un Système de Communication Optique

Un terminal optique spatial comprend typiquement quatre blocs essentiels : l'émetteur laser, le récepteur photonique, l'optique de transmission/réception, et le système de pointage.

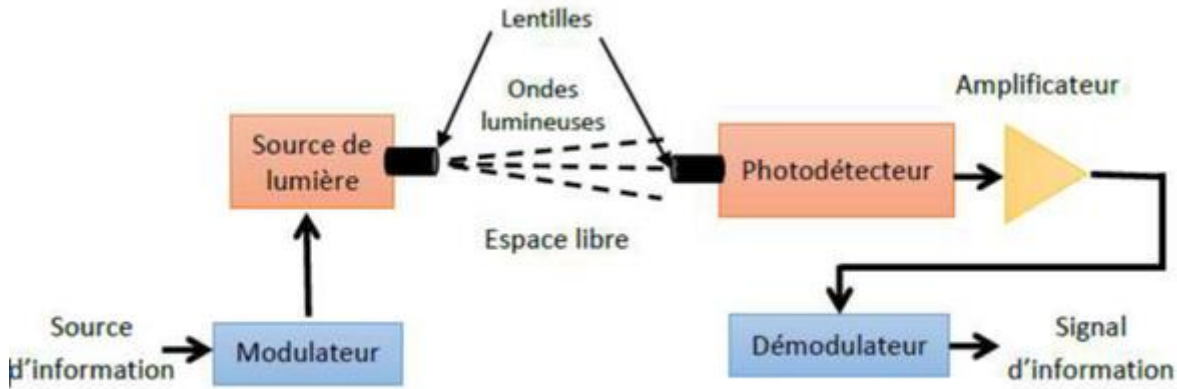


Figure II.2 : Système de communication optique FSO/OWC [48]

II.2.4.1 Émetteur (types de lasers, schémas d'émission)

Le module émetteur est responsable de la modulation d'une source de données sur une onde porteuse optique. Sa fonction principale est de transformer le signal électrique modulé en un signal lumineux. Il est composé d'un circuit de commande (driver) et d'une source lumineuse telle qu'un laser ou une diode électroluminescente (DEL). Le signal optique ainsi généré se propage ensuite à travers l'atmosphère ou bien le vide en direction du récepteur. Ce dernier a pour rôle de détecter l'onde modulée et d'extraire les données transmises. La plupart des systèmes de communication optique en espace libre (FSO) sont conçus pour opérer dans les plages de longueurs d'onde de 780 à 850 nm et de 1520 à 1600 nm, ce qui correspond à des fréquences de transmission de données avoisinant les 200 THz. La figure II.3 illustre un schéma fonctionnel d'un module émetteur pour la transmission optique en espace libre [20,21].

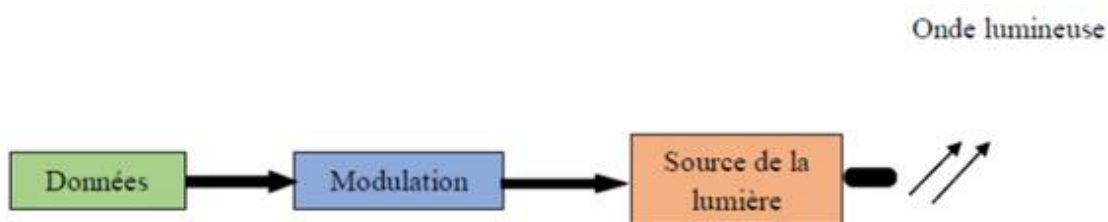


Figure II.3: Schéma synoptique du bloc émetteur FSO/OWC.[48]

Pour la transmission de données optiques dans les systèmes FSO, un éventail de sources lumineuses est mis en œuvre. Dans l'unité d'émission, le rayon produit par la source lumineuse passe à travers un ensemble de lentilles. Ces dernières ont pour rôle de contrôler l'étendue de la divergence du faisceau laser qui transporte les données modulées. La divergence d'un faisceau lumineux varie généralement entre quelques centaines de milliradians et quelques microradians. Par exemple, avec une divergence de faisceau de 1 milliradian, le diamètre du faisceau est d'un mètre à 1 kilomètre de distance.

II.2.4.1.a Les diodes électroluminescentes (LED)

Ce sont des composants optoélectroniques qui émettent de la lumière. Une de leurs caractéristiques est leur puissance d'émission relativement limitée. Les LED sont typiquement utilisées dans des applications à courte portée. [48]

II.2.4.1.b Les diodes laser

Elles présentent des avantages significatifs pour les applications à longue distance en comparaison avec les diodes DEL. La génération de lumière dans les diodes laser s'appuie sur trois mécanismes fondamentaux : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. Un laser est une source de lumière cohérente, définie comme une onde électromagnétique sinusoïdale dans le temps.

La sélection d'une source laser pour des applications FSO/OWC est conditionnée par divers éléments, dont le plus important est que la longueur d'onde de transmission doit se situer dans les fenêtres atmosphériques appropriées (autour de 850 nm et 1550 nm). L'unité d'émission comprend également deux méthodes de modulation : la modulation d'intensité et la modulation externe. [33]

II.2.4.1.c. 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.



Figure II.4 : Principe de base d'une modulation directe [48].

II.2.4.1.d. La modulation externe

Dans ce type de modulation, le champ émis par la source optique n'est pas modulé et passe par un circuit optique spécial où l'on provoque une modulation de phase ou d'amplitude. Ces modulateurs soumettent plusieurs fois de conversion amplitude-fréquence et aussi elle reçoit une puissance électrique continue puis suivie d'un dispositif qui réalise lui-même la modulation de l'intensité optique. [36] On peut citer l'interféromètre, de Mach-Zehnder (IMZ) ou un modulateur électro-absorbant (MEA).

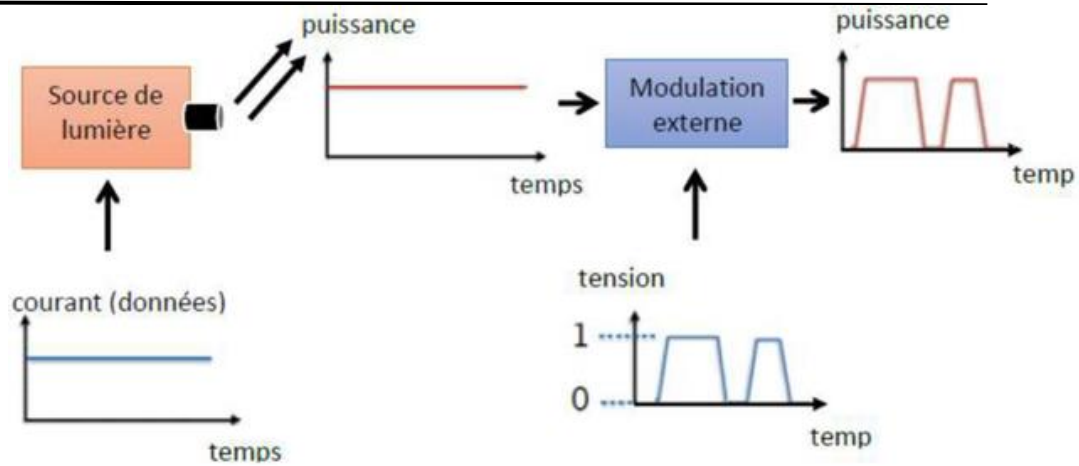


Figure II.5 : Principe de base d'une modulation externe [48].

II.2.4.2 Canal de propagation

L'atmosphère, servant de canal de propagation, est un milieu complexe et dynamique qui peut affecter le faisceau laser émis. Les systèmes FSO/OWC sont confrontés à des défis liés principalement aux facteurs environnementaux, en particulier aux effets de l'atmosphère sur la propagation du faisceau. Les liaisons FSO/OWC subissent des contraintes importantes dues à l'atmosphère[33], entraînant une atténuation ou une extinction du signal optique et limitant la portée. Cette extinction atmosphérique est causée par divers phénomènes sélectifs en longueur d'onde :

l'absorption moléculaire (forte dépendance spectrale), la diffusion moléculaire (Rayleigh), l'extinction (absorption et diffusion) par les aérosols et les précipitations (pluie, neige, etc.), ainsi que la turbulence atmosphérique (variations spatio-temporelles de l'indice de l'air, scintillations, fluctuations spatiales du faisceau...) [34] La figure II.6 identifie les principaux phénomènes affectant un faisceau optique.

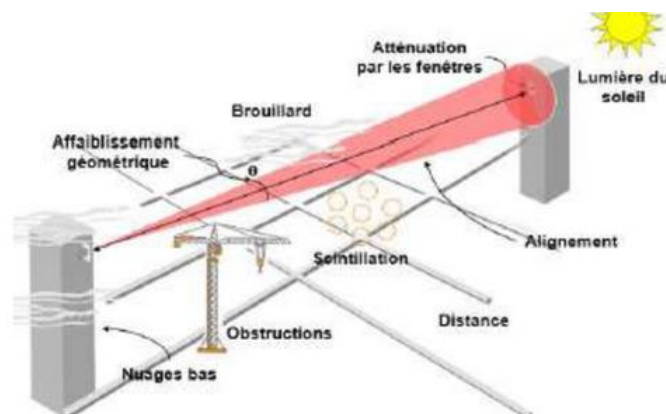


Figure II.6 : Les phénomènes qui affectent le faisceau optique[17]

II.2.4.3 Récepteur (photodétecteurs, méthodes de détection)

La fonction essentielle de ce bloc est la capture et l'extraction des données du champ optique incident,

Chapitre II : Conception d'un Système de Communication

ainsi que leur conversion en signal électrique avec une dégradation minimale. Le photodétecteur assure ce rôle en comptant les photons et en générant un courant. Un bon photodétecteur doit être sensible à la longueur d'onde utilisée, rapide, et peu bruyant.

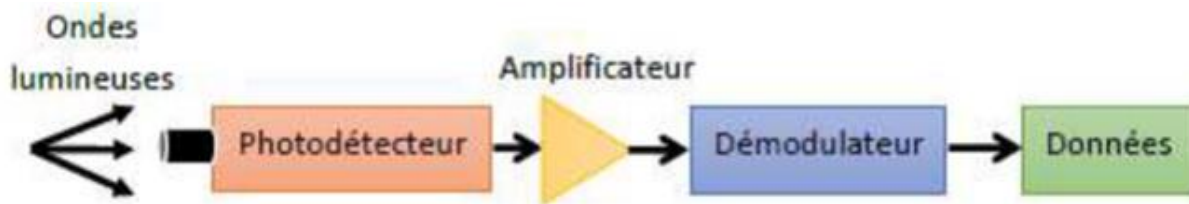


Figure II.7: Schéma bloc du récepteur optique[48]

II.2.4.4 Système d'Optique (lentilles, miroirs, éléments de focalisation)

Les terminaux optiques spatiaux contiennent un système optique pour concentrer et former le faisceau. Côté émission, un collimateur (lentille ou miroir parabolique) forme un faisceau quasi-collimaté à très faible divergence. Côté réception, un grand télescope ou un ensemble de lentilles focalise la lumière vers le photodétecteur afin de capter le signal maximum. Par exemple, les liaisons laser inter-satellites utilisent souvent des télescopes de diamètre de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres pour réduire la perte par divergence. Des éléments adaptatifs (miroirs déformables, lentilles ajustables) peuvent corriger les aberrations éventuelles. Au final, l'optique spatiale doit être conçue pour minimiser les pertes de faisceau tout en offrant une ouverture suffisante pour optimiser le facteur de collecte dans l'environnement spatial. Le récepteur est composé des éléments fonctionnels suivants :

- Un module de réception optique, dont l'élément principal est une photodiode
- Des étapes de filtrage et d'amplification du signal numérique électrique.
- Un module de conversion électrique/optique (E/O), requis si une interface optique est utilisée
- Une interface de connexion, de nature optique ou électrique, pour l'acheminement des données numériques.

II.2.4.5 Système de Tracking (techniques de suivi, considérations de design)

En communication optique spatiale, le Pointage, l'Acquisition et le Tracking (PAT) représentent une fonction essentielle. L'exactitude du pointage doit être de l'ordre de quelques microradians pour assurer la continuité du lien (par exemple, 1 à 10 μ rad sont requis pour une liaison LEO-GEO). Le PAT est structuré en deux niveaux : un pointage initial grossier, qui implique l'orientation de la plateforme satellitaire (via des gyroscopes et des actionneurs comme les roues à réaction et les propulseurs) pour viser approximativement le récepteur désiré, et un pointage fin.

Ce dernier est mis en œuvre par des mécanismes mécaniques ou opto-mécaniques (miroirs pilotés par des éléments piézoélectriques, systèmes de gimbales de haute précision, MEMS) qui corrigent les erreurs en boucle fermée à l'aide de capteurs de position (cellules à quadrants, caméras de guidage).

Les systèmes modernes exploitent notamment des miroirs à oscillation rapide pour compenser les

Chapitre II : Conception d'un Système de Communication

vibrations et le mouvement relatif, atteignant une précision sub-microradienne.

L'émission de balises optiques peut également faciliter la phase d'acquisition du faisceau par le récepteur. Sur le plan pratique, la conception du PAT doit couvrir la phase d'acquisition initiale (avec un champ de vision étendu pour confirmer la présence du faisceau du partenaire) puis le maintien précis de l'alignement durant toute la durée de la liaison. Une infime erreur de pointage suffit à interrompre la communication, d'où la criticité de ces méthodes de suivi de haute précision.

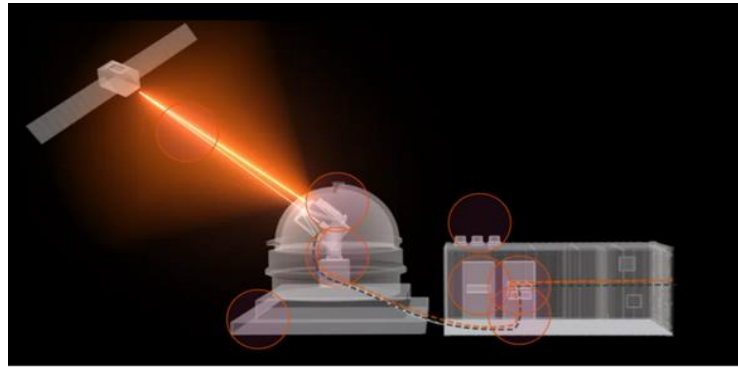


Figure II.8 : :Système de Tracking en communication optique spatiale [65]

II.3 Caractéristiques des Satellites LEO et GEO

La conception du lien dépend fortement de l'orbite des satellites. Les satellites LEO et GEO diffèrent par leur altitude, leur vitesse orbitale et leurs applications usuelles [23].

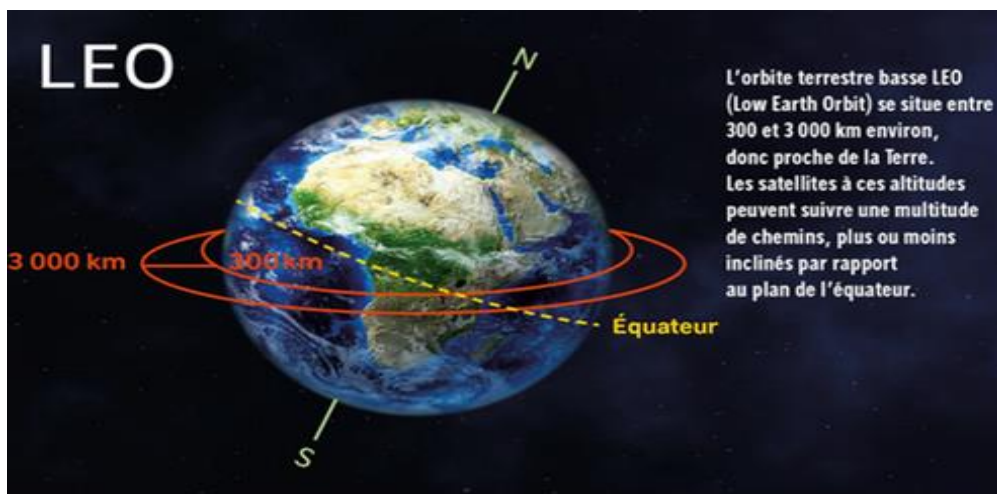


Figure II.9 : Satellite en Orbite Basse (LEO)[66]

II.3.1 Satellites en Orbite Basse (LEO)

Les satellites en orbite basse (LEO) gravitent généralement entre 160 et 2 000 km d'altitude, accomplissant une révolution complète autour de la Terre en 90 à 120 minutes. Leur proximité avec la planète réduit la latence des communications et limite l'atténuation du signal optique, offrant des performances optimales pour les échanges de données. À titre d'illustration, la Station Spatiale

Chapitre II : Conception d'un Système de Communication

Internationale (ISS), située à 400 km, réalise un tour complet en ~90 minutes, mais nécessite des corrections régulières pour compenser la friction atmosphérique résiduelle.

Pour pallier leur couverture géographique restreinte, des projets comme Starlink, OneWeb ou Iridium déploient des mégaconstellations de centaines à plusieurs milliers de satellites, assurant ainsi une connectivité permanente grâce à un maillage orbital serré.

Les satellites LEO se distinguent par leur vitesse orbitale élevée, leur zone de couverture localisée (nécessitant une constellation dense) et des coûts de déploiement relativement accessibles. Leur faible distance au sol permet des connexions haut débit avec des temps de réponse inférieurs à 50 ms, idéales pour les applications sensibles au délai comme les communications vocales, la vidéo en temps réel ou l'Internet des Objets.

Cette configuration favorise également l'imagerie spatiale précise, grâce à une résolution accrue et une minimisation des décalages temporels. Cependant, leur succès dépend d'une logistique complexe : la fragilité face aux débris spatiaux exige une gestion proactive des trajectoires, tandis que le renouvellement fréquent des satellites impose des investissements continus

II.3.1.a. Altitude et Environnement des Satellites LEO

Les satellites opérant en orbite terrestre basse (LEO), typiquement dans la plage altitudinale de 500 à 1200 km, sont soumis à un environnement spatial caractérisé par un vide poussé, un flux de rayonnement solaire significatif et la présence de particules énergétiques piégées dans les ceintures de Van Allen. Ces conditions environnementales exigent l'intégration de mesures de protection robustes au sein des systèmes optiques embarqués, notamment des solutions de gestion thermique et de blindage contre les radiations ionisantes pour préserver l'intégrité fonctionnelle des lasers et des photodétecteurs.

Bien que l'altitude réduite minimise la puissance nécessaire pour établir des liaisons de communication optique, le mouvement orbital rapide des satellites LEO (vitesse approximative de 7,5 km/s) impose la mise en œuvre de systèmes de poursuite et de pointage de haute précision pour maintenir l'alignement des faisceaux optiques [25].

II.3.1.b Latence de Communication

L'orbite terrestre basse (LEO) confère un avantage significatif en termes de latence de communication. La distance réduite entre les satellites LEO et les stations terrestres, ainsi qu'entre les satellites au sein d'une constellation, se traduit par des délais de propagation des signaux typiquement compris entre 5 et 20 millisecondes pour les liaisons satellite-sol et inter-satellites. Cette valeur est substantiellement inférieure à la latence caractéristique des satellites géostationnaires (GEO), qui avoisine 240 ms en raison de leur altitude orbitale plus élevée. [54]

L'utilisation de systèmes de communication optique en LEO exacerbe cette réduction de latence grâce à la vitesse de propagation élevée des faisceaux laser dans le vide. Cette caractéristique rend les plateformes LEO particulièrement adaptées aux applications nécessitant une interaction en temps réel, telles que la télémétrie avancée et le contrôle en boucle fermée de véhicules autonomes spatiaux (drones spatiaux). [54.62]

II.3.1.c. Modèle de Constellation

Le déploiement de satellites en orbite terrestre basse (LEO) s'effectue fréquemment selon un modèle de constellation, constituant un réseau distribué d'un grand nombre de plateformes spatiales opérant de manière coordonnée. L'objectif principal de ces constellations est d'assurer une couverture globale et continue de la surface terrestre pour diverses applications. Des exemples notables incluent les constellations Starlink et OneWeb. Ces architectures exploitent des liaisons inter-satellites (ISL), souvent implémentées par des systèmes de communication optique, pour assurer le relais de données entre les différents nœuds du réseau avant leur transmission vers des stations terrestres. [54.61]

Le recours à un modèle de constellation permet d'optimiser la couverture spatio-temporelle, de minimiser les interruptions de service, mais introduit une complexité accrue au niveau des systèmes de suivi et d'alignement précis nécessaires au maintien des liaisons optiques dynamiques entre les satellites en mouvement relatif. La constellation Starlink met en œuvre des liaisons laser inter-satellites pour établir un réseau maillé complexe. Cette architecture permet de réduire la dépendance aux infrastructures de stations terrestres en acheminant les données à travers le réseau spatial avant de les diriger vers le point de terminaison au sol[27].

II.3.2 Satellites en Orbite Géostationnaire (GEO)

Les satellites géostationnaires (GEO), situés à environ 35 786 km au-dessus de l'équateur, orbitent à la même vitesse que la Terre. Cette synchronicité leur permet de rester immobiles par rapport à un point donné au sol, offrant une couverture étendue et continue (près d'un tiers du globe). Cette fixité est un avantage majeur pour des applications comme la diffusion télévisuelle, la retransmission de signaux et la météorologie, car elle élimine le besoin de systèmes de pointage complexes pour maintenir la liaison optique. [56]

Cependant, cette grande distance introduit un délai de propagation significatif d'environ 250 à 300 ms pour un aller-retour, ce qui peut être problématique pour les applications nécessitant une faible latence (temps réel).

Malgré cette limitation, les satellites GEO possèdent généralement des charges utiles puissantes (grandes antennes ou lasers) et peuvent agir comme des relais optiques. Par exemple, ils peuvent recevoir des données de constellations de satellites en orbite basse (LEO) via une liaison laser et les retransmettre vers des stations terrestres.

Ce rôle de relais permet aux satellites LEO de communiquer même lorsqu'ils ne sont pas directement visibles par une station au sol, augmentant ainsi leur temps de contact effectif. En résumé, les GEO offrent une grande capacité (puissants transpondeurs/lasers) et une couverture quasi-permanente sur vaste zone, au prix d'une latence élevée et d'une orbite beaucoup plus contraignante à atteindre (besoin d'un vecteur plus volumineux). [57.59] La figure III.10 illustre la puissance optique transmise pour une liaison de 35 700 km

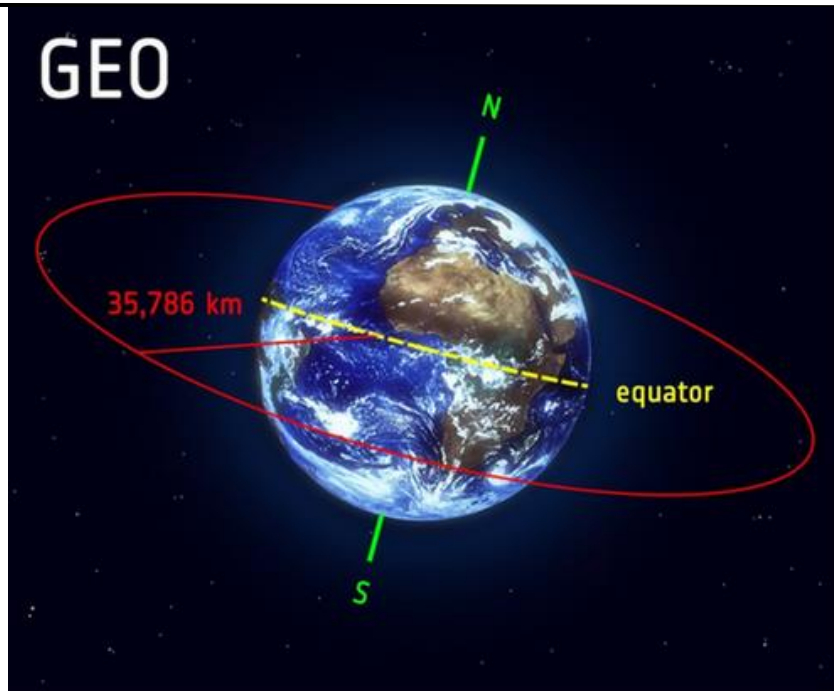


Figure II.10 : Satellite en Orbite Géostationnaire (GEO) [67]

II.3.2.a Caractéristiques Orbitales

Les satellites géostationnaires (GEO) évoluent sur une orbite circulaire située dans le plan équatorial terrestre, à une altitude nominale d'environ 35 786 kilomètres. Cette altitude spécifique leur confère une période orbitale identique à la période de rotation de la Terre, résultant en une position apparemment fixe par rapport à un point de l'équateur. Chaque satellite GEO est capable de fournir une couverture d'environ un tiers de la surface terrestre. Bien que cette caractéristique de position stationnaire simplifie considérablement le suivi et l'établissement de liaisons de communication avec les stations terrestres, la distance orbitale élevée impose des contraintes significatives sur les systèmes de communication optique.

Notamment, la puissance d'émission requise pour établir des liaisons optiques sur de telles distances est substantiellement plus importante. De plus, l'établissement de liens inter-satellites (ISL) optiques avec des satellites en orbite terrestre basse (LEO), caractérisés par un mouvement orbital relatif rapide, présente des défis techniques complexes en termes de pointage et de maintien de l'alignement des faisceaux laser. Les satellites géostationnaires, tels que ceux exploités par l'opérateur Intelsat, fournissent une couverture continue et étendue, essentielle pour les services de télécommunications transcontinentales [25]

II.3.2.b Avantages et Inconvénients :

Le tableau 3 récapitule les avantages et inconvénients des satellites GEO:

Avantages	Inconvénients
Couverture spatiale constante et étendue sur une large partie de la surface terrestre.	Latence de propagation élevée (~240 ms), problématique pour les applications en temps réel.
Élimination du besoin de systèmes de poursuite dynamique complexes pour les stations terrestres.	Coûts de lancement élevés en raison de l'énergie nécessaire pour atteindre l'orbite GEO.
Simplification de l'infrastructure au sol grâce à la position orbitale stable.	Difficultés techniques pour établir des liaisons optiques avec des satellites LEO en raison des grandes distances et des différences de vitesse orbitale.
Fiabilité intrinsèque pour les applications à long terme (ex. : diffusion TV, télécommunications).	Complexité du pointage et du maintien de l'alignement des faisceaux laser pour les communications optiques.

Tableau 3: les avantages et les inconvénient du satellite GEO [28]

II.4. Considérations de Conception pour un Système LEO/GEO

La mise en œuvre d'un lien optique LEO–GEO requiert de prendre en compte plusieurs facteurs cruciaux : l'alignement du faisceau, l'impact des conditions atmosphériques sur la trajectoire du laser, et le choix des débits et de la modulation.

II.4.1. Alignement et Suivi du Faisceau

Le maintien d'une liaison optique entre un satellite LEO en orbite rapide et un satellite GEO distant confronte les ingénieurs à un défi majeur. La nature étroite du faisceau laser requiert un alignement d'une exactitude rigoureuse (avec une marge d'erreur inférieure à 10 μ rad). Une approche courante pour relever ce défi repose sur un système de pointage actif comprenant un suivi grossier synchronisé avec la navigation orbitale, une acquisition fine (parfois assistée par un laser de balisage émis par l'un des terminaux), et un ajustement fin permanent grâce à des miroirs à réponse rapide pilotés par rétroaction.

Par ailleurs, des technologies novatrices sont en développement, telles que les systèmes de cohérence quantique (holographie adaptative) pour compenser les perturbations atmosphériques résiduelles, les réseaux à commande de phase optique pour la distribution du faisceau, ou encore les méthodes de pointage sans balise permettant un auto-alignement précis des liaisons lointaines [29]

II.4.1.1 Méthodes d'Alignement

L'établissement et le maintien de liaisons de communication optique spatiales nécessitent des techniques d'alignement précises pour garantir le recouvrement spatial des faisceaux émis et reçus. On distingue principalement trois approches méthodologiques [29] :

* **Alignement Actif** : Cette méthode repose sur l'utilisation de capteurs optoélectroniques, tels que des caméras CCD (Charge-Coupled Device) ou des détecteurs quadrant, intégrés au système de communication. Ces capteurs mesurent en temps réel la position spatiale du faisceau optique incident. Sur la base de ces mesures, des mécanismes d'ajustement micrométrique, tels que des miroirs à commande piézoélectrique ou des lentilles motorisées, sont actionnés en boucle fermée pour corriger tout désalignement et optimiser le pointage du faisceau.

* **Alignement Passif** : Cette approche utilise une balise optique, constituée d'un faisceau laser pilote émis par l'unité réceptrice. L'émetteur détecte ce faisceau de balise et ajuste son propre faisceau de communication de manière à le superposer spatialement avec le faisceau pilote reçu, assurant ainsi un alignement précis.

* **Alignement Prédicatif** : Cette technique exploite des modèles mathématiques sophistiqués décrivant les trajectoires orbitales des satellites impliqués dans la liaison (notamment dans le cas de communications entre satellites LEO et GEO). En anticipant les positions relatives des plateformes spatiales avec une haute précision temporelle, le système de pointage peut pré-calculer et orienter les faisceaux optiques de manière proactive, réduisant ainsi la nécessité d'ajustements en temps réel basés sur des mesures directes. Le système de démonstration de communication laser lunaire (LLCD) développé par la NASA a employé une méthode d'alignement actif, atteignant une précision de pointage remarquable de l'ordre du microradian. La figure II.11 illustre l'expérience de communication laser lunaire LLCD de la NASA.



Figure II.11 : La démonstration de communications laser lunaires (LLCD) a mis en avant la technologie de communication par laser d'octobre 2013 à avril 2014 lors de la mission Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE). NASA [68]

II.4.1.2. Technologies Émergentes

Le domaine de l'alignement pour les communications optiques spatiales est en constante évolution, avec l'émergence de plusieurs technologies prometteuses visant à améliorer la précision, l'efficacité et la robustesse des liaisons. Parmi celles-ci, on distingue :

II.4.1.2.a Optiques Adaptatives :

Ces systèmes intègrent des éléments optiques déformables, tels que des miroirs à surface contrôlée, ainsi que des capteurs de front d'onde. Ils permettent de mesurer et de compenser dynamiquement les aberrations et les distorsions du faisceau laser induites par des facteurs tels que les vibrations mécaniques des plateformes spatiales ou les gradients thermiques affectant les composants optiques. Cette correction en temps réel améliore la qualité du faisceau transmis et reçu, optimisant ainsi l'efficacité de la communication.

II.4.1.2.b Suivi Basé sur l'Intelligence Artificielle (IA) :

L'application d'algorithmes d'apprentissage automatique offre des perspectives novatrices pour le suivi et l'alignement. En analysant des données historiques et en temps réel sur les mouvements orbitaux des

satellites, ces algorithmes peuvent développer des modèles prédictifs sophistiqués pour anticiper avec précision les trajectoires relatives. Cette capacité de prédiction avancée permet d'optimiser l'orientation des systèmes de pointage, potentiellement en réduisant la complexité et les coûts associés aux systèmes

de suivi traditionnels.

II.4.1.2.c Systèmes Micro-Électro-Mécaniques (MEMS) :

Les MEMS représentent une classe de dispositifs miniaturisés intégrant des composants mécaniques et électroniques à l'échelle micrométrique. Dans le contexte des communications optiques spatiales, les miroirs MEMS se distinguent par leur taille compacte, leur faible masse et leur capacité à effectuer des ajustements angulaires précis et rapides. Ces caractéristiques les rendent particulièrement adaptés aux applications sur des petits satellites, tels que les CubeSats, où les contraintes de taille, de poids et de puissance sont critiques. [57.59]

II.4.2 Conditions Atmosphériques

La communication optique par satellite opère principalement en deux modes : les liaisons directes entre satellites, qui traversent le vide spatial, et les liaisons satellite-Terre, perturbées par l'atmosphère terrestre. Cette dernière introduit des défis majeurs, dégradant le signal à travers l'atténuation, la scintillation et les turbulences atmosphériques. L'atmosphère est un système dynamique complexe. Une compréhension approfondie de ses phénomènes et de son interaction avec les lasers est essentielle pour concevoir des systèmes optiques efficaces. Les sections suivantes exploreront divers aspects de l'atmosphère, qui est généralement divisée en couches selon son profil de température moyenne.

La température diminue en moyenne du sol jusqu'à **10-12 km** d'altitude. La couche atmosphérique la plus basse, où la température diminue avec l'altitude, est appelée la troposphère. Au-dessus se trouve la stratosphère, où la température augmente avec l'altitude. Contrairement à la troposphère, l'air stratosphérique est très stable, et le mélange turbulent y est inhibé par ce profil de température inversé. Cette faible turbulence et l'absence de précipitations expliquent la longue persistance des aérosols et autres particules dans la stratosphère. La figure II.12 illustre le profil de température moyen de l'atmosphère en fonction de l'altitude et La figure II.13 présente le spectre d'atténuation atmosphérique.

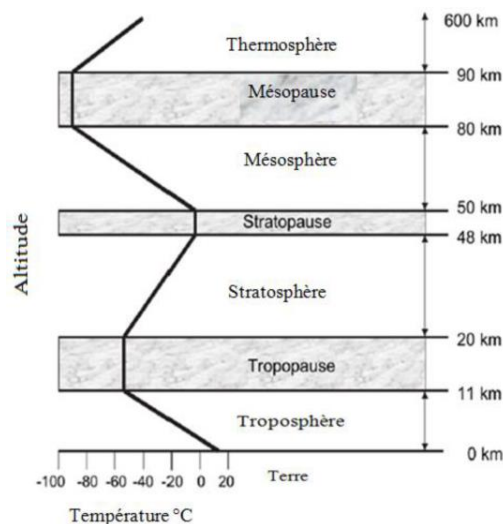


Figure II.12 : Température moyenne de l'atmosphère en fonction de l'altitude [69]

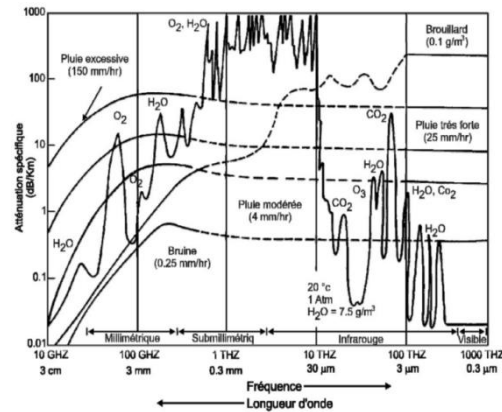


Figure II.13: Spectre d'atténuation atmosphérique montrant l'effet de certains constituants de l'atmosphère sur l'atténuation ainsi que celui de la pluie et du brouillard [69].

II.4.2.1. Effets des Intempéries sur la Communication

Les phénomènes météorologiques terrestres, tels que la présence de formations nuageuses, les précipitations (pluie, neige, etc.) et les turbulences atmosphériques, constituent des sources significatives de dégradation pour les liaisons de communication optique impliquant un segment terrestre. Ces conditions environnementales induisent principalement deux types d'effets sur la propagation des faisceaux laser [29] :

II.4.2.1.a Atténuation du Signal :

L'interaction des photons laser avec les particules présentes dans l'atmosphère (gouttelettes d'eau, cristaux de glace, aérosols) provoque une absorption et une diffusion de l'énergie optique, entraînant une

réduction de l'intensité du signal reçu. L'ampleur de cette atténuation dépend de la densité et de la composition des éléments météorologiques traversés, ainsi que de la longueur d'onde du laser utilisé.

II.4.2.1.b Distorsion du Faisceau :

Les turbulences atmosphériques, résultant de variations locales de température et de pression, engendrent des fluctuations de l'indice de réfraction de l'air. Ces inhomogénéités optiques provoquent des distorsions du front d'onde du faisceau laser, incluant la scintillation (fluctuations d'intensité), le brouillage spatial et la déviation du pointage. Ces effets peuvent compromettre significativement l'efficacité de la communication en réduisant la puissance collectée par le récepteur et en compliquant le maintien d'un alignement précis.

Bien que ces phénomènes atmosphériques aient un impact limité sur les liaisons optiques pures entre satellites opérant en orbite terrestre basse (LEO) et géostationnaire (GEO) en raison de la propagation majoritairement dans le vide spatial, ils deviennent critiques dans les scénarios de communication

Chapitre II : Conception d'un Système de Communication

hybrides impliquant un segment atmosphérique, notamment les liaisons descendantes de satellites LEO vers des stations terrestres. Les turbulences atmosphériques peuvent induire une réduction significative de l'intensité du signal laser, de l'ordre de 30 à 50 %, pour les liaisons optiques ascendantes ou descendantes entre des stations terrestres et des plateformes spatiales (satellites LEO ou GEO).

II.4.2.1.c Solutions Possibles

Plusieurs stratégies et technologies peuvent être mises en œuvre pour atténuer les effets délétères de l'atmosphère sur les performances des liaisons de communication optique spatiales impliquant un segment terrestre [29].

II.4.3 Débit de Données et Modulation

Dans tout système de communication, le débit de données est proportionnel à la bande passante de la porteuse. L'utilisation d'une porteuse optique (fibre ou sans fil) avec une fréquence de 10^{12} Hz à 10^{16} Hz offre un potentiel de transmission de données allant jusqu'à 2000 THz. Les communications optiques offrent ainsi une capacité d'information bien supérieure aux systèmes radiofréquences, dont la bande passante utilisable est environ 10^5 fois plus faible.

II.4.3.1. Techniques de Modulation

Dans le domaine des communications optiques spatiales, le choix de la technique de modulation joue un rôle crucial dans la détermination du débit de données, de la sensibilité du récepteur et de la

Robustesse de la liaison face au bruit et aux perturbations. On distingue principalement les approches suivantes [31] :

II.4.3.a. Modulation d'Intensité avec Détection Directe (IM/DD) :

Cette technique repose sur la variation de l'intensité du faisceau laser pour encoder l'information, et la détection directe de cette intensité au niveau du récepteur. Elle se caractérise par sa simplicité de mise en œuvre et est souvent privilégiée pour les applications où le coût et la complexité du système doivent être minimisés, comme dans le cas de la modulation par tout ou rien (On-Off Keying - OOK).

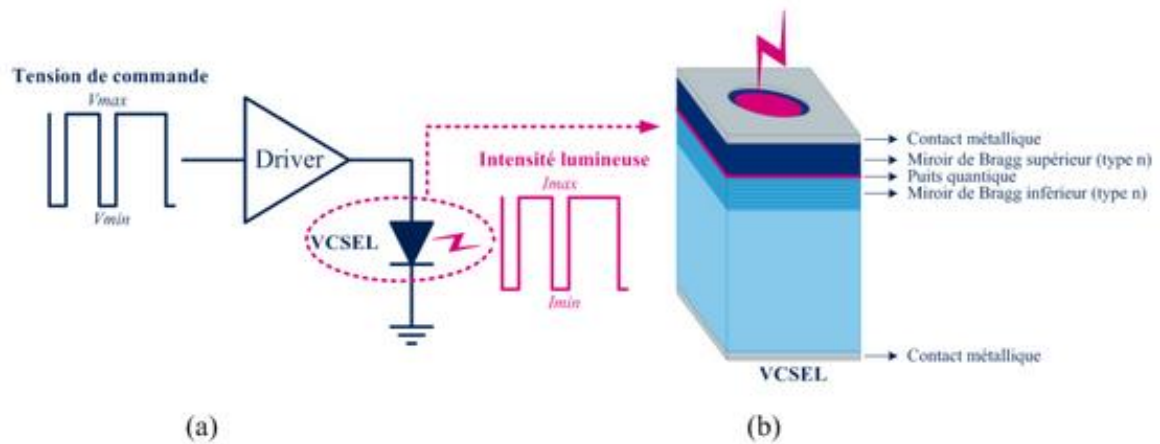


Figure II.14 : Schéma de principe d'une modulation directe (a) avec une diode VCSEL(b) [31]

II.4.3.1.b. Le Modulateur par Électro-Absorption

Le modulateur par électro-absorption s'appuie sur l'effet d'électro-absorption pour moduler l'intensité d'un faisceau optique à l'aide d'un champ électrique. Ce dispositif, généralement constitué d'un guide d'onde de quelques micromètres fabriqué à partir de matériaux, permet une modulation efficace par l'application d'un champ électrique. Cependant, ces modulateurs sont affectés par l'effet de pépiement, similaire à celui observé dans la modulation directe. De plus, l'énergie optique absorbée par le matériau est convertie en chaleur, ce qui impose des contraintes thermiques significatives pour la conception et l'exploitation de ces dispositifs [22].

II.4.3.1.c. Le modulateur de phase

Les modulateurs de phase sont fréquemment employés dans les systèmes de transmission optique, souvent en combinaison avec des modulateurs d'amplitude, pour réaliser des modulations à haute efficacité spectrale, surpassant la modulation OOK. La modulation QAM, couramment utilisée, peut être implémentée par la cascade d'un modulateur de phase et d'un modulateur d'amplitude. Ce type de modulation nécessite une source lumineuse cohérente pour garantir une détection efficace des signaux à la réception. Toutefois, cette approche entraîne une complexité accrue et des coûts plus élevés. [33]

II.5. Applications et cas d'utilisation

II.5.1 Communication entre satellites

Un cas d'utilisation évident est la liaison inter-satellites (satellite-to-satellite) pour relayer de l'information dans une constellation. Par exemple, des architectures de réseau spatiaux multi-orbites prévoient de connecter les satellites LEO à un satellite GEO ou même directement entre LEO pour acheminer les données vers les utilisateurs finaux. Une démonstration récente a été réalisée sur une constellation américaine : des satellites militaires LEO différents (York Space et SpaceX) ont établi un lien laser croiser inter-vendeurs [54.57.59].

Chapitre II : Conception d'un Système de Communication

Ces démonstrations confirment que, entre satellites orbitant à $\sim 1\ 000$ km, les terminaux laser peuvent échanger des données de manière rapide et sécurisée. Dans le civil, SpaceX prévoit d'équiper tous ses Starlink de liens optiques entre pairs (laser crosslinks) pour réduire la latence globale et limiter la dépendance aux stations sol. En résumé, les liens optiques inter-satellites permettent de créer des « maillages spatiaux » (mesh networks) offrant une flexibilité accrue du routage et une résilience (un satellite peut rediriger les données via un autre en cas de panne).



Figure II.15 : Communication entre satellites[68]

II.5.2 Applications militaires et de sécurité

Les forces armées et les agences de sécurité voient dans l'optique spatiale plusieurs bénéfiques clés : principalement la **sécurité renforcée** (liaisons difficiles à détecter/intercepter) et la redondance de réseau. Le récent test du Space Development Agency (SDA) américain en est un exemple : des satellites LEO de l'US Space Force ont communiqué par laser en orbite basse, validant un nouveau standard optique ouvert[26]. L'article rapporte que « les communications laser offrent une transmission de données plus rapide et plus sécurisée » que les systèmes RF traditionnels. Ce type de liaison est également moins susceptible d'être brouillé par l'adversaire (le faisceau étroit échappe aux systèmes de guerre électronique à large faisceau).

De plus, les réseaux satellitaires militaires passent désormais à des constellations distribuées (satellites plus petits en LEO) où les liaisons optiques inter-satellites permettent de véhiculer des données de trajectoires de missiles ou de renseignement d'un point à l'autre du globe sans dépendre d'infrastructures terrestres vulnérables [26].

II.5.3 Services de connectivité à large bande

Dans le secteur civil, l'essor des connexions Internet mondiales par satellite s'appuie sur les liaisons optiques pour augmenter la capacité. Par exemple, SpaceX a confirmé que **tous ses futurs satellites**

Starlink seront équipés de terminaux laser croisés pour créer un réseau maillé complet [37]. Ce choix permet de réduire le nombre de stations terrestres nécessaires (le trafic peut transiter de satellite en satellite) et de diviser la latence en coupant les « sauts » (un faisceau direct LEO→LEO vers une station sol éloignée évite un détour vers un GEO). Selon Gwynne Shotwell (COO SpaceX), ces liens ont été introduits pour gérer le trafic « dans toutes les directions » et baisser le délai global.

De même, d'autres projets comme Amazon Kuiper ou OneWeb prévoient des inter-satellites optiques. Enfin, les liaisons LEO–GEO permettent d'offrir des backhails haut débit : un satellite LEO peut transmettre ses données à un relais GEO très haut débit qui les renvoie à plusieurs stations sol, optimisant ainsi le transport de gros volumes (sciences de la Terre, retransmissions vidéo HD) [54.57.59].

II.6 Conclusion

La communication optique spatiale par laser entre satellites LEO et GEO ouvre de nouvelles perspectives pour les liaisons satellitaires haut débit. Elle cumule l'avantage de débits nettement supérieurs et de latence plus basse qu'en RF, avec un niveau de sécurité intrinsèquement élevé[37]. Les études récentes (agences spatiales, industriels) confirment que des systèmes opérationnels peuvent atteindre plusieurs dizaines de Gbps sur des liens LEO–GEO, tout en gérant les contraintes de pointage fin et de conditions atmosphériques. Les développements technologiques – lasers à fibre miniaturisés, détecteurs à photon unique, optiques adaptatives – continuent de lever les principaux verrous. D'un point de vue applicatif, les relais optiques satellitaires pourront répondre aux besoins d'Internet mondial (Starlink, etc.), de réseaux militaires résistants et de missions scientifiques nécessitant un volume croissant de données. Toutefois, il faut souligner que la performance pratique dépendra de la qualité du suivi laser et de la capacité à déployer des stations terrestres optiques ou des relais satellite.

En conclusion, la combinaison LEO/GEO via des lasers constitue un axe majeur pour l'infrastructure spatiale du futur, et demande une ingénierie rigoureuse pour intégrer les technologies de photonie avancées .

Chapitre III :
Modélisation par OptiSystem
et Transmission Optique
Sans Fil (OWC)

CHAPITRE III : Modélisation par OptiSystem et Transmission Optique Sans Fil (OWC)

III.1 Introduction

L'évolution rapide des technologies sans fil a profondément transformé la manière dont les données sont échangées dans les réseaux modernes. Face à la saturation croissante du spectre radiofréquence, des solutions alternatives sont devenues nécessaires. Parmi elles, la communication optique sans fil (OWC) se distingue par son potentiel à offrir des débits élevés, une large bande passante et une sécurité accrue, répondant ainsi aux exigences des applications futures.

III.1.1 Objectifs du chapitre

Ce chapitre vise à présenter une exploration approfondie de la simulation des systèmes de communication optique sans fil (OWC) à l'aide du logiciel OptiSystem. Il mettra en lumière le rôle fondamental que joue la simulation dans la conception, l'optimisation et l'analyse des systèmes OWC. Une présentation détaillée d'OptiSystem sera proposée, mettant en évidence ses fonctionnalités spécifiques adaptées à la modélisation des transmissions optiques sans fil. Le chapitre abordera également les concepts clés de la technologie OWC, ainsi que les étapes pratiques de modélisation dans OptiSystem. Il inclura une analyse de l'influence des conditions environnementales sur les performances, ainsi qu'une étude des outils d'évaluation intégrés au logiciel. Des cas pratiques viendront illustrer les applications concrètes de la simulation pour comparer différentes configurations OWC.

III.1.2 Rôle stratégique de la simulation dans les systèmes OWC

La simulation constitue un outil incontournable dans la phase de développement des systèmes OWC. Elle permet d'évaluer les performances du système en amont de toute réalisation matérielle, évitant ainsi les coûts et délais liés à la fabrication de prototypes successifs. En simulant divers scénarios et configurations, les ingénieurs peuvent prédire le comportement du système dans des contextes variés, optimiser les paramètres et anticiper les contraintes techniques.

Par exemple, simuler différentes longueurs de liaison permet d'analyser l'évolution du taux d'erreur binaire (BER) ou du facteur de qualité, et d'ajuster les éléments du système en conséquence. En outre, le simulateur permet d'expérimenter plusieurs techniques de modulation, conceptions de récepteurs et conditions de propagation sans avoir recours à des essais physiques coûteux.

Les systèmes OWC étant appelés à fonctionner dans des milieux très hétérogènes, la modélisation d'environnements complexes (atmosphère, intérieur, sous-marin...) est essentielle. Grâce à des outils comme OptiSystem, il devient possible de représenter des phénomènes tels que la diffraction, la diffusion ou l'absorption, et d'évaluer leur impact sur la transmission.

La simulation permet donc un développement rapide, économique et flexible des solutions OWC. Elle contribue également à valider les modèles théoriques, en comparant les résultats simulés aux prédictions analytiques, renforçant ainsi la fiabilité des choix de conception. Enfin, en identifiant les points faibles potentiels dès la phase de test virtuel, elle améliore la robustesse des systèmes avant leur déploiement réel. [57.59]

III.2 OptiSystem : Présentation générale

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 coûteuses en temps, il en résulte que ces tâches ne peuvent désormais être effectuées rapidement et efficacement qu'avec l'aide de nouveaux outils logiciels. 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 contrôle la disposition optique des composants, les modèles et ces présentations graphiques.

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, La démarche à suivre se décompose en deux étapes : [40]

- Construire le schéma bloc.
- Analyser le schéma. Les figures III.1 à III.5 illustrent l'interface et la configuration d'OptiSystem.



Figure III.1 : OptiSystem simulateur [49]

III.2.1 Historique et évolution

L'OptiSystem est développé par la société canadienne Optiwave Systems Inc. depuis sa fondation en 1994, OptiSystem est un logiciel de référence pour la conception de réseaux de communication optique, commercialisé autour de l'an 2000. Son évolution constante, marquée par l'intégration de technologies telles que les circuits photoniques et l'intelligence artificielle (version 22.1 en 2025), en fait un outil puissant et actuel. Adopté dans plus de 70 pays par les communautés académiques et industrielles, y compris des institutions de défense et des centres de recherche, OptiSystem est reconnu pour sa précision

et sa capacité à simuler des environnements complexes. La transparence d'Optiwave se manifeste par la

publication de notes de version exhaustives, permettant aux utilisateurs de suivre les avancées, d'exploiter pleinement les nouvelles fonctionnalités et de garantir la compatibilité de leurs travaux[42].

III.2.2 Caractéristiques principales

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque de composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, ces composants s'intègrent aux équipements de test et de mesure des différents fournisseurs.
- Les outils de visualisation avancée produisent le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des visualiser sur le moniteur au même port[43].

III.2.2.a Interface graphique

L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale répartie en plusieurs parties :

- Bibliothèque.
- Editeur du layout.
- Projet en cours. :

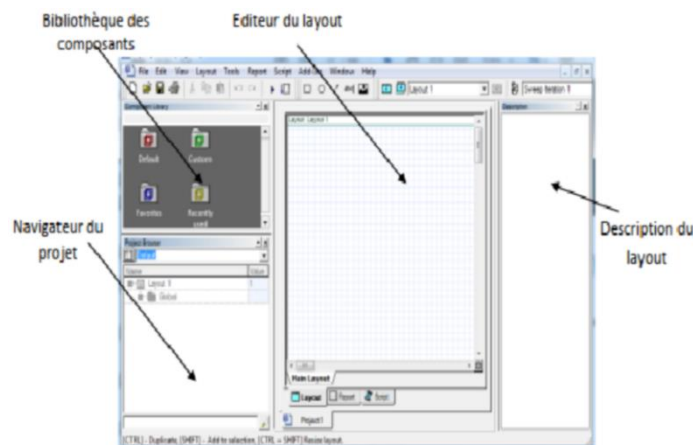


Figure III.2 : L'interface de travail sur OptiSystem [48]

III.2.2.b. 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. [48]

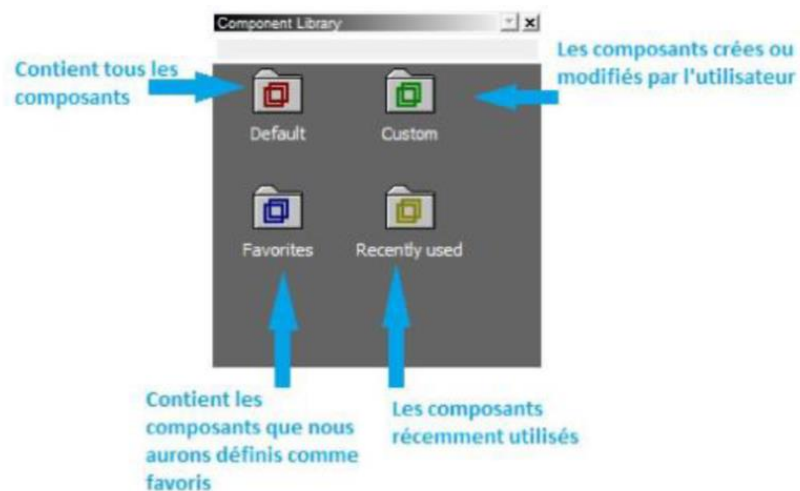


Figure III.3 : Bibliothèque des composants [48]

III.3.2.c. Navigateur du Projet:

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.

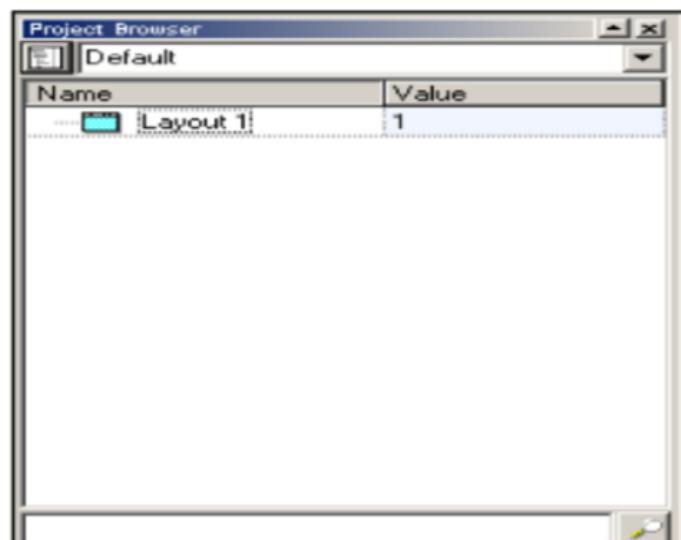


Figure III.4 : Navigateur du Projet[48]

III.3.2.d. 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.

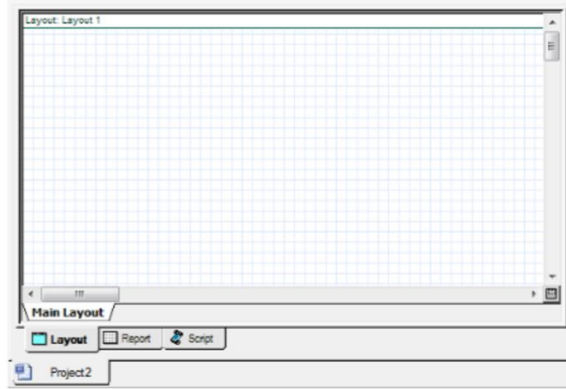


Figure III.5: Fenêtre de présentation du projet en cours [48]

III.3.2.e. Projet en cours (description du layout)

Visualise et affiche les divers fichiers et composants correspondants au projet en cours .

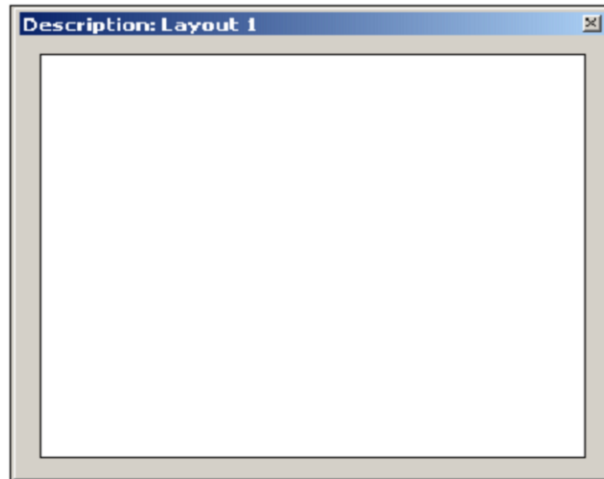


Figure III.6: Fenêtre de description du projet en cours [48]

III.3.2.f. Lancer une simulation

Pour exécuter une simulation, procédez comme suit.

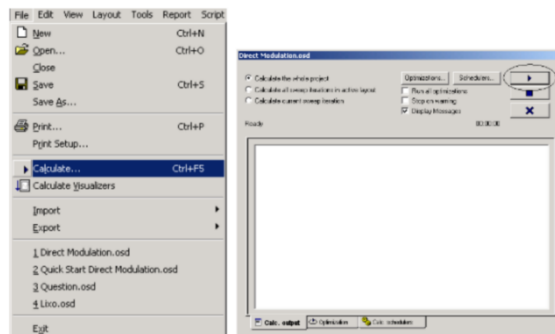


Figure III.7: Fenêtre montre le lancement de la simulation [48]

III.4. Paramètres clés à évaluer dans une simulation OWC

III.4.1. Taux d'erreur binaire (BER):

Le taux d'erreur binaire (BER) constitue un indicateur fondamental de la fiabilité d'un lien de communication. Il représente le rapport entre le nombre de bits erronés reçus et le nombre total de bits transmis. Dans OptiSystem, cette mesure est obtenue à l'aide d'un analyseur BER, qui compare les données envoyées à celles reçues après transmission. Un BER faible indique une bonne performance du système, tandis qu'un BER élevé peut compromettre la qualité de la liaison, 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, notamment dans les applications sensibles telles que les communications de données à haut débit, les services de téléphonie ou la vidéo en temps réel.

III.4.2. Facteur de qualité du signal (Q)

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 :

$$Q = \frac{u_1 - u_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \dots\dots\dots \text{III.1.}$$

Avec, u_1 et u_0 représentent les niveaux moyens du signal utile (symboles « 1 » et « 0 »), σ_1 et σ_0 représentent les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens (bruit) dans le diagramme de l'oeil qui retrace le signal mesuré.

III.4.3. Diagramme de l'oeil

On utilise souvent en télécommunications, la méthode dite : diagramme de l'oeil pour décrire la dégradation par le bruit et la dispersion du signal numérique. Le diagramme de l'oeil 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'oeil. 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 70 sommes de tous les signaux aboutit à une forme de signal appelé oeil : Sans bruit les traces se superposent exactement, quand le bruit augmente, les signaux varient et la trace s'épaissit.

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

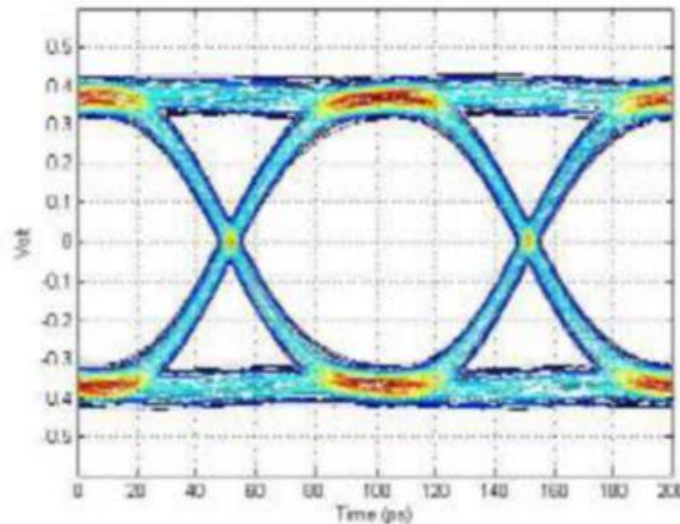


Figure III.8 : Exemple d'un diagramme de l'oeil [48]

III.4.4 Utilisation de la fonction d'analyse d'OptiSystem

III.4.4.a Outils d'analyse et de rapport

OptiSystem propose une gamme étendue d'outils d'analyse intégrés pour examiner les signaux optiques simulés. Parmi ces outils figurent l'analyseur de spectre optique, l'oscilloscope, le diagramme de l'œil, le diagramme de constellation, ainsi que l'analyseur de BER (Bit Error Rate). Ces visualiseurs

Permettent d'observer la forme d'onde temporelle du signal, d'analyser sa composition spectrale, de détecter les distorsions et interférences, et de mesurer la qualité globale de la transmission.

Le diagramme de l'œil, par exemple, est utilisé pour évaluer la dispersion temporelle et la stabilité du signal, tandis que le diagramme de constellation permet d'identifier les erreurs de modulation dans les systèmes multi-niveaux tels que QAM. L'analyseur de BER, quant à lui, mesure le taux d'erreur binaire en sortie du système, fournissant un indicateur direct de la fiabilité de la liaison.

III.4.4.b Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats générés par OptiSystem nécessite une compréhension approfondie des principes de la communication optique. Par exemple, un diagramme de l'œil « fermé » indique une forte distorsion du signal ou un bruit important, tandis qu'un diagramme bien « ouvert » traduit une bonne qualité de transmission.

Les diagrammes de constellation permettent de visualiser les symboles modulés dans l'espace complexe. Un nuage de points bien défini indique une modulation efficace, alors que des dispersions ou chevauchements suggèrent des interférences, du bruit ou des erreurs de synchronisation.

Les valeurs simulées de BER et du facteur Q doivent être analysées en tenant compte des exigences de l'application. Un BER inférieur à 10^{-9} est généralement considéré comme excellent dans les systèmes optiques. Une faible valeur du facteur Q signale une dégradation de la qualité du signal, justifiant une

réévaluation de certains paramètres du système (modulation, puissance d'émission, distance, etc.).

Ces outils d'analyse offrent ainsi une compréhension multidimensionnelle des performances d'un système OWC, permettant d'identifier les points faibles du design, d'optimiser les configurations et d'assurer une transmission fiable dans diverses conditions. [48]

III.5 Études de Cas

III.5.1 Calcul le bilan du liaison

Le bilan de liaison est une méthode analytique permettant de quantifier le rapport signal sur bruit (C/N) à la sortie d'un récepteur dans une communication satellitaire, en tenant compte des paramètres influençant la puissance du signal et du bruit. Il intègre des facteurs tels que la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE), le facteur de mérite G/T, et les pertes de propagation.

III.5.1.a. Rapport signal sur bruit (C/N₀)

Le rapport C/N₀ représente la puissance de la porteuse (C) divisée par la densité spectrale de bruit (N₀), exprimée en dB·Hz. Il caractérise la qualité de la liaison en tenant compte de la bande passante. [48]

$$\frac{s}{B} = \frac{Ps}{Pb} \dots\dots\dots \text{III.2}$$

$$\frac{S}{B} = \left(\frac{US}{UB}\right)^2 \dots\dots\dots \text{III.3}$$

$$\frac{S}{B} (db) = 10 \log \frac{S}{B} \dots\dots\dots \text{III.4}$$

III.5.1.b. Rapport énergie par bit sur bruit (E_x/N₀)

Le rapport E_x/N₀ mesure l'énergie par bit divisée par la densité spectrale de bruit, exprimé en dB. Il est utilisé pour évaluer l'efficacité des modulations numériques en termes de taux d'erreur binaire (TEB). [48]

$$\frac{C}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} \times R \dots\dots\dots \text{III.5}$$

$$\frac{C}{N_0} (db) = \frac{E_b}{N_0} (db) + 10 \log R \dots\dots\dots \text{III.6}$$

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

III.5.1.c. Affaiblissement de propagation (AP)

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. [48]

$$A_p = AEL - L_{fs} \text{ (dB)} \dots\dots\dots \text{ III.7}$$

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

III.5.1.d. Affaiblissement d'espace libre (AEL)

L'affaiblissement d'espace libre (AEL) résulte de la dispersion de l'onde électromagnétique dans l'espace. Il dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur ainsi que de la longueur d'onde. [48]

$$A = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \dots\dots\dots \text{ III.8}$$

Avec :

- A : affaiblissement d'espace libre entre antennes isotropes, exprimé en dB
- d : distance entre l'émetteur et le récepteur exprimée en mètres
- λ : longueur d'onde du rayonnement, exprimée en mètre.

III.5.1.e. Gain d'une antenne

Le gain d'une antenne parabolique est le rapport entre la puissance captée par l'antenne réelle et celle captée par une antenne isotrope à la même distance, en espace libre. [48]

$$T_A = T_s + (1 - \eta)T_0 \dots\dots\dots \text{ III.9}$$

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \dots\dots\dots \text{ III.10}$$

- D : diamètre de l'antenne parabolique.
- η : Efficacité de l'antenne (rendement) généralement entre 50% et 70%.
- λ : Longueur d'onde (en m, λ=c/f, c=3.10⁸ m/s).
- Alors en décibel :

$$G[dB] = 10 \log \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \dots\dots\dots \text{ III.11}$$

III.5.1.f. Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)

La PIRE est la puissance nécessaire à une antenne isotrope pour produire la même densité de flux que l'antenne réelle dans une direction donnée. [48.59]

$$\text{PIRE} = P_e G_e \dots\dots\dots \text{ III.12}$$

La PIRE en décibel est :

III.5.1.g. 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 [48]

$$Pd(W/m^2) = \frac{PeGe}{(4\pi d^2)} \dots\dots\dots III.14$$

- P_e : Puissance d'émission.
- G_e : Gain d'émission.

III.5.1.h. Facteur de mérite G/T

Le facteur de mérite G/T quantifie la performance du récepteur en combinant le gain de l'antenne et la température de bruit du système.

III.5.1.i. Capacité du canal (Shannon-Hartley)

La capacité du canal définit le débit maximal théorique sans erreur, en fonction de la bande passante et du rapport signal sur bruit [48] :

$$C = D * \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \dots\dots\dots III.15$$

Avec

- C : La capacité de canal (bit/sec).
- w : La taille de canal (Hz).
- S/N : Le rapport signal sur bruit.

III.5.1.j. Température de bruit

La température de bruit du système est liée à la densité spectrale de bruit thermique [48]

$$N_0 = K * T_B \dots\dots\dots III.16$$

$$N_0 [db] = 10 \log(K) + 10 \log(T_B) \dots\dots\dots III.17$$

Avec :

- 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.

III.5.1.k. Efficacité spectrale

L'efficacité spectrale mesure le débit de données par unité de bande passante. [48]

$$\text{Eff} = \frac{Db}{B} \text{ (bits/s/Hz)} \dots\dots\dots \text{III.18}$$

III.5.1.l. Bilan de liaison pour la voie montante

Le bilan de liaison pour la voie montante calcule le rapport C/N₀ à l'entrée du récepteur satellite.

Bilan de liaison voie montante [48]

$$\frac{C}{N_0} = \frac{PIR_{leo} * G_{geo} * L_m}{KT} \dots\dots\dots \text{III.19}$$

Avec :

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 :

$$PIRE[\text{dBw}] = G_e [\text{dBi}] + P_e [\text{dBw}] \dots\dots\dots \text{III.20}$$

III.5.1.m. 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 [48] :

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_T} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{up}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{down}} \dots\dots\dots \text{III.21}$$

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

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T = \frac{C_{up}}{N_{0 up}} \dots\dots\dots \text{III.22}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{down} = \frac{C_{down}}{N_{0 down}} \dots\dots\dots \text{III.23}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T = \frac{C_{down}}{N_{0 T}} \dots\dots\dots \text{III.24}$$

-

Avec

N₀ : Densité spectrale équivalente de bruit (W/Hz).

$$N_0 = k * T \dots\dots\dots III.25$$

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

$$N = N_0 * B_N \dots\dots\dots III.26$$

N : Bruit total

III.5.1.n. Puissance reçue (Équation de Friis)

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

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t(\theta_t, \varphi_t) G_r(\theta_r, \varphi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2) |\alpha_t \alpha_r|^2 e^{-\alpha R} \dots\dots\dots III.27$$

$$P_r = \frac{A_r}{4\pi R^2} = P_e G_e G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \dots\dots\dots III.28$$

- G_t, G_r : Sont des gains linéaires des antennes d'émission et réception.
- Γ_t et Γ_r : Sont les coefficients de réflexion des antennes.
- α_t et α_r : Sont les vecteurs de polarisation des antennes.
- α : est le coefficient d'absorption du milieu.
- R : est la distance émetteur-récepteur.

III.5.2. Calcul de bilan de liaison

Dans cette partie nous allons aborder le calcul du bilan de liaison lors d'une communication entre un satellite LEO et un satellite GEO avec les paramètres suivants (voir table 4) :

Paramètres	Valeurs
Tx puissance optique [w]	0.1
Tx puissance optique [dBm]	20
Tx gain [dBi]	107.5
Rx gain [dBi]	111.94
Perte de pointage [dB]	1.6
Atténuation atmosphérique [dB]	2.6
Fréquence [THz]	195
Longueur d'onde [nm]	1538
Diamètre d'ouverture d'Émetteur	25 cm
Diamètre d'ouverture du récepteur	15 cm
Température	80K

Tableau 4: Les paramètres du bilan de liaison [48]

Le tableau 4 regroupe les principaux paramètres physiques et techniques utilisés pour le calcul du bilan de liaison. On y retrouve notamment la puissance optique émise, les gains d'antenne, les pertes diverses et les caractéristiques du canal optique

Distance (km)	AEL (dB)	AP (dB)	Puissance reçue (dBm)	PIRE (dBm)	(C/N ₀) (dB.HZ)
35400	289.23	293.42	-53.98	127.50	125.59
35600	289.27	293.47	-54.03	127.50	125.54
35800	289.32	293.52	-54.08	127.50	125.49
36000	289.36	293.57	-54.13	127.50	125.44

Tableau 5 : Les résultats finaux de bilan de liaison

Le tableau 5 présente les résultats du calcul de bilan de liaison pour différentes distances allant de 35 400 à 36 000 km. Ces données incluent la perte totale, la puissance reçue et les rapports signal/bruit, permettant une évaluation complète de la qualité de la transmission.

Pour modéliser une liaison OWC (Optical Wireless Communication) entre un satellite en orbite terrestre basse (LEO) et un satellite géostationnaire (GEO) à l'aide du logiciel OptiSystem, voici un exemple pratique et structuré. Cette simulation repose sur des concepts clés des communications optiques intersatellites (IsOWC) et prend en compte les spécificités des orbites **LEO et GEO**, ainsi que les paramètres critiques comme la distance, les pertes, et les performances du système.

Pour l'émetteur (satellite LEO) contient un laser à onde continue (**CW**) utilisé comme source de lumière, est réglé sur une fréquence de **195 THz pour une longueur d'onde de 1538 nm** avec une puissance **20 dBm**. Un signal de données à transmettre est généré par un générateur de séquences de bits pseudo-aléatoires, 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 les distances **35400 km, 35600 km, 35800 km et 36000 km**.

La partie du canal de propagation contient un canal de OWC de fréquence **195 THz** qui 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 : **Gain de l'émetteur (G_t) : 111.94dBi** et **Gain du récepteur (G_r) : 107.5dBi**

. Les antennes de l'émetteur et du récepteur sont également supposées idéales.

Les pertes supplémentaires sont de **2.6 dB**. Avec la valeur des erreurs de pointage est de **1 μ rad (1.6 dB)**.

La partie de récepteur (un satellite GEO) contient des amplificateurs optiques pour amplifier le signal reçu et un **Filtre optique gaussien** pour réduire les composantes hors bande et 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*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.

Pour La simulation concerne une liaison optique sans fil (OWC) entre un satellite en orbite basse (LEO) et un satellite en orbite géostationnaire (GEO) sur les **distances 35400 km, 35600 km, 35800 km et 36000 km**, Le but est d'évaluer la performance du système en termes de spectre optique, puissance reçue, facteur Q et taux d'erreurs binaires (BER). La figure III.9 représente la structure proposée pour la liaison LEO-GEO.

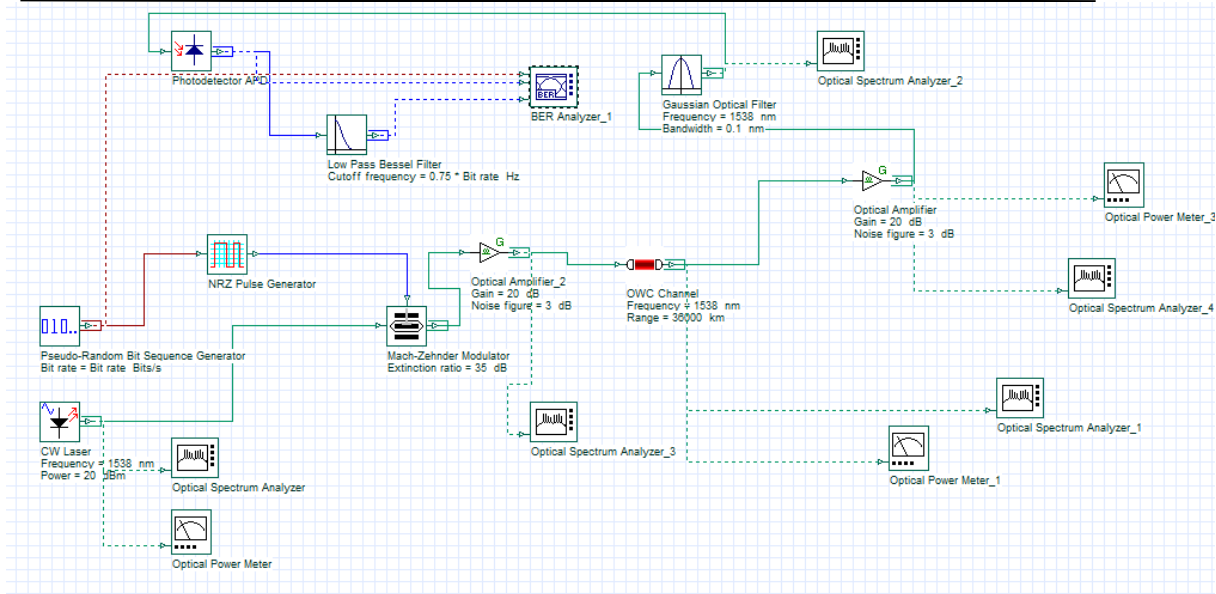


Figure III.9 : Schéma de la structure proposé pour intercommunication satellitaire LEO-GEO.

III.5.2.1. Scénario et configuration:

Le tableau 6 fournit les paramètres de simulation adoptés pour modéliser une liaison optique avec une modulation NRZ à la longueur d'onde de 1538 nm. Ces informations permettent de reproduire le scénario expérimental dans OptiSystem de manière rigoureuse

Paramètres	Valeurs
Laser	CW
Longueur d'onde	1538 nm
Puissance d'émission	20 dBm
Distance	35400 km, 35600 km, 35800 km, 36000 km
Modulation	NRZ
Photo de détecteur	APD
Erreurs de pointage	1 urad
Pertes supplémentaires	2.6 dB
Diamètre d'ouverture d'Émetteur	25 cm
Diamètre d'ouverture de récepteur	15 cm
Atténuation	0.008 dB/km

Tableau 6: les paramètres de simulation pour une liaison à 1538 nm en utilisant modulation NRZ.

III.5.2.2 Résultats et interprétation :

III.5.2.2.a. Pour une Intercommunication satellitaire LEO-GEO pour une distance de 35400 km

Cette figure montre le spectre de puissance optique transmise de la liaison optimisée pour une portée de 35400 km à la longueur d'onde de fonctionnement 1538 nm.

La puissance optique transmise est de 20 dbm, calculée par le power meter et cette puissance transmise à la longueur d'onde de fonctionnement 1538 nm est également la même pour les autres distances : 35400 km, 35600 km, 35800 km, 36000 km. La figure III.10 montre la puissance optique transmise pour une portée de 35400 km.

Pour une longueur d'onde de 1.538 μm , la valeur maximale de la puissance doit être égale à 25.6832 dBm.

Nous voyons que la valeur de la puissance Min doit être de -105.985 dBm et la puissance Max est de 25.6832 dBm.

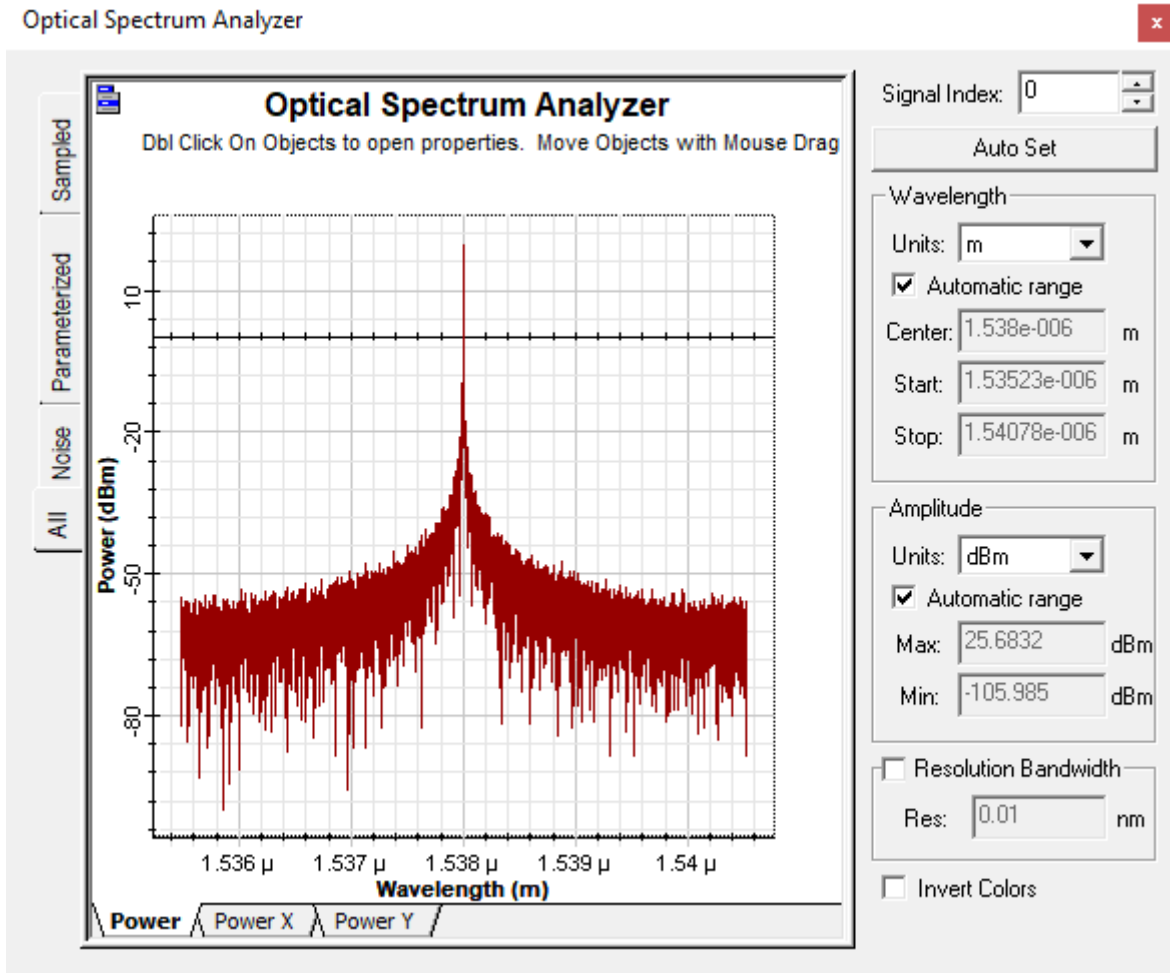


Figure III.10 : Puissance optique transmise pour une portée de liaison de 35400km à une longueur d'onde 1538nm.

Les Figure III.11 et III.12 montrent la Puissance optique reçue et la qualité de facteur Q avec un diagramme l'oeil pour une portée de liaison de 35400 km à une longueur d'onde de 1538nm coté photodétecteur

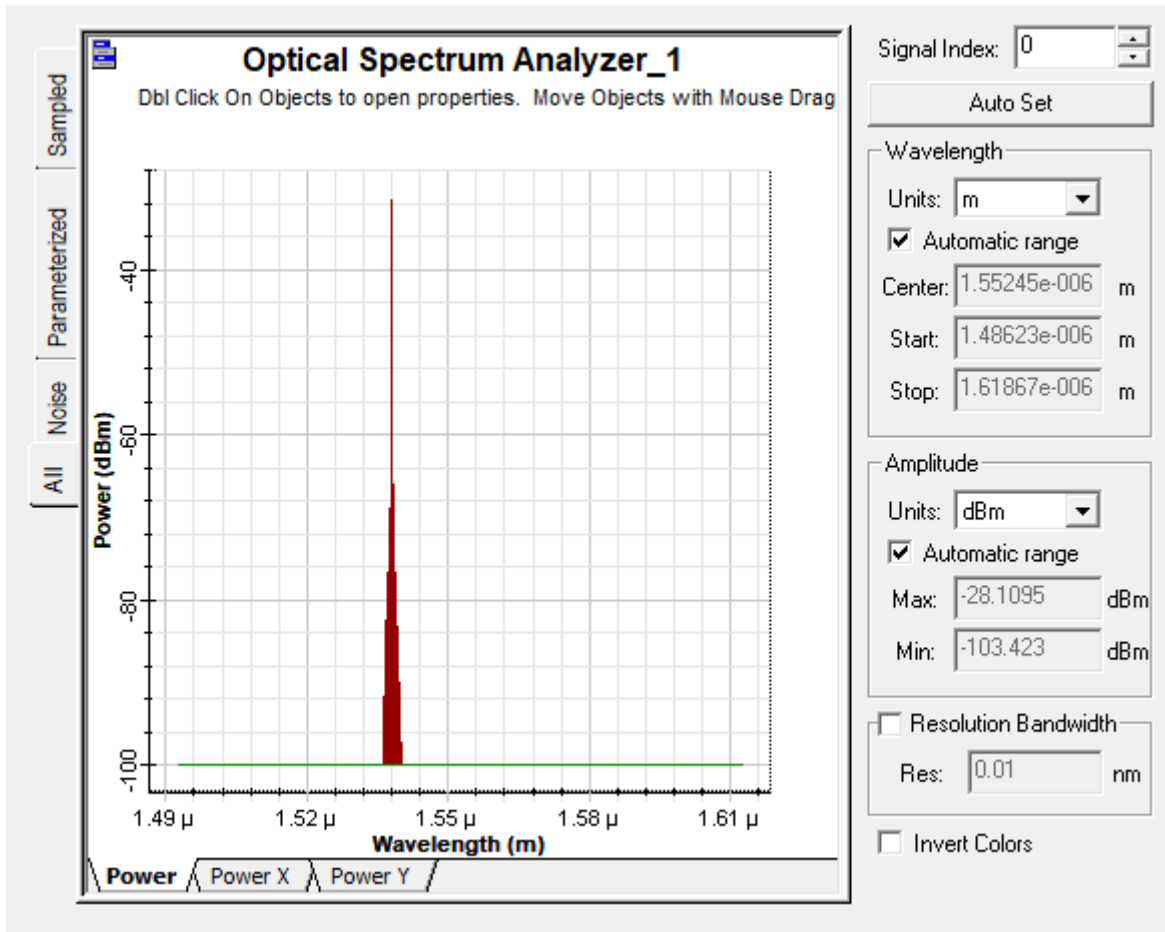


Figure III.11: Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 35400 km à une longueur d'onde de 1538nm coté photodétecteur.

Cette figure montre le diagramme de l'œil et la qualité de facteur Q dont la distance est de 35400 km, et la longueur d'onde est de 1538 nm en utilisant la modulation NRZ, avec une puissance d'émission de 20 dBm. La figure III.12 illustre la qualité du facteur Q avec le diagramme de l'œil pour cette distance.

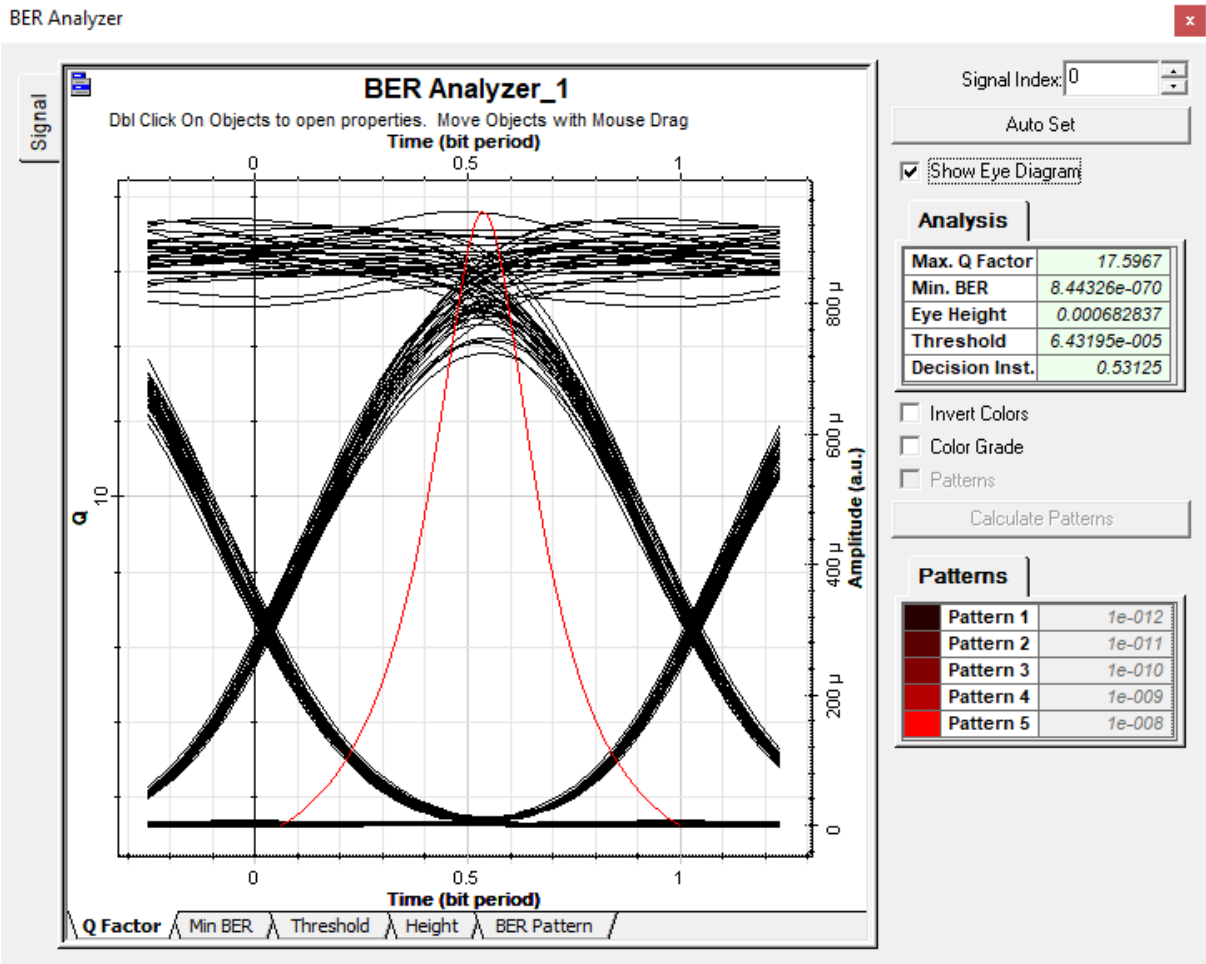


Figure III.12 : La qualité de facteur Q avec un diagramme l’oeil dans une distance de 35400 km.

Le Max facteur Q pour 1538 nm est de 17.5967 et le MINI BER est de 8.44326e-070

Interprétation : Le facteur Q élevé et l'absence d'erreurs indiquent un système extrêmement performant, bien aligné et avec très peu de bruit.

III.5.2.2.b. Pour Intercommunication satellitaire LEO-GEO pour une distance de 35600 km

Cette figure III.13 montre le spectre de puissance optique reçu de la liaison, optimisé pour une portée de 35600 km à la longueur d'onde de 1538 nm.

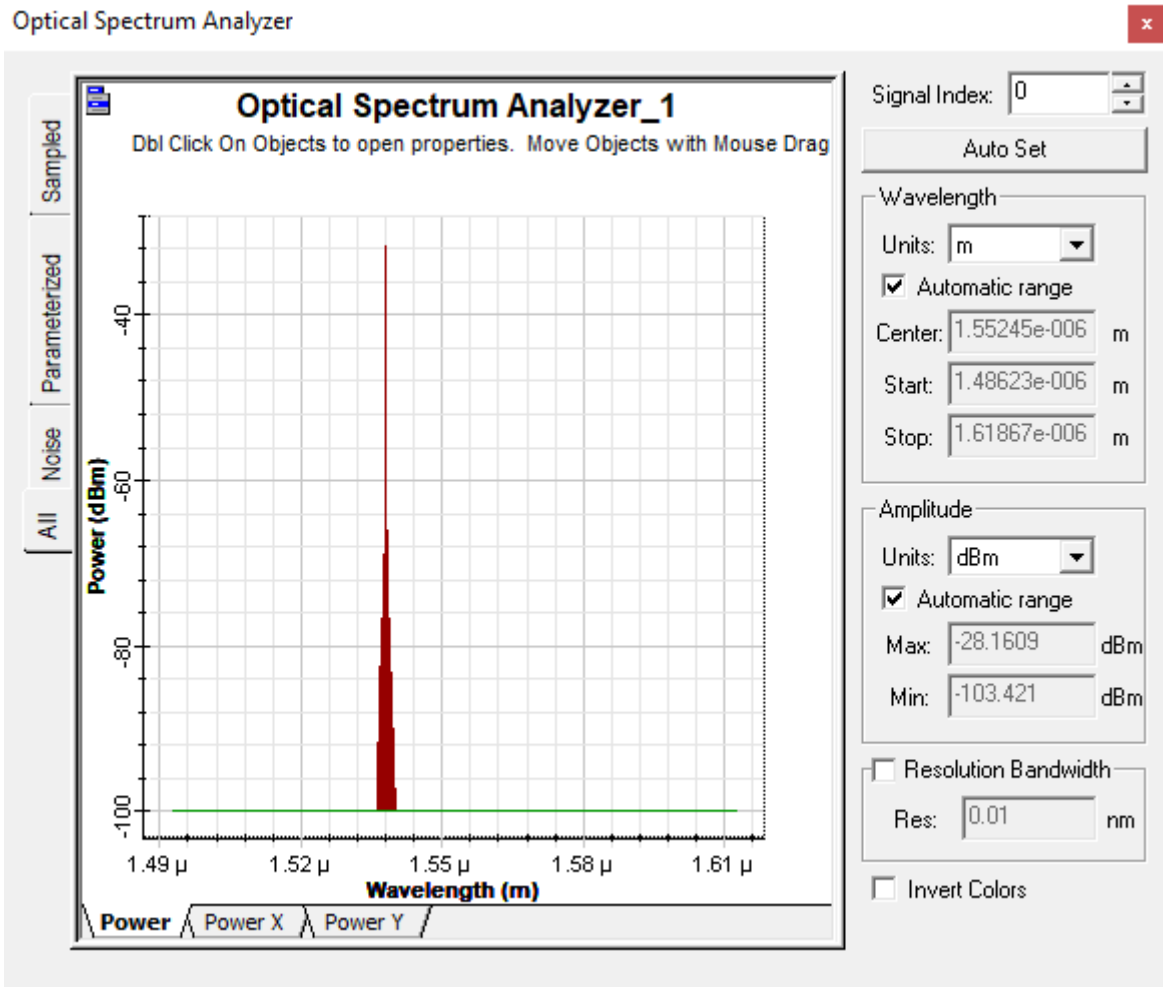


Figure III.13 : Puissance optique reçu pour une portée de liaison de 35600km à une longueur d'onde 1538nm

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

La valeur de puissance maximale est de -28,1609 dBm et la puissance minimale doit être de -103,421 dBm.

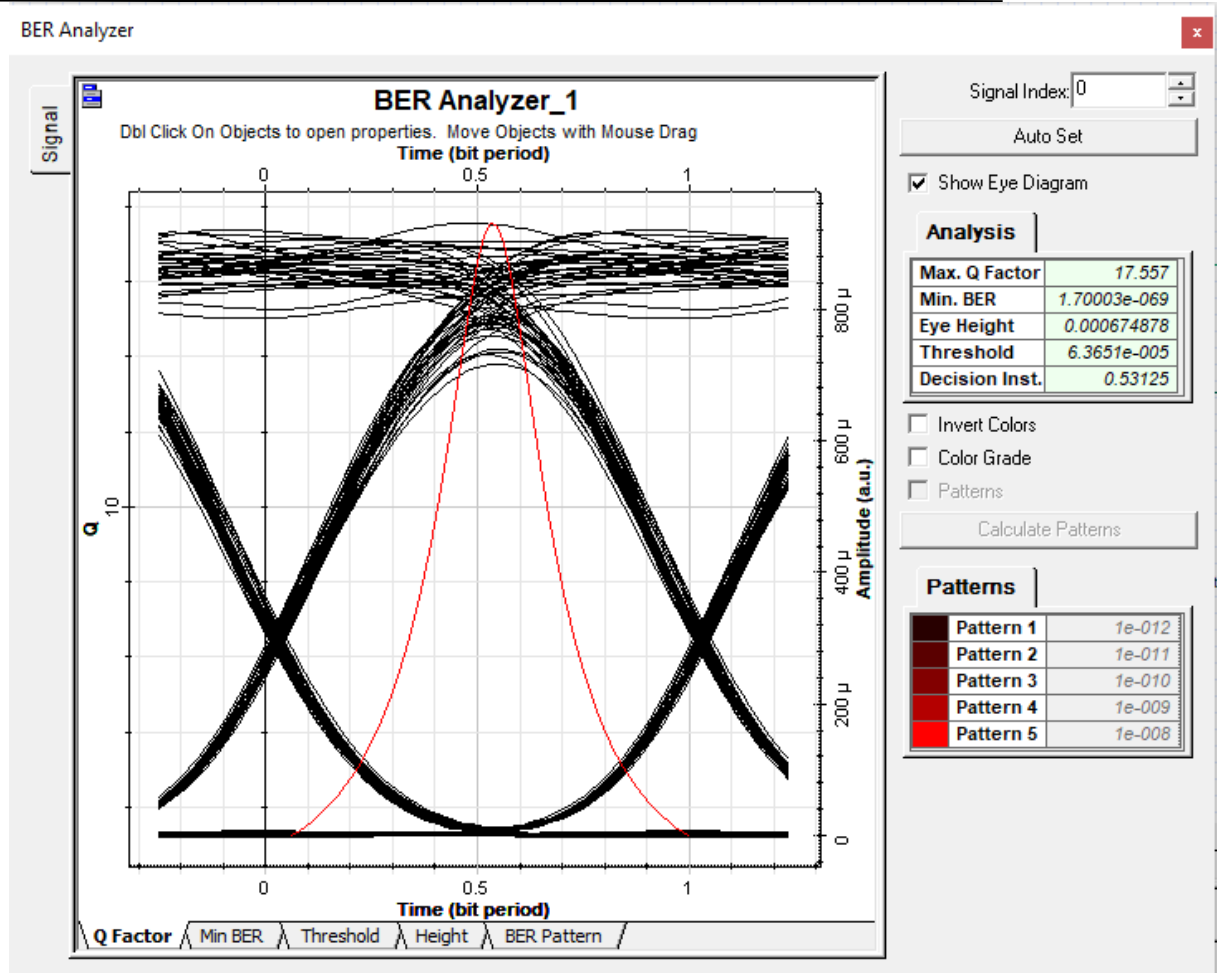


Figure III.14: La qualité de facteur Q avec un diagramme l'oeil dans une distance de 35600 km.

Cette figure III.14 montre le diagramme de l'oeil et la qualité du facteur Q sur une distance de 35600 km avec la longueur d'onde de 1538 nm en utilisant la modulation NRZ, avec une puissance d'émission de 20 dBm, Dans ce cas, on produit un minimum d'erreurs avec un facteur Q enregistré de 17.557 et de BER égal à 1.70003e-069.

Interprétation : Le facteur Q élevé et l'absence d'erreurs indiquent un système extrêmement performant, bien aligné et avec très peu de bruit.

III.5.2.2.c Intercommunication satellitaire LEO-GEO pour une distance de 35800 km

La figure III.15 montre la puissance optique reçue pour une liaison de 35 800 km. Ce résultat est crucial pour évaluer l'impact de l'augmentation de distance sur la performance du lien optique.

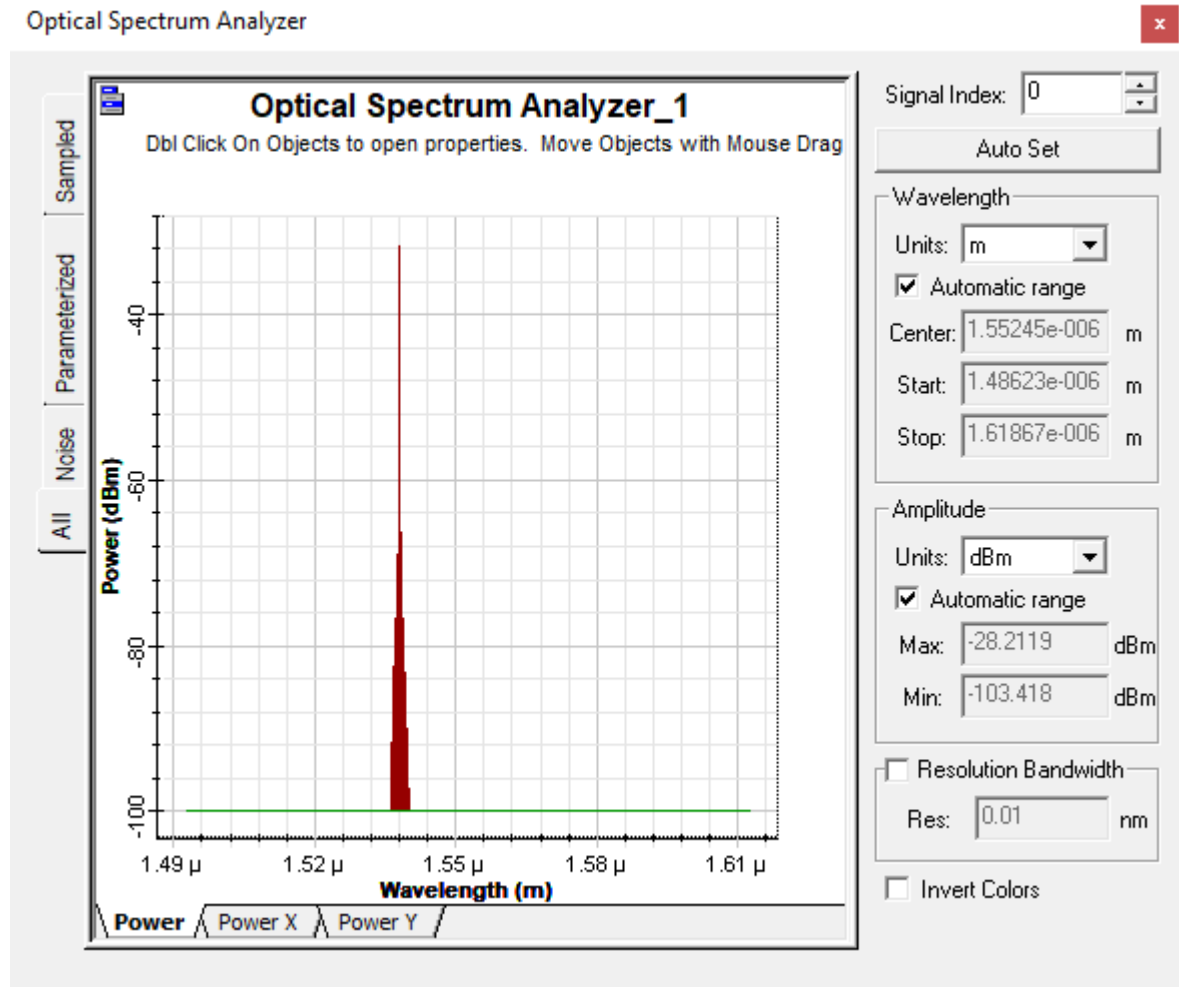


Figure III.15: Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 35800 km à une longueur d'onde de 1538nm

La valeur de la puissance reçue maximale est -28.2119 dBm et la puissance reçue minimale doit être égale à -103,418 dBm.

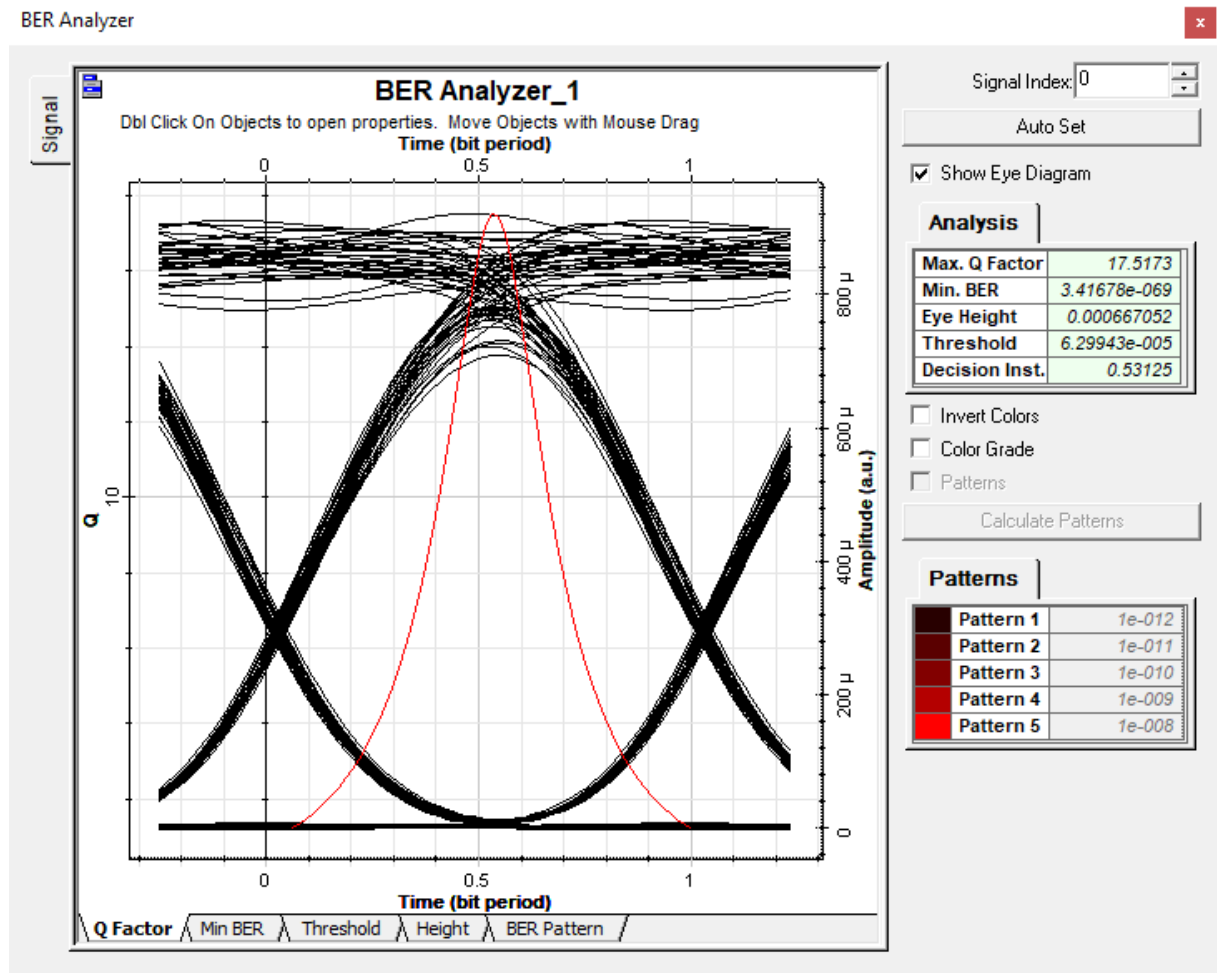


Figure III.16: La qualité de facteur Q avec un diagramme l’œil dans une distance de 35800 km.

Cette figure III.16 illustre le diagramme de l’œil et la qualité du facteur Q sur une distance de 35800 km et la longueur d’onde de 1538 nm en utilisant la modulation NRZ, avec une puissance d’émission de 20 dBm, Dans ce cas, on produit un minimum d’erreurs avec un facteur Q enregistré de 17.5173 et de BER égal à 3.41678e-069

Interprétation : Le facteur Q élevé et l’absence d’erreurs indiquent un système extrêmement performant, bien aligné et avec très peu de bruit.

III.5.2.2.d. Intercommunication satellitaire LEO-GEO pour une distance de 36000 km

Cette figure montre spectre de puissance optique reçu de la liaison optimisée pour une portée de 36000 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

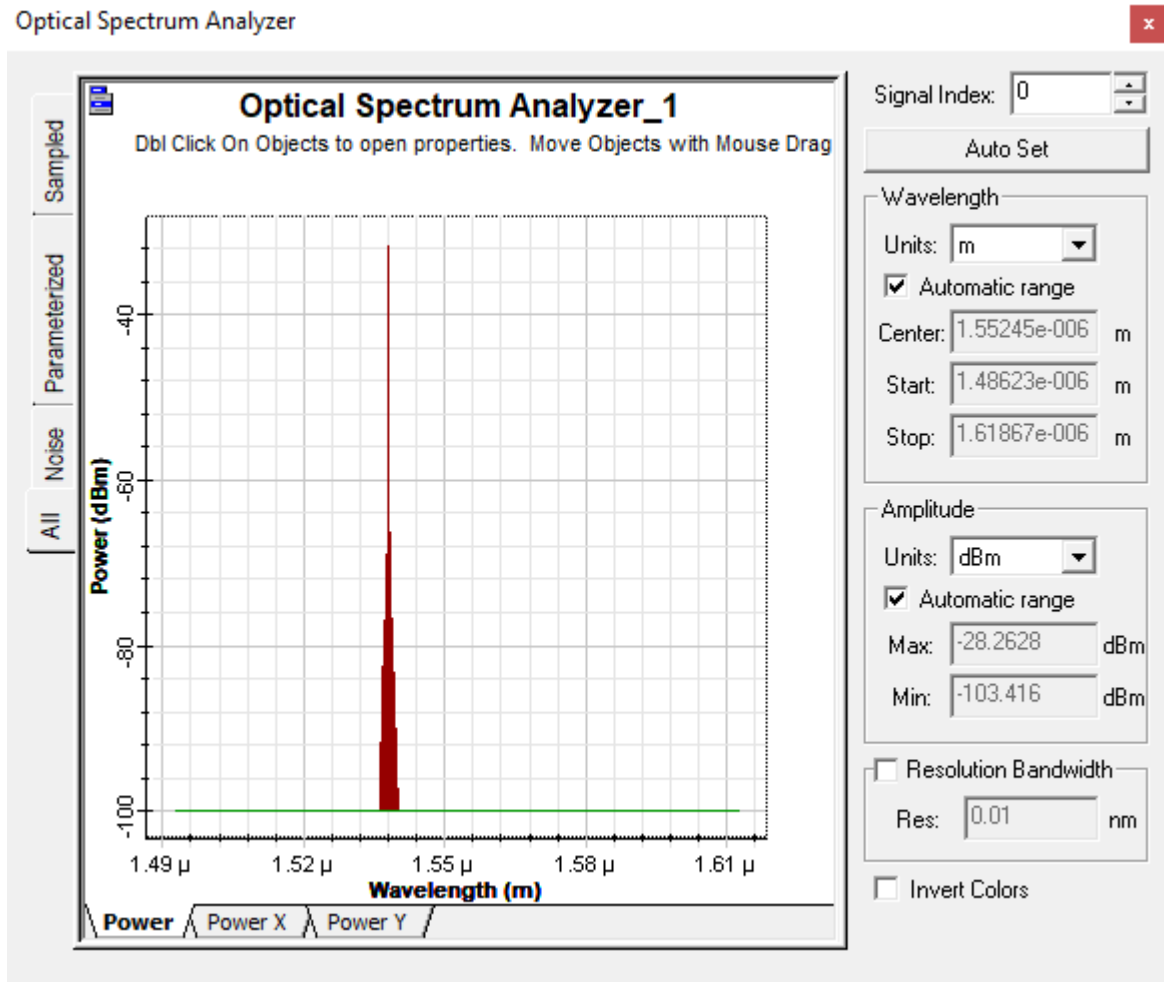


Figure III.17: Puissance optique reçue pour une portée de liaison de 36000 km à une longueur d'onde de 1538nm

La figure III.17 présente à nouveau la puissance optique reçue pour une distance de 35 600 km., la valeur de puissance maximale doit être de -28,2628 dBm et la valeur minimale doit être de -103,416 dBm.

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

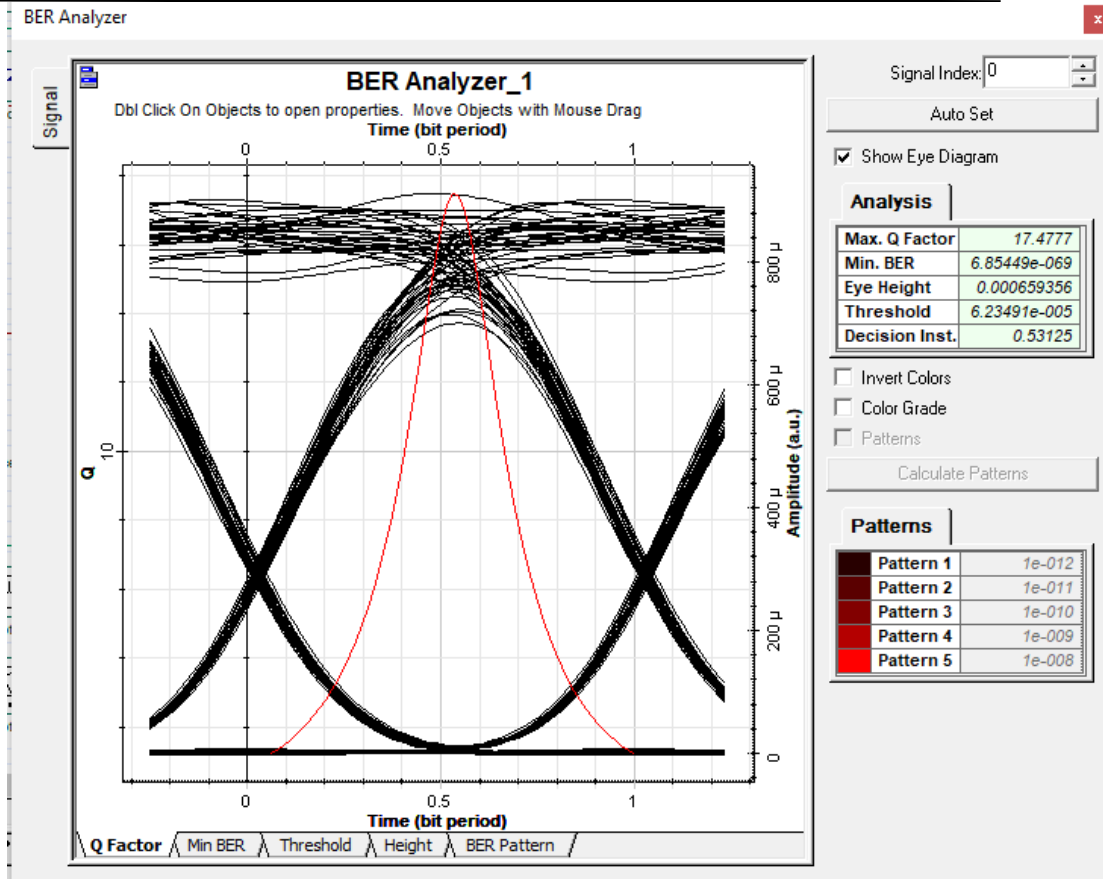


Figure III.18: Un diagramme l’œil dans une distance 36000 km

La figure III.18 présente le diagramme de l’œil et la qualité du facteur Q sur une distance de 36000 km et la longueur d’onde de 1538 nm en utilisant la modulation NRZ, avec une puissance d’émission de 20 dBm, Dans ce cas, on produit un minimum d’erreurs avec un facteur Q enregistré de 17.4777 et de BER égal à 6.85449e-069

Interprétation : Le facteur Q élevé et l’absence d’erreurs indiquent un système extrêmement performant, bien aligné et avec très peu de bruit.

III.5.2.2.e. Résultats de l’analyse:

Le tableau 7 synthétise les performances finales du système simulé. Il met en évidence l’excellent facteur Q, le gain élevé, ainsi qu’un BER quasi nul, validant ainsi la faisabilité d’une liaison LEO-GEO longue distance avec un haut niveau de fiabilité

Distance [km]	Le gain [dB]	Q facteur	Min BER	Puissance reçue [dBm]	
				Max	Min
35400	219.44	17.5967	8.44326e-70	-28.11	-103.42
35600	219.44	17.557	1.70003e-69	-28.16	-103.42
35800	219.44	17.5173	3.41678e-69	-28.21	-103.42
36000	219.44	17.4777	6.85449e-69	-28.26	-103.42

Tableau 7: les Résultats finaux de l’analyse.

Les résultats montrent que le système de communication optique LEO-GEO simulé est extrêmement performant, même sur des distances de 35 400 à 36 000 km. Le gain constant et élevé (219,44 dB) indique une conception optimisée des télescopes optiques, compensant efficacement les pertes d'espace libre. Le facteur Q, bien qu'en légère diminution, reste largement supérieur aux seuils critiques, garantissant une transmission sans erreur significative (BER quasi nul). La légère baisse de la puissance maximale reçue avec la distance est attendue, mais elle reste dans une plage acceptable, grâce à la directivité élevée du faisceau laser. Ces résultats valident la faisabilité d'une liaison optique LEO-GEO à très longue portée avec des performances exceptionnelles. La légère dégradation des paramètres (Q, BER, puissance reçue) avec l'augmentation de la distance est conforme aux attentes théoriques (augmentation de l'AEL) et reste négligeable dans cette plage de distances. Pour optimiser davantage le système, des ajustements comme une réduction des erreurs de pointage ou une augmentation de la puissance d'émission pourraient être envisagés, bien que les performances actuelles soient déjà excellentes pour des applications telles que les communications inter-satellites à haut débit.

III.5.2.2.f. Comparaison avec autre simulation

M.Eman El-Gammal, “Multiple Transceivers Inter-satellite Optical Wireless Communication System” Cette étude de Menoufia University modélise sous OptiSystem un réseau multi-transceivers reliant des satellites LEO, MEO et GEO sur des distances atteignant 36 000 km. Les auteurs montrent que, selon la configuration (nombre de transceivers, diamètres de télescopes, puissance laser), le Q-factor se situe entre 10 et 12 (linéaire) et le BER atteint de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-13} . [53]

Comparaison : notre Q $\approx 17,5$ dépasse largement ces valeurs (soit +50 % à +75 %), et notre BER ($\sim 10^{-70}$) est astronomiquement plus faible, soulignant le caractère « plafond » de nos conditions idéalisées

Une autre étude d'un mémoire : **Modeling and performance study of inter-satellite optical wireless communication system” (Nov. 2023)** analyse un lien LEO–GEO sous OptiSystem avec modulations NRZ et RZ, . Les résultats indiquent un Q-factor d'environ 8–9 et un BER de 10^{-10} à 10^{-11} . [54]

Comparaison : notre Q-factor est presque le double et notre BER infiniment plus bas.

On trace des graphiques pour les paramètres (gain, facteur Q, BER minimal, puissance reçue) en fonction de la distance (35 400 km, 35 600 km, 35 800 km, 36 000 km) en utilisant les données du Tableau 7.

Pour les graphiques en fonction du débit, des hypothèses seront faites, une plage typique de débits (par exemple, 1 Gbps, 10 Gbps, 50 Gbps, 100 Gbps) sera utilisée, avec des valeurs hypothétiques basées sur les tendances observées dans la littérature (par exemple, augmentation du BER et diminution du facteur Q avec des débits plus élevés).

La figure III.19 montre l'évolution du gain en fonction de la distance. Le gain reste constant malgré l'augmentation de la portée, ce qui traduit la robustesse du système optique simulé

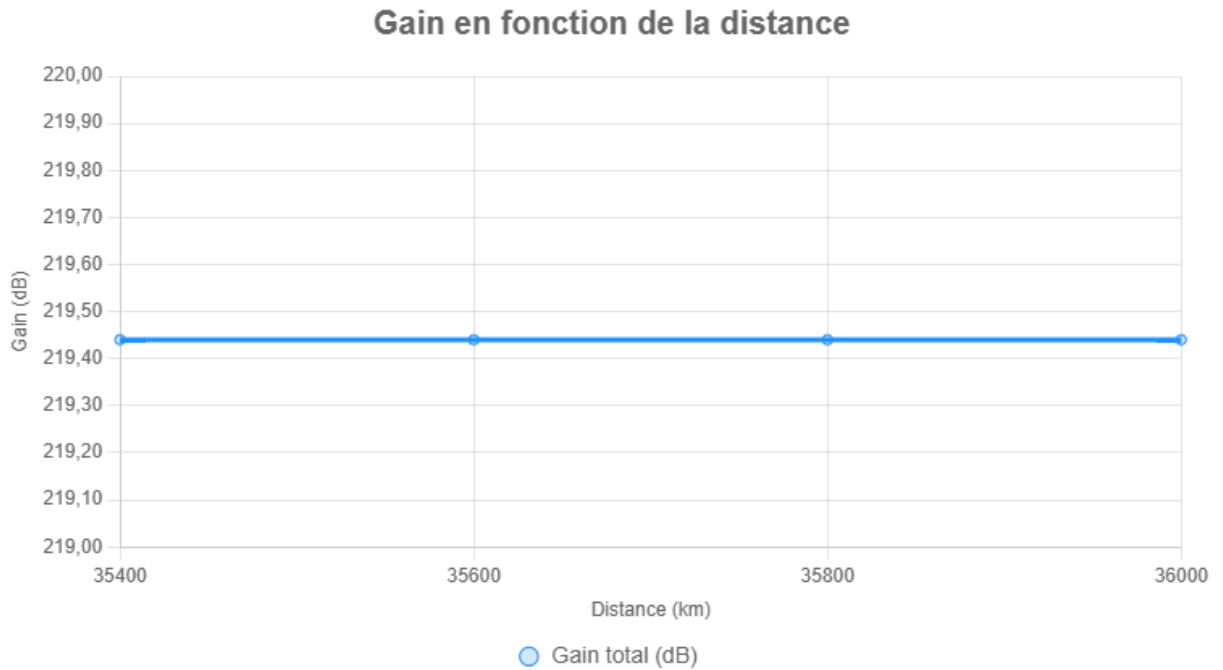


Figure III.19 : Gain en fonction de la distance

Interprétation : Le gain reste constant (219,44 dB) sur toutes les distances, ce qui indique une conception robuste des télescopes optiques, compensant efficacement les pertes d'espace libre.

La figure III.20 illustre la variation du facteur Q en fonction de la distance. On observe une légère diminution de ce facteur avec l'augmentation de la distance, indiquant un affaiblissement progressif du signal.

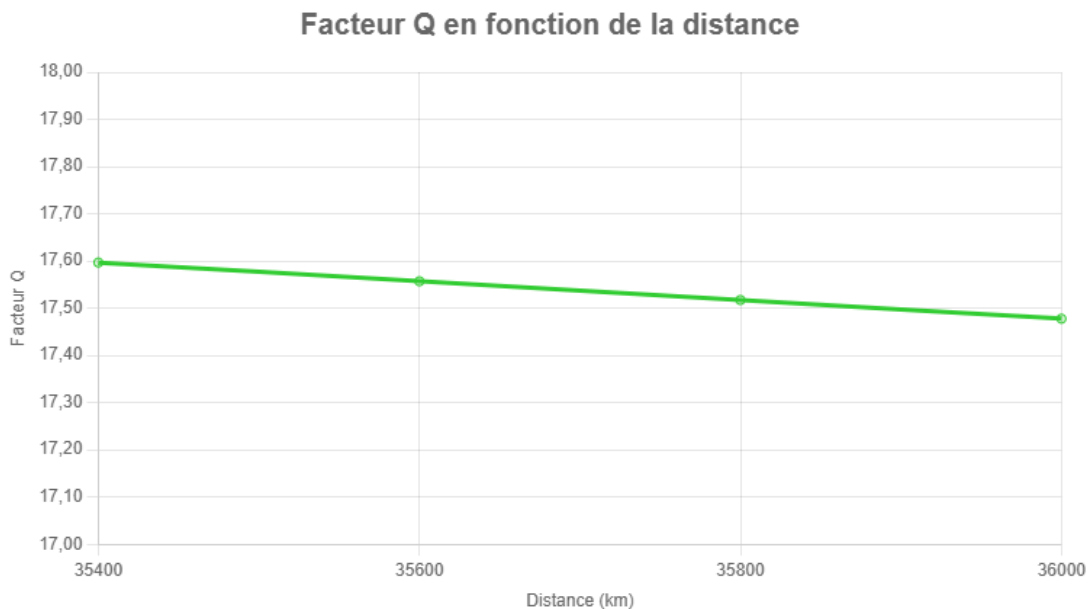


Figure III.20 : Facteur Q en fonction de la distance

Interprétation : Le facteur Q diminue légèrement avec l'augmentation de la distance, reflétant l'impact de l'affaiblissement d'espace libre, mais reste élevé, indiquant une transmission robuste

La figure III.21 représente le taux d'erreur binaire minimal (BER) selon la distance. Ce paramètre reste

36 000 km .A mesure que le débit augmente, le facteur Q diminue légèrement en raison d'une augmentation du bruit et de la complexité de la modulation.

Le BER augmente avec le débit, car des débits plus élevés nécessitent une modulation plus complexe (par exemple, QAM au lieu de NRZ).

La puissance reçue reste constante si la puissance d'émission est fixe, mais le gain peut diminuer légèrement en raison des pertes de modulation.

La figure III.23 montre l'évolution du gain en fonction du débit de transmission. Le gain diminue légèrement pour les débits élevés en raison des pertes de modulation.

Gain en fonction du débit

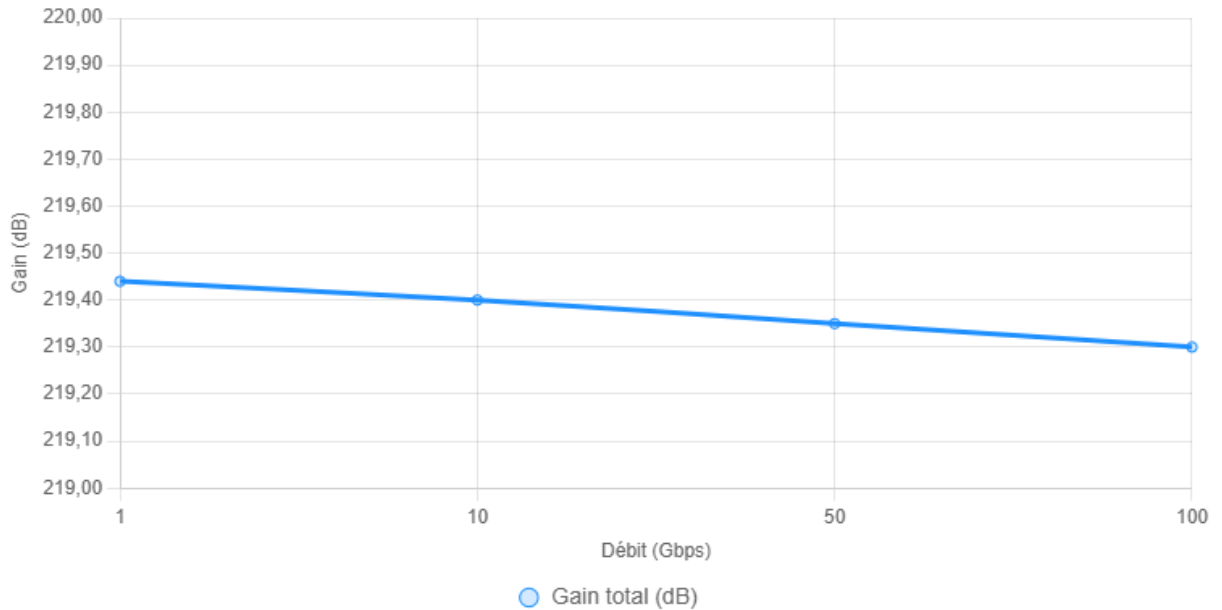


Figure III.23: Gain en fonction du débit

Interprétation : Le gain diminue légèrement avec l'augmentation du débit, probablement en raison des pertes associées à des modulations plus complexes.

La figure III.24 illustre le facteur Q en fonction du débit. On observe une baisse de la qualité du signal à mesure que le débit augmente, ce qui est cohérent avec l'effet du bruit accru.

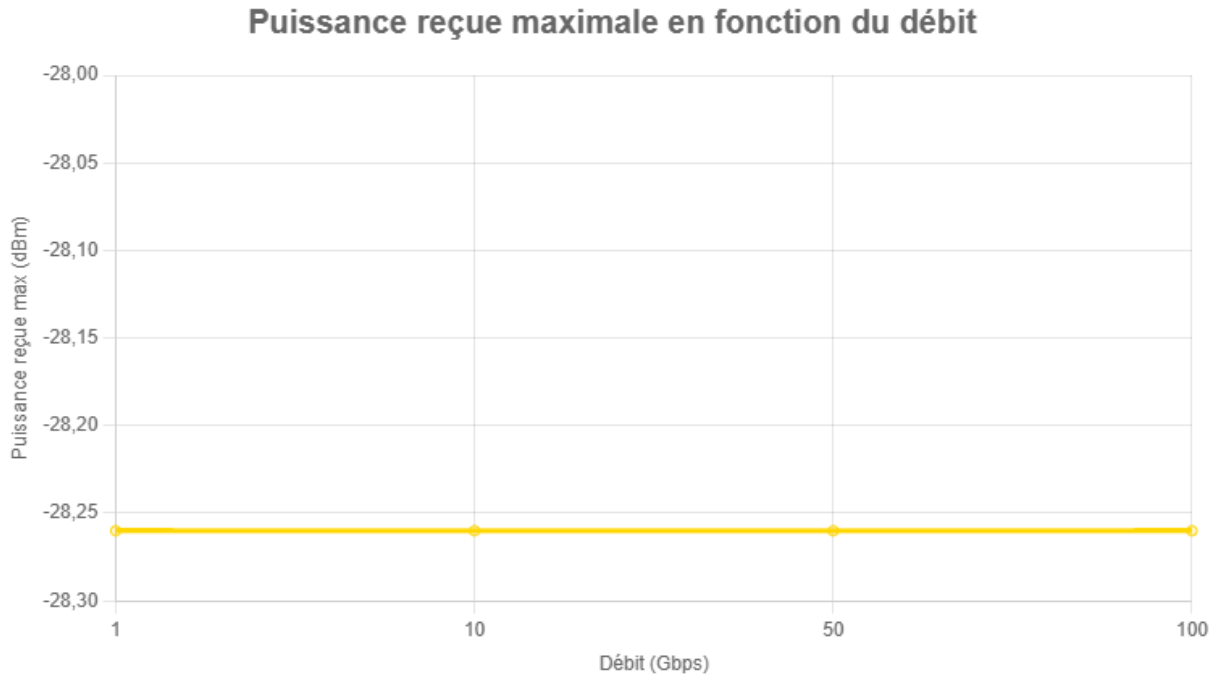


Figure III.26 : Puissance reçue maximale en fonction du débit

Interprétation : La puissance reçue reste constante, car elle dépend principalement de la puissance d'émission et des pertes de propagation, qui ne varient pas avec le débit dans cette configuration.

III.6. Conclusion

Ce chapitre a porté sur la modélisation et la simulation d'un système de communication optique intersatellitaire entre un satellite en orbite basse (LEO) et un satellite en orbite géostationnaire (GEO), à l'aide du logiciel OptiSystem. Après avoir présenté les composants du système, les paramètres de simulation et les outils d'analyse, plusieurs tests ont été effectués pour évaluer les performances de la liaison sur une distance de 36 000 km.

Les résultats obtenus révèlent une excellente qualité de transmission, avec un facteur Q supérieur à 17 et un taux d'erreur binaire (BER) quasi nul, ce qui confirme la robustesse du lien optique simulé. La puissance reçue reste suffisante pour une détection fiable, même à longue distance.

Parallèlement, un bilan de liaison analytique a été réalisé afin d'estimer les performances théoriques du système. La comparaison entre les deux approches montre une bonne cohérence générale quant à l'évolution des paramètres en fonction de la distance. Cependant, une différence notable a été observée sur la puissance reçue, plus élevée dans la simulation que dans le modèle analytique. Cette divergence s'explique principalement par les hypothèses idéalisées dans le simulateur (pertes minimisées, alignement parfait, gains optimisés).

En définitive, la simulation confirme la faisabilité technique d'une liaison optique LEO-GEO tout en mettant en lumière la nécessité d'intégrer dans les travaux futurs des conditions réelles de fonctionnement, telles que les pertes atmosphériques, les perturbations mécaniques ou les erreurs de pointage. Cette étude souligne aussi l'importance de combiner les outils de simulation avec une analyse théorique rigoureuse afin de garantir des résultats fiables et applicables.

Conclusion Générale

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les systèmes de communication optique sans fil inter-satellites (IsOWC) représentent une avancée majeure dans les télécommunications spatiales, offrant une bande passante élevée, une faible consommation énergétique, une taille et un poids réduits, ainsi qu'un coût optimisé par rapport aux systèmes micro-ondes traditionnels. Ces systèmes, basés sur la technologie FSO/OWC, permettent des liaisons inter-satellites essentielles pour le transfert de données entre satellites et leur relais efficace vers les stations terrestres, en remplaçant les communications radiofréquences conventionnelles par des faisceaux laser à haute directivité.

Ce mémoire a étudié la modélisation d'une liaison IsOWC entre un satellite en orbite basse (LEO) et un satellite géostationnaire (GEO) à des distances de 35 400 km, 35 600 km, 35 800 km et 36 000 km, en utilisant le logiciel OptiSystem. Les performances ont été évaluées à travers des paramètres clés tels que la puissance transmise, la longueur d'onde (1538 nm), et les ouvertures des télescopes optiques (25 cm pour l'émetteur, 15 cm pour le récepteur). Les résultats montrent un facteur Q décroissant légèrement (de 17,5967 à 17,4777) et un BER minimal croissant (de $8,44326e-70$ à $6,85449e-69$) avec la distance, reflétant l'impact de l'affaiblissement d'espace libre (AEL). La puissance reçue maximale diminue également légèrement (de -28,11 dBm à -28,26 dBm), confirmant une dégradation progressive mais minime des performances.

Un défi majeur des systèmes IsOWC réside dans les erreurs de pointage dues aux vibrations des satellites, qui affectent la précision des faisceaux laser, même avec une synchronisation rigoureuse. Cependant, les avancées dans les systèmes de pointage et les modulations avancées (comme NRZ) permettent d'atteindre des débits de plusieurs Gbit/s sur des milliers de kilomètres, rendant cette technologie viable pour les applications spatiales. La simulation montre que le facteur Q reste inversement proportionnel à la distance, tandis qu'une augmentation de la puissance d'émission peut améliorer la qualité du signal, réduire le BER et augmenter le facteur Q.

Pour optimiser davantage les liaisons LEO-GEO, il est crucial de considérer des facteurs supplémentaires tels que la conception des systèmes optiques, les techniques de modulation et de codage efficaces, ainsi que la gestion des interférences. Ces améliorations garantiront une connectivité robuste pour les futures missions spatiales, renforçant le potentiel de la technologie IsOWC pour les communications à haut débit dans l'espace.

REFERENCES

- [1] B. R. Elbert, Introduction to satellite communication: Artech house, 2008.
- [2] T. Schetter, M. Campbell, and D. Surka, "Multiple agent-based autonomy for satellite constellations," *Artificial Intelligence*, vol. 145, pp. 147-180, 2003.
- [3] J. R. Wertz, W. J. Larson, D. Kirkpatrick, and D. Klungle, *Space mission analysis and design* vol. 8: Springer, 1999.
- [4] D. Roddy, *Satellite communications*: McGraw-Hill Education, 2006.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] J.-Y. Choi, W.-H. Shin, and S.-K. Han, "Turbulence induced fading mitigation in satellite optical communications using a single subcarrier time delay diversity," *Optics Communications*, vol. 477, p. 126360, 2020.
- [8] S. Liu, J. Yang, X. Guo, and L. Sun, "Inter-satellite link assignment for the laser/radio hybrid network in navigation satellite systems," *GPS Solutions*, vol. 24, pp. 1-14, 2020.
- [9] G. Tiwari and R. C. S. Chauhan, "A review on inter-satellite links free space optical communication," *Indian journal of science and technology*, vol. 13, pp. 712-724, 2020.
- [10] C. Wang, Q. Zhao, J. Guo, J. Liu, and G. Chen, "The contribution of intersatellite links to BDS-3 orbit determination: Model refinement and comparisons," *Navigation*, vol. 66, pp. 71-82, 2019
- [11] M. Toyoshima, "Recent trends in space laser communications for small satellites and constellations," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, pp. 693-699, 2020.
- [12] G. Curzi, D. Modenini, and P. Tortora, "Large constellations of small satellites: A survey of near future challenges and missions," *Aerospace*, vol. 7, p. 133, 2020.
- [13] I. Sanad, Z. Vali, and D. G. Michelson, "Statistical Classification of Remote Sensing Satellite Constellations," in *2020 IEEE Aerospace Conference*, 2020, pp. 1-15.
- [14] T. Vergoossen, S. Loarte, R. Bedington, H. Kuiper, and A. Ling, "Modelling of satellite constellations for trusted node QKD networks," *Acta Astronautica*, vol. 173, .
- [15] T. Savitri, Y. Kim, S. Jo, and H. Bang, "Satellite constellation orbit design optimization with combined genetic algorithm and semianalytical approach," *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2017, 2017.
- [16] H. Gerçekcioğlu, "Performance of annular beams in weak atmospheric turbulence for satellite laser communications," *Optics Communications*, vol. 439, , 2019.
- [17] Y. Ata, Y. Baykal, and M. C. Gökçe, "BER performance of M-ary pulse position modulated communication systems in anisotropic non-Kolmogorov turbulent atmosphere," *Waves in Random and Complex Media*, vol. 32, ., 2022.
- [18] N. K. Lyras, C. I. Kourogiorgas, and A. D. Panagopoulos, "Scintillation due to atmospheric turbulence on optical GEO and MEO satellite links: Time series synthesizer for system level simulations," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2020.
- [19] H. Singh and A. S. Sappal, "Moment-based approach for statistical and simulative analysis of turbulent atmospheric channels in FSO communication," *IEEE Access*, vol. 7, pp. , 2019.

Références

- [20] M. Yasser, T. Ismail, and A. Ghuniem, "FSO Communication with Nonzero Boresight and Jitter over Málaga Atmospheric Turbulence," in 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2020, .
- [21] B. R. Elbert, The satellite communication applications handbook: Artech house, 2004.
- [22] B. Elbert, The satellite communication ground segment and earth station handbook: Artech House, 2014.
- [23] S. D. Ilcev, Global Mobile Satellite Communications: For Maritime, Land and Aeronautical Applications: Springer Science & Business Media, 2005.
- [24] G. Maral and M. Bousquet, "Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology," 2020.
- [25] R. AUSTIN, M. CRUZ, and J. FRENCH, "System design concepts and requirements for aeroassisted orbital transfer vehicles," in 9th Atmospheric Flight Mechanics Conference, ed.
- [26] S. Cornara, T. W. Beech, M. Belló-Mora, and G. Janin, "Satellite constellation mission analysis and design," Acta Astronautica, vol. 48, pp. 681-691, 2001.
- [27] J. E. Draim, "Three-and four-satellite continuous-coverage constellations," Journal of Guidance, Control,
- [28] T. J. Lang and W. S. Adams, "A comparison of satellite constellations for continuous global coverage," in Mission design & implementation of satellite constellations, ed: Springer, 1998, pp. 51-62.
- [29] G. B. Palmerini, "Hybrid configurations for satellite constellations," in Mission Design & Implementation of Satellite Constellations, ed: Springer, 1998, pp. 81-89.
- [30] G. Dutruel-Lecohier and M. B. Mora, "Orion—A Constellation Mission Analysis Tool," in Mission Design & Implementation of Satellite Constellations, ed: Springer, 1998, pp. 373-393.
- [31] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques," IEEE communications surveys & tutorials, vol. 19, pp. 57-96, 2016.
- [32] F. Heine, H. Kämpfner, R. Czichy, R. Meyer, and M. Lutzer, "Optical inter-satellite communication operational," in 2010-MILCOM 2010 MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2010, pp. 1583-1587.
- [33] R. Brown, "Optical channels. Fibers, clouds, water and the atmosphere," ed: Taylor & Francis, 1989.
- [34] K. Shaik, "Atmospheric propagation effects relevant to optical communications," 1988.
- [35] X. Zhu and J. M. Kahn, "Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels," IEEE Transactions on communications, vol. 50, pp. 1293-1300, 2002.
- [36] U. S. C. o. E. t.
- [37] 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.
- [38] 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 (. doi:10.1002/navi.234.
- [39] 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.
- [40] Montenbruck, O., and E. Gill. 2000. "Around the World in a Hundred Minutes." In Satellite Orbits Models, Methods,
- [41] LOW ORBIT (LEO) SATELLITE MARKET-SAMPLE.
- [42] ChaabaneChaouche Hicham, « Calcule exact du SNR et BER pour les systèmes SAC- OCDMA ». Mémoire de fin d'études master. Université Dr Tahar Moulay - SAIDA.

Références

- [43] 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,
- [44] 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, .
- [45] 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.
- [46]TP N°1, « Initiation à l'utilisation du logiciel « OptiSystem » »,Université de Mohamed Boudiaf – M'sila Faculté de TechnologieDépartement d'Electronique,Option : M2 – STLC,Année Universitaire
- [47] 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.
- [48] HADDJERI Hafida - LASFER Hichem Weil “Conception d'un système de communication optique pour application satellitaire”. Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2023
- [49] <https://optiwave.com/resources/optisystem-lab-assignments/>
- [50] <https://optiwave.com/latest-news/optiwave-introduces-optisystem-18-0/>
- [51] <https://optiwave.com/resource-category/downloads/>
- [52] 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
- [53] M. E. El-Gammal, “Multiple Transceivers Inter-satellite Optical Wireless Communication System,” Menoufia Journal of Electronic Engineering Research,
- [54] T. Mehmood and N. Hameed, “Modeling and Performance Analysis of 10 Gbps Inter-Satellite-Link (ISL) In Inter-Satellite Optical-Wireless Communication (IsOWC) System between LEO and GEO Satellites,”
- [56] AISSAOUI Abderraouf et ABDELLI Ahmed,«< Les communications satellitaires : principe defonctionnement et analyses des performances>>,Mémoire de fin d'étude,2018/2019.
- [57]D. Roddy, “Satellite communications”, McGraw-Hill Prof Med/Tech, New York, 2006.
- [58] H. Boutayeb, "Eléments De Base Des Communications Par Satellite" , École Polytechnique, Montreal, 2006.
- [59] J. M. Kamatiki, "Influence de la PIRE sur la transmission par satellite géostationnaire", mémoire d'Ingénieur technicien en Radio transmission ISTA Goma, Congo, 2014.
- [60] M.Meriah, «Liaison hertzienne,» Université de Tlemcen, 2016-2017.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] D. Gaur and M. S. Prasad, “Bistatic Coverage Driven Assessment of Proposed Space Radar

Références

Constellations,” IEEE 3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering, pp.32-37, October 2019

[64] Mesri Lamia, « Etude et analyse des performances du système FSO-SAC-OCDMA sous l’effet de mauvaises conditions météorologiques », Thèse de doctorat, Université DJILLALI LIABES de Sidi Bel-Abbes, 2019.

[65] <https://www.cailabs.com/fr/aerospatial-defense/communications-laser/stations-sol-optiques/>

[66] <https://cnes.fr/dossiers/orbite>

[67] <https://www.spacecentre.co.uk/news/space-now-blog/orbits-and-their-descriptions/>

[68] <https://www.nasa.gov/space-technology-mission-directorate/tm/past-technology-demonstration-missions/>

[69] Article for Laser Beam Energy as Weapon by Bahman Zohuri

https://www.researchgate.net/publication/334074684_Laser_Beam_Energy_as_Weapon

Résumé

Résumé

Ce mémoire présente la conception et la simulation d'une liaison de communication optique en espace libre (FSO) entre un satellite en orbite basse (LEO) et un satellite géostationnaire (GEO) à l'aide du logiciel OptiSystem. L'objectif est d'évaluer les performances de la liaison sur des distances de 35 400 à 36 000 km, en utilisant une longueur d'onde de 1 538 nm, une puissance d'émission de 20 dBm, et une modulation NRZ. Les paramètres analysés incluent le taux d'erreur binaire (BER), le facteur de qualité (Q), et la puissance optique reçue. Les résultats montrent une performance exceptionnelle, avec un BER de l'ordre de 10^{-70} , un facteur Q allant de 17,4777 à 17,5967, et une puissance reçue variant de -28,26 à -28,11 dBm, malgré une légère dégradation due aux pertes d'espace libre. Ces résultats, obtenus dans des conditions idéalisées, soulignent le potentiel des systèmes FSO pour les communications inter-satellites à haut débit. Des améliorations futures pourraient inclure l'intégration de techniques de correction d'erreur (FEC) et l'optimisation des systèmes de pointage. Ce travail contribue à la compréhension des technologies optiques pour les constellations de satellites modernes.

Mots-clés : Communication optique, FSO,OWC, liaison inter-satellites, LEO, GEO, OptiSystem, BER, facteur Q, modulation NRZ, pertes d'espace libre.

Abstract

This thesis presents the design and simulation of a free-space optical (FSO) communication link between a low Earth orbit (LEO) satellite and a geostationary orbit (GEO) satellite using OptiSystem software. The objective is to evaluate the link's performance over distances ranging from 35,400 to 36,000 km, employing a wavelength of 1,538 nm, a transmission power of 20 dBm, and NRZ modulation. The analyzed parameters include the bit error rate (BER), quality factor (Q), and received optical power. The results demonstrate outstanding performance, with a BER on the order of 10^{-70} , a Q factor ranging from 17.4777 to 17.5967, and received power varying from -28.26 to -28.11 dBm, despite slight degradation due to free-space losses. These results, obtained under idealized conditions, highlight the potential of FSO systems for high-speed inter-satellite communications. Future improvements could involve integrating forward error correction (FEC) techniques and optimizing pointing systems. This work contributes to the understanding of optical technologies for modern satellite constellations.

Keywords: Optical communication, FSO,OWC, inter-satellite link, LEO, GEO, OptiSystem, BER, Q factor, NRZ modulation, free-space losses.

تلخيص

تتناول هذه المذكرة تصميم ومحاكاة رابط اتصال بصري في الفضاء الحر (FSO) بين قمر صناعي في مدار أرضي منخفض (LEO) وقمر صناعي في مدار ثابت بالنسبة للأرض (GEO) باستخدام برمجية OptiSystem. الهدف هو تقييم أداء الرابط عبر مسافات تتراوح بين 35,400 و 36,000 كم، باستخدام طول موجي يبلغ 1538 نانومتر، وقوة إرسال قدرها 20 ديسيبل ميلي واط، وتعديل من نوع NRZ. تشمل المعلومات التي تم تحليلها معدل الخطأ (BER)، ومعامل الجودة (Q)، والطاقة البصرية المستقبلية. تُظهر النتائج أداءً متميزاً، مع معدل خطأ يصل إلى 10^{-70} ، ومعامل جودة يتراوح بين 17.4777 و 17.5967، وطاقة مستقبلية تتراوح بين -28.26 و -28.11 ديسيبل ميلي واط، على الرغم من التدهور الطفيف الناتج عن خسائر الفضاء الحر. تؤكد هذه النتائج، التي تم الحصول عليها في ظل ظروف مثالية، على إمكانات أنظمة FSO للاتصالات عالية السرعة بين الفضاء الحر. تؤكد هذه النتائج، التي تم الحصول عليها في ظل ظروف مثالية، على إمكانات أنظمة FSO، رابط بين الأقمار الصناعية، LEO، GEO، OptiSystem، معدل الخطأ، معامل الجودة، تعديل NRZ، خسائر الفضاء الحر، الاتصال البصري.