الجـمـهورية الجـزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بـكر بلـقايـد – تلمسان –
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**
En : Télécommunications
Spécialité : Télécommunications optique

Par :
-Serghine Asmaa -Merzouk Ghizlen

Sujet

Recherche et conception d'une station au sol de communication optique pour un laser hub base sur drone application

Soutenu publiquement, le **22/06/2026**, devant le jury composé de :

Karim fathallah	Prof	Université de Tlemcen	président
M.IRID sidi mohammed hadj	Prof	Université de Tlemcen	Encadrant
M.KOURDI Zakarya	MRA	CDS Oran	Co-Encadrant
Slimane Zohra	prof	Université de Tlemcen	examinatrice

Année universitaire: 2025/2026

Sommaire

Chapitre 1 Introduction et Contexte 5

I.1 Introduction 5

I.2 Contexte technologique : 5

I.2.1 Évolution des systèmes de communication: 5

I.2.1.3 communication optique sans fil OWC (Optical Wireless Communication) 8

I.3 Les applications de OWC 11

a. Modulation en bande de base : 14

b. Modulation multi porteuse 16

c. Modulations multicolores : 17

I.5 Avantages et inconvénients de technologie OWC : 18

I.6 FSO (Free Space Optics) 19

I.6.1 Principe de fonctionnement de la technologie FSO 20

I.6.2 Importance des technologies OWC et FSO 23

I.7 Conclusion 25

II.1 Introduction 28

II.2 Architecture de la Station au Sol (OGS) 29

II.3 Composants Principaux de l'OGS 30

II.3.1 Sous-système d'Émission Optique (Transmitter – Tx) 30

II.3.2 Système Optique de Réception (Receiver – Rx) 31

II.3.3 Chaîne PAT (Pointing, Acquisition and Tracking) 32

II.4 Intégration avec les Drones et Satellites LEO 33

II.4.1 Liaison OGS – Drone (*Laser Hub*) 33

II.4.2 Relais vers les Satellites LEO 34

II.5 Modélisation du Système 34

II.5.1 Modélisation de la Turbulence Atmosphérique 35

II.5.1.1 Théorie de Kolmogorov et Structure de la Turbulence 36

II.5.1.2 Paramètre de Fried et Cohérence Atmosphérique 36

II.5.2 Modèle Hufnagel-Valley (H-V) 37

II.5.3 Scintillation Optique 37

II.5.4 Modèles Statistiques du Canal Atmosphérique 38

II.5.4.1 Modèle Log-Normal 38

II.5.4.2 Modèle Gamma-Gamma 38

II.5.5 Atténuation Atmosphérique 39
II.5.6 Outils de Simulation 40
II.6 Etude de cas 41
II.6.1 Calcul le bilan du laison 41
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. 41
II.6.1.1 Rapport signal sur bruit (C/N0) 41
II.6.1.2 Rapport énergie par bit sur bruit (Eb/N0) 41
II.6.1.3 Affaiblissement de propagation (AP) 42
II.6.1.4 Affaiblissement d'espace libre (AEL) 42
II.6.1.5 Gain d'une antenne 42
II.6.1.6 Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente (PIRE) 43
II.6.1.8 Facteur de mérite G/T 44
II.6.1.9 Capacité du canal (Shannon-Hartley) 44
II.6.1.10 Température de bruit 44
II.6.1.11 Efficacité spectrale 44
II.6.1.12 Bilan de liaison pour la voie montante 45
II.6.1.13 Bilan de liaison global 45
II.6.1.14 Puissance reçue (Équation de Friis) 46
II.7 Calcul de bilan de liaison 46
II.7.1 Rapport de Liaison — FSO & OWC 47
Tableau 2.2 FSO — Résultats par distance (1 à 15 km) 47
II.8 Conclusion 49
III.1 Introduction 52
III.4.2 Caractéristiques principales 55
III.8.2 Description du topologie 62
Analyse de l'instrumentation 64
III.11.1 Identification des défis rencontrés 88
III.11.1.1 La sévérité de la couche limite atmosphérique et l'atténuation linéique 89
III.11.1.2 L'Interférence Entre Symboles (IES) aux hauts débits 89
III.11.1.3 Les contraintes du sous-système de Pointage, Acquisition et Suivi (PAT) 90
III.12 Opportunités d'implémentation en Algérie 90
III.12.1 Avantages pour les secteurs clés 90

III.12.2 Impact potentiel sur l'économie locale 91
III.13 Considérations réglementaires et techniques : 91
III.13.1 Normes et régulations en vigueur : 91
III.13.2 Obstacles techniques territoriaux à surmonter : 92
III.14 Conclusion et recommandations 92
III.14.1 Synthèse des résultats 92
III.14.2 Suggestions pour des travaux futurs et la mise en œuvre : 93
III.15 Conclusion 94

Liste des Figures

Figure I. 1 : Les communications numériques **7**
Figure I. 2 : réseaux backbone **8**
Figure I. 3 : communication optique sans fil OWC **10**
Figure I. 4 : liaison OWC applicable pour les drones **12**
Figure I. 5 : Modulation de technologie OWC **14**
Figure I. 6 : comparaison techniques de modulation en bande de base envisagées dans OWC **16**
Figure I. 7 : Modulation multi porteuse **17**
Figure I. 8 : Modulations multicolores **18**
Figure I. 9 : Configuration de base d'une liaison optique en espace libre **21**
Figure I. 10 : system FSO **22**
Figure I. 11 : communication FSO espace libre **23**
Figure I. 12 : Tec FSO –OWS avantages VS defies **25**
Figure I. 13 : Tec FSO defies ..... Erreur ! Signet non défini.
Figure II. 1 : Architecture globale d'une liaison de communication optique hybride Sol-Drone-Satellite (Laser Hub) **28**
Figure II. 2 : Architecture et Défis des Stations Optiques au Sol (OGS) pour les Communications FSO **30**
Figure II. 3 : oprtisystem **40**

Figure II. 4 : Diagramme de l'oeil et ber pour communication optique fso ... **49**
Figure III 1 : OptiSystem simulateur **54**
Figure III 2 : interface de travail sur OptiSystem **56**
Figure III 3 : La bibliothèque des composants **56**
Figure III 4 : Navigateur du Projet **57**
Figure III 5 : fenêtre de presentation du projet en cours **57**
Figure III 6 : Fenêtre de description du projet en cours **58**
Figure III 7 : Fenêtre de lancement de la simulation **58**
Figure III 8 : topologie propose Schéma bloc du système de communication optique en espace libre (FSO/OWC) sous OptiSystem. **62**
Figure III 9 : Liaison FSO - Limite 10 km **66**
Figure III 10 : Liaison FSO - Limite 5 km **68**
Figure III 11 : Diagramme de l'œil d'une liaison FSO à une distance de 15 km. **71**
Figure III 12 : Diagramme de l'œil et évolution du facteur Q pour la liaison OWC à une distance de 20 km. **74**
Figure III 13 : Diagramme de l'œil à 35 000 km sous configuration OWC optimisée à facteur Q constant. **77**
Figure III 14 : Intercommunication FSO Ground/Drone **78**
Figure III 15 : Intercommunication FSO Drone/Ground **79**
Figure III 16 : Intercommunication OWC Ground/Satellite **79**
Figure III 17 : Intercommunication OWC Satellite/Drone **80**
Figure III 18 : Data FSO Tx **86**
Figure III 19 : Data FSO RX **87**
Figure III 20 : Data GHz **87**

Liste Des Tableaux

Tableau I. 1 : Classification des Réseaux par Portée **11**

Tableau I. 2 : techniques de modulation en bande de base envisagées dans OWC **15**
Tableau I. 3 : Avantages et inconvénients de technologie OWC **19**
Tableau II. 1 : Paramètres du Bilan de Liaison **46**
Tableau II. 2 : OWC — Résultats par distance **47**
Tableau II. 3 : Paramètres **48**
Tableau III. 1 : Résultats de simulation des performances de la liaison FSO en fonction de la distance **64**
Tableau III. 2 : Résultats de simulation des performances de la liaison FSO en fonction de la distance. **69**
Tableau III. 3 : Résultats de simulation des performances de la liaison FSO en fonction de la distance. **72**
Tableau III. 4 : Évolution des performances de la liaison OWC en fonction de la distance avec stabilisation du facteur Q (Configuration : Switch 1 = Select 2, Switch 3 = Select 2). **75**
Tableau III. 5 : Analyse comparative des performances de transmission FSO de 2 à 9 Gbit/s sous l'effet de l'interférence entre symboles. **81**
Tableau III. 6 : Limites de performance du facteur Q et du BER en régime de transmission OWC très haut débit (jusqu'à 49 Gbit/s). **84**

Remerciement

le travail présenté dans ce rapport a été effectué à l'université Abou-Beker Belkaid -Tlemcen-.avant tout, nous remercions notre seigneur d'avoir donné à l'homme le pouvoir de raison et d'explorer les vérités de l'univers. que nos remerciements les plus sincères s'adressent à notre encadrant Mr irid sidi Mohammed hadj, professeur à l'université Abou-Beker Belkaid -Tlemcen-, pour avoir accepté de superviser notre travail et pour nous avoir initié aux bases de télécommunication système, et le soutien inconditionnel, les conseils précieux et la patience sans fin qu'il nous a généreusement fournis pendant nos recherches de mémoire. que nos remerciements les plus sincères s'adressent à notre Co-encadrant Mr kourdi zakarya, maître assistant au école nationale supérieur de télécommunication et technologies informatiques et communications à Oran, pour avoir accepté de superviser notre travail 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.

Nos sincères remerciements à monsieur Karim Fathallah
Professeur à l'université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Nous remercions également Mme Slimane Zohra professeur à l'université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen de nous avoir fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous ne pourrions oublier de présenter nos vifs remerciements et notre sincère gratitude à toutes celles et tous ceux qui nous ont épaulés dans les moments durs et nous ont donné la force pour continuer et arriver au bout du travail.

Nous ne pouvons terminer sans exprimer toute notre gratitude à tous les membres de nos famille et nos amis qui nous ont soutenu et conseillé tout le long de ce travail.

DÉDICACES

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

À ma chère mère et à mon cher père

Pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études. Que Dieu vous procure bonne santé et longue vie, en espérant que vous serez toujours fiers de moi.

À mes chers frères

Qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

À mon cher binôme « Asmaa » et à toute sa famille

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

DÉDICACES

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

À ma chère mère et à mon cher père

Pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études. Que Dieu vous procure bonne santé et longue vie, en espérant que vous serez toujours fiers de moi.

À mes chers frères

Qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

À mon cher binôme « Ghizlen » et à toute sa famille

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

Résume

Ce mémoire porte sur la recherche et la conception d'une station au sol (OGS) dédiée à la communication optique avec un hub laser embarqué sur drone. Face à la saturation du spectre radiofréquence et aux coûts élevés de la fibre optique, nous proposons une solution hybride reposant sur deux technologies complémentaires : la FSO (Free Space Optics) pour les liaisons atmosphériques locales, et la OWC (Optical Wireless Communication) pour les liaisons spatiales extra-atmosphériques. À travers des simulations rigoureuses sur le logiciel OptiSystem, les résultats démontrent que le segment FSO assure une transmission sans erreur (BER = 0) jusqu'à 13 km à un débit de 2 Gbit/s, tandis que le segment OWC maintient des performances exceptionnelles jusqu'à 35 000 km (orbite géostationnaire) avec un facteur de qualité stabilisé à $Q \approx 118{,}6$. Appliqué au contexte algérien, ce système offre des opportunités stratégiques majeures : désenclavement numérique du Sahara, appui à l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL), et interconnexion avec le satellite Alcomsat-1, le tout en respectant les normes de sécurité oculaire IEC 60825-1.

Mots-clés : Station optique au sol (OGS), FSO, OWC, Hub laser, Drone, Communication optique hybride, OptiSystem, BER, Q-factor, Alcomsat-1.

ملخص

تتناول هذه الأطروحة تصميم محطة أرضية بصرية (OGS) مخصصة للاتصال الضوئي مع مركز ليزري محمول على طائرة مسيّرة .(Drone) في ظل تشبّع الطيف الراديوي وارتفاع تكاليف الألياف الضوئية، يقترح الباحثون نظاماً هجيناً يجمع بين تقنيتين تكمّلان بعضهما FSO :(الضوء البصري في الفضاء الحر) للروابط الجوية المحلية، و OWC (الاتصال البصري اللاسلكي) للروابط خارج الغلاف الجوي. أثبتت المحاكاة الدقيقة باستخدام برنامج OptiSystem أن شريحة FSO تحقق نقل بيانات بدون أخطاء (BER = 0) حتى مسافة 13 كيلومتراً بمعدل 2 جيجابت/ثانية، في حين تحافظ شريحة OWC على أداء استثنائي يصل إلى 35,000 كيلومتر (المدار الثابت بالنسبة للأرض) مع معامل جودة مستقر عند .118.6 ≈ Q وعند تطبيق هذا النظام على الواقع الجزائري، يكشف البحث عن فرص استراتيجية كبرى؛ أبرزها: ربط المناطق الصحراوية النائية رقمياً، دعم وكالة الفضاء الجزائرية (ASAL)، والتواصل مع القمر الاصطناعي الجزائري الكومسات-1، مع الالتزام الكامل بمعيار السلامة البصرية الدولي IEC 60825-1.

Abstract

This thesis focuses on the design and validation of an Optical Ground Station (OGS) for high-speed laser communication with a drone-mounted laser hub. Motivated by the saturation of radio-frequency spectrum and the high cost of terrestrial fiber optic deployment, the authors propose a hybrid architecture combining two complementary technologies: FSO (Free-Space Optics) for short-range atmospheric links, and OWC (Optical Wireless Communication) for deep-space and satellite links. Through rigorous numerical simulations on the OptiSystem platform, results demonstrate that the FSO segment achieves error-free transmission (BER = 0) up to 13 km at a data rate of 2 Gbit/s, while the OWC segment maintains exceptional performance up to 35,000 km (geostationary orbit), with a quality factor stabilized at Q ≈ 118.6. Applied to Algeria's geographic and economic context, the system reveals major strategic opportunities: providing broadband connectivity to isolated Saharan regions, supporting the Algerian Space Agency (ASAL) and its satellite Alcomsat-1, and enabling next-generation 5G backhaul — all while complying with the IEC 60825-1 eye-safety

Liste des Abréviations

Abréviation	Signification
ACM	Adaptive Coding and Modulation — Adaptation Dynamique du Codage et de la Modulation
AEL	Accessible Emission Limit — Limite d'Émission Accessible
APD	Avalanche PhotoDiode — Photodiode à Avalanche
ASAL	Agence Spatiale Algérienne
BER	Bit Error Rate — Taux d'Erreur Binaire (TEB)
BN	Bruit de fond (Background Noise)
CAP	Carrierless Amplitude and Phase modulation
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
CDTA	Centre de Développement des Technologies Avancées
DACM	Direction de l'Aviation Civile et de la Météorologie
DCO-OFDM	DC-biased Optical OFDM
DPIM	Dual-Header Pulse Interval Modulation
DPSK	Differential Phase Shift Keying
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier — Amplificateur à Fibre Dopée à l'Erbium
EMP	Exposition Maximale Permise
ENNA	Établissement National de la Navigation Aérienne
FEC	Forward Error Correction — Correction d'Erreur Anticipée
FSM	Fast Steering Mirror — Miroir à Bascule Rapide
FSO	Free Space Optics — Optique en Espace Libre
FSPL	Free Space Path Loss — Perte de Trajet en Espace Libre
GEO	Geostationary Earth Orbit — Orbite Géostationnaire

Abréviation	Signification
HAP	High Altitude Platform — Plateforme de Haute Altitude
IEC	International Electrotechnical Commission
IES	Interférence Entre Symboles (ISI en anglais)
IM/DD	Intensity Modulation / Direct Detection
IR	Infrared — Infrarouge
ISI	Inter-Symbol Interference — Interférence Entre Symboles (IES)
LD	Laser Diode — Diode Laser
LDPC	Low-Density Parity-Check (code correcteur d'erreurs)
LED	Light Emitting Diode — Diode Électroluminescente
LEO	Low Earth Orbit — Orbite Basse Terrestre
LOS	Line Of Sight — Ligne de Visée Directe
LTE	Long Term Evolution (norme 4G)
MATLAB	Matrix Laboratory (logiciel de calcul numérique)
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	Massive Machine Type Communications
MZM	Mach-Zehnder Modulator — Modulateur Mach-Zehnder
NRZ	Non-Return to Zero — Sans Retour à Zéro
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OGS	Optical Ground Station — Station Optique au Sol
OOK	On-Off Keying — Modulation Tout-ou-Rien
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio — Rapport Signal/Bruit Optique
OWC	Optical Wireless Communication — Communication Optique Sans Fil
PAM	Pulse Amplitude Modulation — Modulation d'Amplitude d'Impulsion
PAR	Peak-to-Average Power Ratio

Abréviation	Signification
PAT	Pointing, Acquisition and Tracking — Pointage, Acquisition et Suivi
PIM	Pulse Interval Modulation — Modulation par Intervalle d'Impulsion
PIN	P-Intrinsic-N photodiode
PIRE	Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente
PPM	Pulse Position Modulation — Modulation en Position d'Impulsion
PRBS	Pseudo-Random Bit Sequence — Séquence de Bits Pseudo-Aléatoire
PSK	Phase Shift Keying — Modulation de Phase
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RALE	Réception Adaptative à Longue Échelle
RF	Radio Frequency — Radiofréquence
RSB	Rapport Signal sur Bruit (SNR en anglais)
RVB	Rouge Vert Bleu — RGB (Red Green Blue)
SCM	Sub-Carrier Multiplexing — Multiplexage par Sous-Porteuse
SNSPD	Superconducting Nanowire Single-Photon Detector
SNR	Signal-to-Noise Ratio — Rapport Signal sur Bruit (RSB)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle — Véhicule Aérien Sans Pilote (Drone)
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication
USTHB	Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
USTO	Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
UV	Ultraviolet
UVC	Ultraviolet Communication
VANET	Vehicular Ad-hoc Network
VLC	Visible Light Communication — Communication par Lumière Visible
WBAN	Wireless Body Area Network

Abréviation	Signification
WDM	Wavelength Division Multiplexing — Multiplexage par Répartition en Longueur d'Onde
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

Introduction Generale

Le paysage mondial des télécommunications connaît une mutation sans précédent, caractérisée par une explosion du volume de données échangées et par la nécessité d'établir des connexions de plus en plus rapides, sécurisées et ubiquitaires. Si les décennies précédentes ont vu le triomphe des architectures radiofréquences (RF) et des réseaux de fibre optique filaire, les infrastructures contemporaines atteignent aujourd'hui des limites structurelles critiques. D'une part, le spectre radiofréquence fait face à une saturation imminente, exacerbée par des contraintes de bande passante et une vulnérabilité inhérente aux interférences et aux interceptions. D'autre part, le déploiement de la fibre optique terrestre, bien que performant, se heurte à des barrières géographiques, des coûts financiers colossaux et des délais de mise en œuvre prohibitifs, en particulier dans les régions isolées, accidentées ou désertiques.

C'est dans ce contexte de rupture technologique que l'optique sans fil s'impose comme une alternative révolutionnaire. À travers les technologies de communication optique en espace libre (FSO - Free-Space Optics) pour les liaisons atmosphériques et de communication optique sans fil (OWC - Optical Wireless Communication) pour le segment spatial, l'utilisation des fréquences optiques permet d'atteindre des débits de l'ordre du Gigabit par seconde, sans nécessiter de licence spectrale et avec une immunité totale aux interférences électromagnétiques. L'intégration de ces liaisons laser à bord de plateformes de haute altitude, telles que des drones lourds faisant office de « Hub Laser » aéroporté, ouvre la voie à des réseaux hybrides d'une flexibilité inédite, capables de lier dynamiquement le segment terrestre, le segment aérien et les constellations de satellites.

Problématique de la recherche :

Malgré un potentiel théorique exceptionnel, l'implémentation opérationnelle d'un hub laser embarqué sur drone se heurte à un verrou scientifique majeur : la vulnérabilité du canal optique sans fil face à son environnement de propagation. Contrairement à la fibre optique où le milieu est guidé et protégé, le faisceau laser en espace ouvert subit de plein fouet les aléas de la matière. Dans les basses couches de l'atmosphère, les liaisons FSO subissent une atténuation linéique sévère induite par les aérosols (brume, poussière) et des phénomènes de scintillation thermique qui dégradent le front d'onde. Dans l'espace lointain, les liaisons OWC doivent surmonter une atténuation géométrique extrême liée à la distance (jusqu'aux orbites géostationnaires à 35 000 km). De plus, l'élévation des débits de données d'un tel système exacerbe les distorsions temporelles, notamment l'Interférence Entre Symboles (IES).

Dès lors, la question fondamentale à laquelle tente de répondre ce travail est la suivante : Comment concevoir et dimensionner une station au sol (OGS - Optical Ground Station) capable d'optimiser le bilan de liaison, de surmonter les obstacles de l'environnement atmosphérique et spatial, et de garantir une transmission de données massive et sans erreur (BER = 0) adaptée aux contraintes locales et géographiques de l'Algérie ?

Objectifs du mémoire :

L'objectif principal de ce mémoire est de mener une étude approfondie de recherche, de conception et de validation numérique d'une station au sol dédiée à la communication optique avec un hub laser sur drone. Pour y parvenir, plusieurs objectifs spécifiques ont été fixés :

1. Concevoir l'architecture matérielle et fonctionnelle de la station au sol en identifiant les composants optoélectroniques (lasers, photodétecteurs, filtres) optimaux pour l'interconnexion avec les drones et les satellites.
2. Modéliser et simuler le système sur des logiciels spécialisés afin d'évaluer rigoureusement le comportement du signal (Facteur Q, BER, diagramme de l'œil) face aux variations de distance et de débit.
3. Établir un calcul précis du bilan de liaison (Link Budget) pour quantifier les pertes, valider les marges de sécurité du système et prouver sa faisabilité technique.
4. Évaluer les opportunités d'implémentation réelles en Algérie, en analysant l'impact socio-économique pour les secteurs des télécommunications et de la recherche spatiale, tout en tenant compte du cadre réglementaire et des contraintes climatiques territoriales (Sirocco, humidité côtière).

Méthodologie et outils :

Pour répondre aux exigences de cette recherche, une méthodologie de type hypothético-déductive et quantitative a été adoptée. La première phase a consisté en une analyse bibliographique approfondie des équations de propagation optique et des caractéristiques des canaux FSO et OWC. La seconde phase, purement technique, s'appuie sur la modélisation numérique à l'aide de la plateforme de simulation de pointe OptiSystem. Cet outil a permis de recréer l'architecture de l'émetteur, du canal et du récepteur, et d'extraire des indicateurs de performance statistiques via des analyseurs de BER et de diagrammes de l'œil. Enfin, les données obtenues ont été synthétisées et confrontées aux réalités géographiques et normatives pour formuler des recommandations concrètes de mise en œuvre.

Plan de recherche :

Le présent mémoire est articulé autour de trois chapitres principaux, structurés de manière logique pour mener le lecteur de la théorie à l'application :

• **Le Chapitre 1** (Introduction et Contexte) pose les fondements théoriques de l'étude. Il retrace l'évolution des systèmes de communication, met en évidence l'importance stratégique des technologies FSO et OWC, formalise la problématique scientifique, définit les objectifs et expose la méthodologie de recherche retenue.

• **Le Chapitre 2** (Conception et Modélisation de la Station au Sol) constitue le cœur de l'ingénierie du projet. Il détaille l'architecture des composants principaux de la station au sol, expose l'intégration avec les drones et les satellites de basse altitude (LEO), présente le calcul du bilan de liaison (Link Budget) et fixe le tableau rigoureux des paramètres de simulation à travers une étude de cas dédiée.

• **Le Chapitre 3** (Analyse des Résultats et Perspectives) est consacré à la discussion critique des données simulées. Il interprète les variations de performances (impact de la distance et du débit) sur les diagrammes de l'œil et identifie les défis physiques rencontrés. Enfin, il explore de manière approfondie les opportunités d'implémentation en Algérie, analyse les considérations réglementaires et de sécurité oculaire (norme IEC 60825-1) et émet des recommandations pour les travaux futurs. Une conclusion générale vient clore ce manuscrit en synthétisant les apports majeurs de notre recherche.

Chapitre 1 :

Introduction et Contexte

Chapitre 1 Introduction et Contexte

I.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, les systèmes de communication ont connu une évolution majeure, passant des transmissions analogiques vers des systèmes numériques avancés afin d'améliorer les débits, la fiabilité et l'efficacité spectrale.

Si la fibre optique constitue aujourd'hui l'épine dorsale des réseaux mondiaux grâce à sa capacité massive dépassant les 10 Tb/s , son déploiement reste complexe et coûteux dans les zones rurales ou difficiles d'accès.

Parallèlement, les systèmes radiofréquences (RF) conventionnels, incluant la 4G et la 5G, font face à une saturation croissante du spectre et à des interférences électromagnétiques qui limitent leurs performances dans des environnements denses.

Face à ces défis, les communications optiques sans fil (OWC), et particulièrement la technologie FSO (Free Space Optics), émergent comme une solution innovante. En utilisant des faisceaux laser pour transmettre des données à travers l'atmosphère, la FSO offre des débits comparables à la fibre optique sans nécessiter d'infrastructure physique lourde.

L'intégration de cette technologie avec des plateformes mobiles telles que les drones (UAV) ouvre de nouvelles perspectives pour établir des liaisons dynamiques et flexibles dans des zones isolées ou lors d'interventions d'urgence.

L'objectif de ce mémoire est donc de concevoir et d'analyser une station au sol capable d'établir une liaison FSO fiable avec un drone agissant comme "Laser Hub", tout en relevant les défis liés aux perturbations atmosphériques et à la précision de l'alignement du faisceau.

I.2 Contexte technologique :

I.2.1 Évolution des systèmes de communication:

Au cours des dernières décennies, les systèmes de communication ont connu une évolution majeure, passant des transmissions analogiques vers des systèmes numériques avancés.

Cette évolution a permis une amélioration significative des performances en termes de débit, de fiabilité et d'efficacité spectrale.

I.2.1.1 Les communications numériques :

Les communications numériques ont marqué une avancée majeure dans le domaine des télécommunications en introduisant des techniques sophistiquées de modulation et de codage, permettant une utilisation plus efficace du spectre et une amélioration significative de la fiabilité des transmissions.

Parmi les techniques de modulation les plus utilisées figurent la modulation d'amplitude en quadrature (QAM), la modulation de phase (PSK) et les schémas multiporteuses tels que l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), largement adoptés dans les systèmes modernes.

Ces techniques, combinées à des codes correcteurs d'erreurs comme les codes convolutifs, les codes LDPC (Low-Density Parity-Check) et les codes turbo, permettent de réduire considérablement le taux d'erreur binaire (BER) même en présence de bruit et d'interférences [I-1]

Par ailleurs, l'évolution des réseaux mobiles a profondément transformé les communications sans fil. Les systèmes de quatrième génération (4G), basés principalement sur la technologie LTE (Long Term Evolution), ont introduit des débits élevés pouvant atteindre plusieurs centaines de Mbit/s, ainsi qu'une meilleure efficacité spectrale grâce à l'utilisation de l'OFDM et des techniques MIMO (Multiple Input Multiple Output) [I-2].Cependant, face à l'explosion du trafic de données et à la croissance rapide du nombre d'utilisateurs connectés, les limites des systèmes 4G sont rapidement apparues.

Dans ce contexte, la cinquième génération (5G) a été développée pour répondre aux exigences croissantes en termes de débit, de latence et de connectivité. La 5G introduit des concepts innovants tels que l'ultra-faible latence (inférieure à 1 ms), les communications massives de type machine (mMTC) pour l'Internet des objets (IoT), ainsi que les communications ultra-fiables à faible latence (URLLC). Elle exploite également des technologies avancées telles que les ondes millimétriques (mmWave), le massive MIMO et le beamforming, permettant d'augmenter considérablement la capacité du réseau et d'améliorer la couverture [I-3]

Malgré ces avancées, les systèmes RF restent confrontés à plusieurs limitations, notamment la saturation du spectre radiofréquence, les interférences croissantes et les coûts élevés d'infrastructure, ce qui motive la recherche de solutions alternatives telles que les communications optiques sans fil (OWC) et les systèmes FSO



Figure I. 1 : Les communications numériques

I.2.1.2 la fibre optique

Par ailleurs, la fibre optique constitue aujourd'hui la technologie principale des réseaux backbone grâce à sa très grande capacité et sa faible atténuation [I-4] .
Toutefois, son déploiement reste coûteux dans les zones rurales ou difficiles d'accès.

-Très grande capacité : les systèmes optiques peuvent fonctionner à des débits supérieurs à 10 Tb/s. La fibre optique offre une bande passante immense, estimée à environ 100 THz. Des expériences mentionnées dans le document montrent des capacités totales dépassant même les 30 Tb/s en utilisant simultanément différentes bandes de transmission

-Faible atténuation (pertes) : La fibre est décrite comme le canal de communication le plus approprié, notamment parce que ses pertes sont minimales aux alentours de 1,55 µm. Bien que les pertes limitent la distance de transmission, l'utilisation d'amplificateurs optiques (comme les EDFA) a permis de résoudre ce problème pour les liaisons longue distance.

-Domination technologique : Le document présente l'"Ère Optique" (commencée vers 1978) comme succédant à l'ère électrique des câbles coaxiaux et des micro-ondes, qui étaient limités à des débits d'environ 100 Mb/s . La "révolution de la fibre optique" est présentée comme une conséquence naturelle de la croissance d'Internet. Une carte des câbles internationaux et domestiques à haut débit illustre cette infrastructure mondiale qui constitue le backbone des communications modernes

En résumé, Agrawal, 2010 valide que la combinaison d'une capacité massive et de la capacité à gérer les pertes de signal sur de longues distances fait de la fibre optique le support principal des réseaux de transport de données .

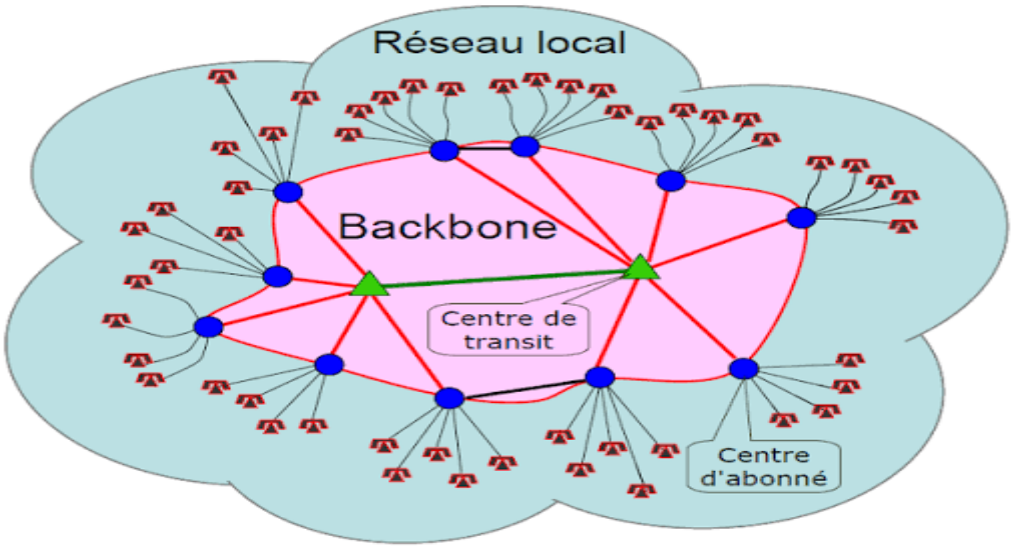


Figure I. 2 : réseaux backbone

I.2.1.3 communication optique sans fil OWC (Optical Wireless Communication)

La demande croissante en transmission de données entre différents terminaux mobiles a favorisé l'émergence d'un large éventail de technologies de communication sans fil. La plupart de ces solutions reposent sur les technologies de radiofréquence (RF), telles que ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX et les réseaux cellulaires (3G/4G), classées selon leur zone de couverture.

Toutefois, les communications optiques sans fil constituent à la fois une alternative pertinente et un complément efficace aux systèmes basés sur les radiofréquences. [I-5] [I-6]

Les systèmes optiques et les systèmes à radiofréquence (RF) reposent tous deux sur l'utilisation des ondes électromagnétiques pour la transmission de l'information. Toutefois, ils se distinguent principalement par les bandes de fréquences exploitées.

En effet, les systèmes RF opèrent dans une gamme de fréquences allant de quelques kilohertz à plusieurs dizaines de gigahertz, tandis que les systèmes de

communications optiques sans fil utilisent des fréquences nettement plus élevées, généralement situées dans le domaine infrarouge.

Comparées aux technologies RF, les communications optiques sans fil (OWC) présentent plusieurs avantages techniques et opérationnels majeurs. Elles offrent notamment une très large bande passante, une forte immunité aux interférences électromagnétiques, ainsi qu'un confinement spatial élevé permettant une réutilisation efficace du spectre. De plus, elles garantissent un niveau de sécurité accru, une meilleure efficacité énergétique, l'absence de contraintes réglementaires liées à l'utilisation du spectre, ainsi qu'une disponibilité et un coût avantageux des composants optiques. [I-7]

Le terme Optical Wireless Communication (OWC) désigne l'ensemble des technologies de transmission optique utilisant un milieu de propagation non guidé, tel que l'air ou le vide. Ces systèmes se déclinent en plusieurs variantes selon la bande de fréquences exploitée, ce qui conditionne leurs caractéristiques et leurs domaines d'application.

Récemment, les communications optiques sans fil se sont étendues au spectre visible à travers la technologie Visible Light Communication (VLC), qui opère dans la plage de longueurs d'onde comprise entre 390 et 750 nm. Cette technologie trouve des applications dans les réseaux locaux sans fil (WLAN), les réseaux personnels (WPAN), ainsi que dans les communications véhiculaires, notamment grâce à l'utilisation des diodes électroluminescentes (LED).

Par ailleurs, les systèmes OWC terrestres point à point, connus sous le nom de Free Space Optics (FSO), fonctionnent principalement dans le domaine de l'infrarouge proche (750–1600 nm). Ces systèmes utilisent généralement des sources laser et permettent d'établir des liaisons à haut débit, pouvant atteindre plusieurs gigabits par seconde par longueur d'onde, tout en offrant une solution flexible et économiquement avantageuse.

Enfin, les communications optiques dans le domaine ultraviolet (UV), situées en dessous de 400 nm, constituent une autre catégorie de l'OWC. Les systèmes UVC (Ultraviolet Communication) sont particulièrement adaptés à des applications spécifiques telles que les réseaux de capteurs sans fil et les réseaux ad hoc, notamment

dans des environnements où les autres technologies de communication sont limitées. [I-8] [I-9]



Figure I. 3 : communication optique sans fil OWC

Tableau I. 1 : Classification des Réseaux par Portée

Catégorie de Portée	Unité de Mesure	Exemples de Technologies / Applications
Très courte portée	mm	Interconnexions optiques (Optical Interconnects)
Portée centimétrique	cm	WBAN (Wireless Body Area Network), WPAN (Wireless Personal Area Network)
Portée métrique	m	WLAN (Local Area Network), VANET (Vehicular Ad-hoc Network), Communications sous-marines
Portée kilométrique	km	Liaisons terrestres, Backhauls (Réseaux de collecte)
Longue portée	> 10,000$ km	Liaisons satellites et spatiales

I.3 Les applications de OWC

Les systèmes OWC peuvent être appliqués à une large gamme d'applications parmi lesquelles:[I-10] [I-11]

- Liaisons LAN « outdoor »,
- Liaisons domestiques « indoor »
- Télésurveillance « indoor »,
- Réseaux de capteurs − Éclairage intelligent (VLC),
- Liaisons satellites, plates-formes d'altitude et communications sous-marines
- Liaisons sans-fil entre puces, cartes et calculateurs
- Liaisons owc des drones…….ect

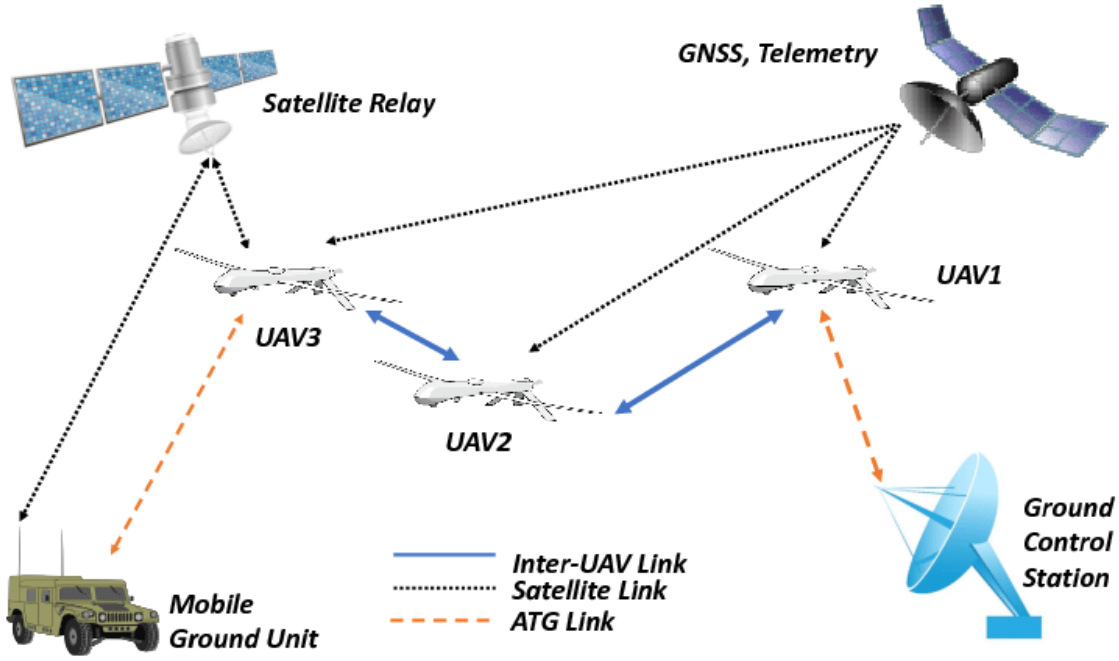


Figure I. 4 : liaison OWC applicable pour les UAV

I.4 Modulation de technologie OWC :

-Les 4 Critères de Sélection d'une Modulation OWC

-Le choix d'un schéma de modulation (comme OOK, PPM ou OFDM optique) dépend d'un compromis entre ces quatre piliers : [I-6]

-Efficacité Énergétique (Puissance Moyenne) : C'est le critère critique. En OWC, la puissance optique est limitée par les normes de sécurité oculaire (pour éviter les dommages rétiniens) et par l'autonomie des batteries des terminaux mobiles. On cherche donc à maximiser le débit binaire tout en minimisant la puissance optique moyenne requise.

-Efficacité Spectrale (Bande Passante) : Bien que le spectre optique soit vaste, les composants (LED, photodiodes) ont une bande passante limitée. Une modulation performante doit pouvoir transmettre un maximum de données dans une largeur de bande restreinte.

-Complexité d'Implémentation : Cela concerne la puissance de calcul nécessaire au traitement du signal (DSP) et le coût du matériel. Pour des objets connectés simples, une modulation complexe comme l'OFDM peut s'avérer trop gourmande en énergie par rapport à une modulation d'impulsions simple.

-Tolérance aux Distorsions Physiques : Les émetteurs (LED/LD) ne sont pas

parfaitement linéaires. Le signal modulé doit tenir compte de la non-linéarité des composants et du bruit de fond ambiant (soleil, éclairage artificiel) qui affecte le récepteur.

I.4.1 Le Processus de Modulation en Deux Étapes

Selon l'approche de Kahn et Barry, la transformation de la donnée numérique en signal lumineux se décompose ainsi :

Étape 1 : Codage de la Forme d'Onde

On transforme les bits (0 et 1) en un signal électrique de base.

Exemple : En modulation de position d'impulsion (PPM), un bloc de bits détermine la position d'une impulsion à l'intérieur d'un intervalle de temps donné.

Étape 2 : Modulation de la Puissance Instantanée

Le signal électrique obtenu est utilisé pour piloter le courant de l'émetteur optique (LED ou Laser).

La puissance de sortie de la source lumineuse P(t) varie proportionnellement au courant d'entrée s(t).

Contrainte majeure : Puisque la puissance optique ne peut pas être négative, le signal modulant doit être réel et positif : $s(t) \geq 0$.

Synthèse des contraintes RF vs OWC

Cette spécificité "réelle et positive" explique pourquoi les méthodes RF classiques sont modifiées en OWC. Par exemple, pour utiliser l'OFDM en optique, on doit ajouter une composante continue (DC bias) ou utiliser des variantes comme le DCO-OFDM ou le ACO-OFDM pour garantir que le signal ne devienne jamais négatif. [I-6]

La modulation d'intensité (IM) et la détection directe (DD) sont les techniques de transmission privilégiées dans les systèmes OWC.IM est obtenue en faisant varier le courant de polarisation du LD ou de la LED. [I-6]

Dans les systèmes OWC, le signal transmis doit toujours être positif. La détection directe est la méthode la plus simple qui peut être utilisée pour détecter un signal modulé en intensité. Le photodétecteur génère un courant proportionnel à l'intensité de la puissance optique incidente. Une description simple du canal IM/DD est la suivante[I-6]

$(t) = (t) \otimes h(t) + Rn(t)$

R : est la sensibilité du photodétecteur

(t) : est la courante photo instantané reçu

(t) : est le temps absolu

$\otimes$: désigne la convolution

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

( ) : est la puissance transmise instantanée

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

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

(a) modulation en bande de base, (b) modulation multi porteuse et (c) modulation multicolore

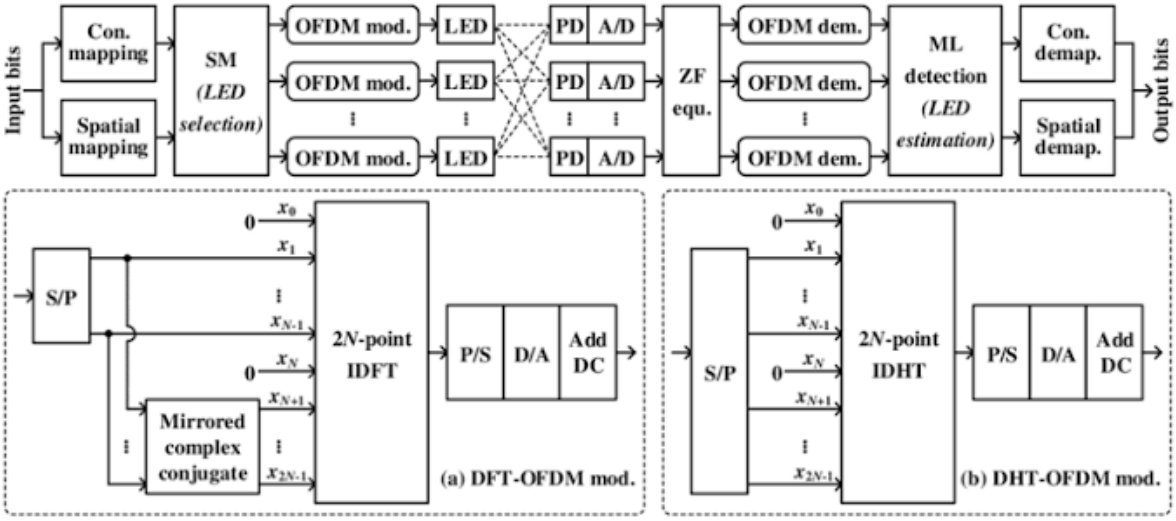


Figure I. 5 : Modulation de technologie OWC

a. Modulation en bande de base :

Les principales techniques de modulation en bande de base envisagées dans OWC comprennent

-la modulation d'amplitude d'impulsion (PAM) [I-12]

-la modulation d'impulsion position (PPM) [I-13] [I-14]

-la modulation par intervalle d'impulsions (PIM) [I-15]

-(iv) la modulation d'amplitude et de phase sans porteuse (CAP). [I-17] [I-16]

Tableau I. 2 : techniques de modulation en bande de base envisagées dans OWC

Technique	Description	Avantages	Inconvénients
PAM (Modulation d'amplitude d'impulsion)	L'information est codée dans l'amplitude de l'impulsion. Le **OOK** est sa forme la plus simple (2 niveaux).	Très simple à mettre en œuvre ; exploite la commutation rapide des LED/LD.	Efficacité spectrale et énergétique limitée par rapport aux autres formats.
PPM (Modulation en position d'impulsion)	L'information est codée par la position de l'impulsion dans un intervalle de temps.	Efficacité énergétique élevée ; largement utilisé en OWC.	Nécessite une synchronisation stricte des symboles.
DPPM (PPM Différentiel)	Version modifiée du PPM pour supprimer les intervalles vides après l'impulsion.	Augmente le débit de données ; consomme moins d'énergie que le PPM.	Sensible à la distorsion du signal.
PIM / DPIM (Modulation d'intervalle d'impulsion)	L'information est codée par la durée de l'espace entre deux impulsions successives.	**DPIM** améliore les performances en supprimant les espaces redondants du PPM.	Complexité de synchronisation élevée ; risque de **propagation d'erreurs** entre les trames.
CAP (Modulation d'amplitude et de phase sans porteuse)	Utilise deux filtres orthogonaux pour transmettre deux flux de données simultanément.	Très haute efficacité spectrale ; permet d'atteindre des débits de données élevés.	Mise en œuvre plus complexe que les modulations de base (OOK/PPM).

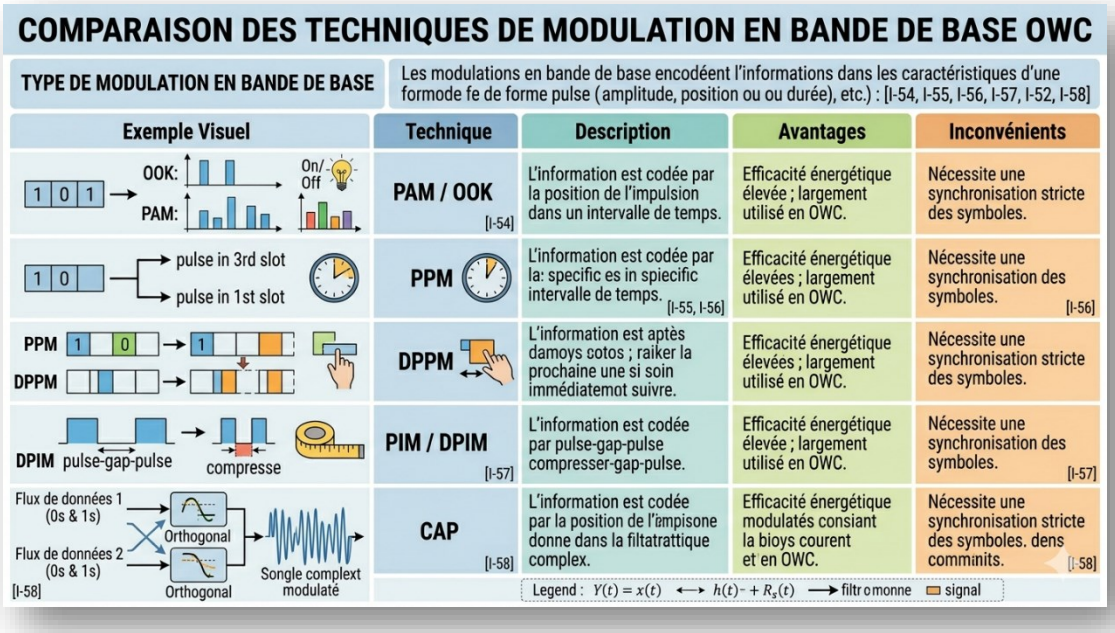


Figure I. 6 : comparaison techniques de modulation en bande de base envisagées dans OWC

b. Modulation multi porteuse

Des techniques plus avancées peuvent être utilisées dans les systèmes OWC pour transmettre des porteuses multiples, comme la modulation de sous-porteuse (SCM). Cela permet d'offrir un accès multiple à des utilisateurs simultanés et un débit de données élevé. Cependant, le SCM n'est pas économe en énergie comme les schémas à porteuse unique [I-18]

un débit de données élevé a été de données élevé tout en réduisant les besoins moyens en modulation SCM. [I-19]

le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) a été appliqué dans les systèmes OWC d'intérieur afin d'atteindre des débits de données élevés sur un canal bruyant et de réduire l'ISI. [I-20]

Le système n'a toutefois pas atteint un rapport signal/bruit élevé. Les principaux inconvénients de l'OFDM sont la sensibilité au décalage de fréquence et le bruit de phase, ainsi que le rapport élevé entre la puissance de crête et la puissance moyenne (PAR) [I-21].

D'une manière générale, l'adoption de formats de modulation complexes permet d'optimiser les performances des systèmes de communications optiques sans fil

(OWC). Ces techniques sont particulièrement efficaces pour atténuer l'interférence entre symboles (ISI) et accroître les débits de transmission. Cependant, cette amélioration se fait au prix d'une complexité accrue, tant au niveau du traitement du signal que de l'architecture matérielle requise pour la mise en œuvre.

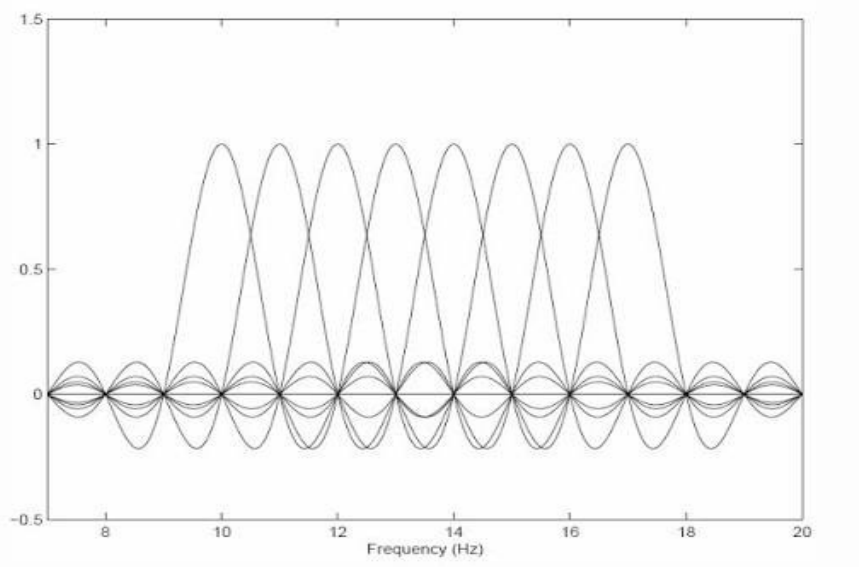


Figure I. 7 : Modulation multi porteuse

c. Modulations multicolores :

La modulation multicolore a récemment été envisagée pour fournir des débits de données élevés ou un accès multiple aux utilisateurs [I-22] [I-13].

La lumière blanche peut être générée à partir de LED de type rouge, vert et bleu (RVB), ce qui signifie que les données peuvent être transférées à travers chaque LED.

Le multiplexage par répartition en longueur d'onde Le multiplexage utilisé ici est le WDM (Multiplexage par répartition en longueur d'onde).

En outre, [I-8] a obtenu de la lumière blanche à partir de diodes électroluminescentes de quatre couleurs, ce qui donne un meilleur résultat par rapport aux LED à trois couleurs en termes d'accès multiple et des débits de données plus élevés grâce aux capacités de modulation améliorées de modulation des LD.

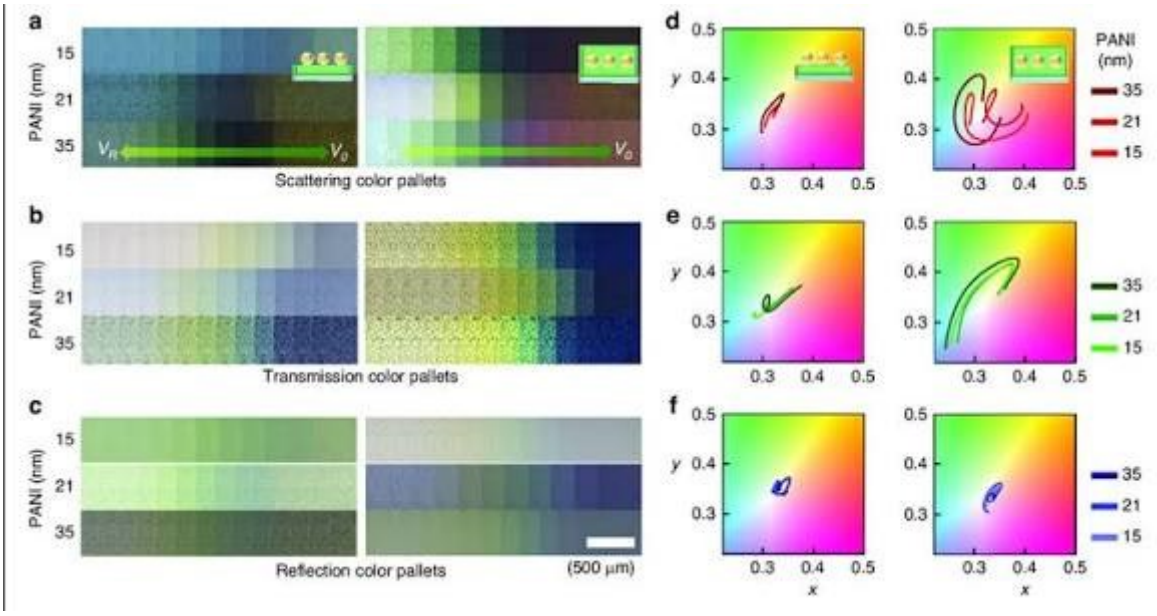


Figure I. 8 : Modulations multicolores

I.5 Avantages et inconvénients de technologie OWC :

Les communications optiques sans fil bénéficient d'une bande passante quasiment infinie et non régulée [I-23]. En effet, à la différence des systèmes RF dont le spectre est surchargée, la bande optique s'étale sur plusieurs centaines de Giga Hertz et peut être utilisée librement
(Sans licence). Cette propriété permet le développement d'applications hautes débits.

De plus, les ondes IR ont un comportement proche des ondes lumineuses, elles ne peuvent pas traverser une paroi opaque (mur) et sont rarement diffractées par une ouverture. En configuration indoor, les ondes IR restent donc confinées dans la pièce où se trouve l'émetteur. Ce confinement augmente la sécurité de la liaison optique. Cette même propriété implique aussi qu'il est possible d'utiliser des systèmes optiques identiques (utilisant les mêmes longueurs d'onde aux mêmes instants) dans différentes pièces contiguës sans aucun risque de perturbation.

Enfin, les systèmes optiques sans fil peuvent être déployés sans créer d'interférences électromagnétiques avec les systèmes RF préexistants [I-24].

Les communications optiques sans fil sont cependant pénalisées par un plus faible budget optique lié au fort niveau de bruit comparé aux communications RF.

Ce bruit peut être issu du canal optique (lumière du soleil, éclairage) ou être généré au niveau du récepteur (bruit thermique).

De plus, le fait que l'onde IR ne traverse pas les murs impose, pour la conception d'une liaison reliant plusieurs pièces, l'installation d'un point d'accès par pièce (ces points d'accès étant interconnectés par une liaison filaire). Ceci est très différent en radio où un seul émetteur peut couvrir l'équivalent d'une habitation entière (comme c'est le cas en wifi). Enfin, les systèmes optiques sont extrêmement sensibles aux phénomènes de blocages (shadowing). Ces phénomènes de blocages sont provoqués par la rupture du lien entre l'émetteur et le récepteur ou par un obstacle présent dans l'environnement [I-25].

Tableau I. 3 : Avantages et inconvénients de technologie OWC

Catégorie	Avantages (Points Forts)	Inconvénients (Limites)
Spectre et Bande passante	Bande passante quasi **infinie** et **non régulée** (sans licence). Idéal pour le haut débit.	—
Sécurité et Confinement	Les ondes ne traversent pas les murs, assurant une **sécurité naturelle** des données.	Nécessite un **point d'accès par pièce** car le signal est bloqué par les parois opaques.
Interférences	Pas d'interférences avec les systèmes RF. Possibilité de réutiliser les mêmes fréquences dans des pièces voisines.	Sensibilité au **bruit optique** (soleil, éclairage artificiel) et au bruit thermique du récepteur.
Propagation et Obstacles	—	Très sensible au **blocage (shadowing)** par des obstacles physiques entre l'émetteur et le récepteur.
Déploiement	Installation possible dans des zones sensibles aux ondes RF (hôpitaux, avions).	Infrastructure plus lourde pour une couverture multi-pièces (interconnexion filaire requise).

I.6 FSO (Free Space Optics)

La communication optique en espace libre (FSO – Free Space Optics) est une technologie de transmission sans fil qui utilise des faisceaux lumineux, généralement émis par des lasers, pour transmettre des données à travers l'atmosphère sans support physique.

Considérée comme un prolongement de la technologie fibre optique, la FSO s'en distingue par l'utilisation de l'atmosphère comme canal de propagation en lieu et place du milieu guidé, tout en garantissant des débits massifs et une largeur de bande comparable. [I-26]

I.6.1 Principe de fonctionnement de la technologie FSO

La technologie de communication optique en espace libre (Free Space Optics, FSO) repose sur la transmission de données sous forme de faisceaux lumineux à travers l'atmosphère, sans recours à un support physique comme la fibre optique.

Le principe fondamental consiste à convertir un signal électrique en signal optique à l'aide d'une source lumineuse cohérente, généralement un laser ou une diode électroluminescente (LED). Ce signal optique est ensuite modulé pour transporter l'information, puis émis dans l'espace libre en direction du récepteur.

La propagation du signal s'effectue à travers le canal atmosphérique, qui constitue un milieu de transmission ouvert mais sujet à diverses perturbations telles que l'absorption, la diffusion (scattering), les turbulences atmosphériques et les conditions météorologiques (brouillard, pluie, poussière). Ces facteurs peuvent affecter l'atténuation du signal et donc la qualité de la transmission.

À la réception, un système optique composé de lentilles et de photodétecteurs (comme les photodiodes PIN ou avalanche APD) capte le faisceau lumineux. Le signal optique est ensuite converti en signal électrique, amplifié et traité afin de récupérer l'information initiale. L'ensemble du processus nécessite une ligne de visée directe (Line-of-Sight, LOS) précise entre l'émetteur et le récepteur, ce qui impose un alignement rigoureux des équipements.

Les systèmes FSO fonctionnent généralement dans les bandes de longueurs d'onde du proche infrarouge (850 nm, 1310 nm ou 1550 nm), qui offrent un bon compromis entre performance de transmission et sécurité oculaire. Grâce à ces caractéristiques, la FSO permet d'atteindre des débits de transmission très élevés, comparables à ceux des systèmes à fibre optique, tout en conservant les avantages des communications sans fil, notamment une installation rapide, un coût réduit et une grande flexibilité.

Une liaison FSO typique se compose de trois éléments essentiels :

- **L'émetteur optique** : assure la génération, la modulation et l'émission du signal lumineux.
- **Le canal de propagation atmosphérique** : milieu de transmission influencé par les conditions environnementales.
- **Le récepteur optique** : assure la détection, la conversion et le traitement du signal reçu.

En outre, certaines techniques avancées peuvent être utilisées pour améliorer les performances des systèmes FSO, telles que la modulation optique (OOK, PPM), le multiplexage, ainsi que des méthodes de correction d'erreurs. Ces approches permettent d'optimiser la fiabilité et la disponibilité des liaisons, notamment dans des environnements difficiles.

Ainsi, la technologie FSO représente une solution prometteuse pour les communications à haut débit, en particulier dans les zones où le déploiement de la fibre optique est complexe ou coûteux [I-27] [I-28]

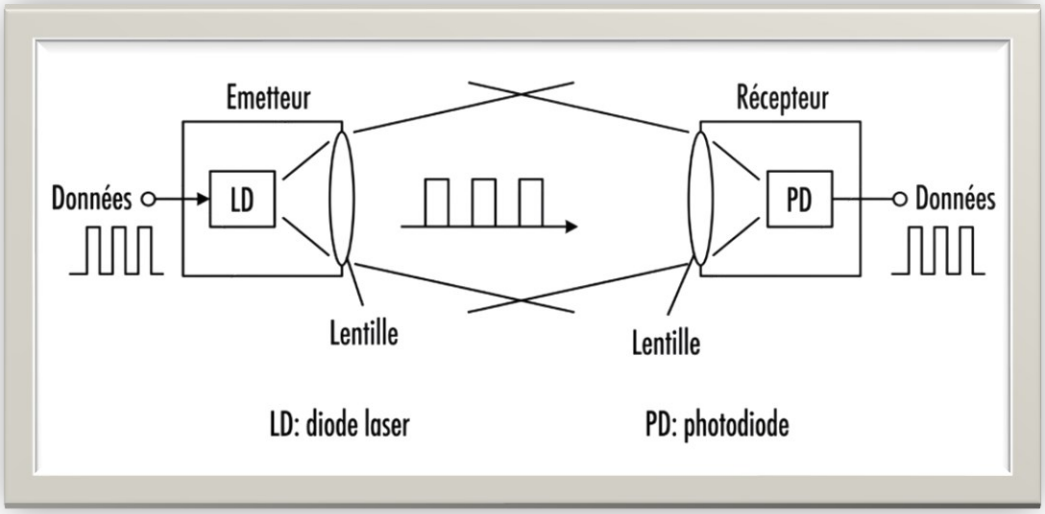


Figure I. 9 : Configuration de base d'une liaison optique en espace libre

Un système FSO typique est composé de plusieurs éléments essentiels :

- une source optique (laser diode)
- un modulateur pour coder l'information
- un canal de propagation atmosphérique
- un récepteur optique (photodiode PIN ou APD)

- un système de pointage et de suivi (PAT)

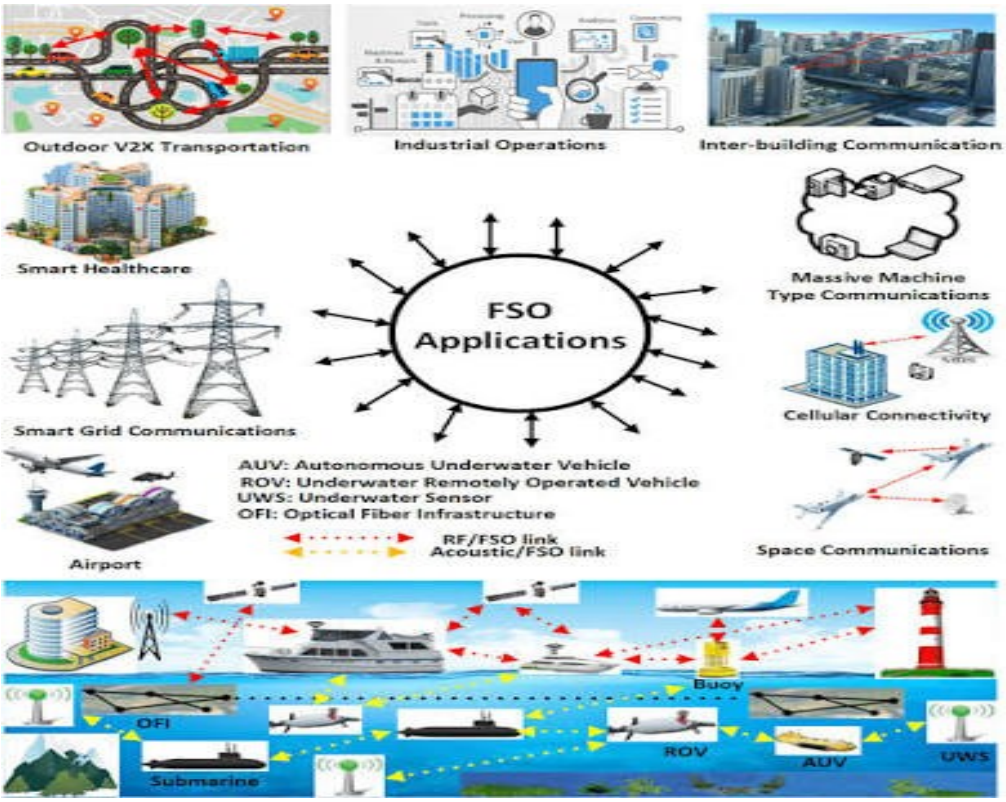


Figure I. 10 : system FSO

Avantages :

Les systèmes FSO présentent plusieurs avantages majeurs. Ils offrent une large bande passante permettant d'atteindre des débits de plusieurs Gbit/s, comparables à ceux de la fibre optique [I-29]

De plus, ils sont immunisés contre les interférences électromagnétiques, ne nécessitent pas de licence de spectre, et garantissent une sécurité élevée grâce à la directivité du faisceau optique [I-26]

Bien que performante, la technologie FSO reste vulnérable aux conditions environnementales. Les phénomènes météorologiques (brouillard, précipitations, particules) dégradent la puissance du faisceau laser par absorption et diffusion. De plus, l'instabilité thermique de l'air crée des turbulences qui induisent une scintillation, perturbant ainsi la fiabilité de la réception. [I-30]

Les erreurs de pointage constituent un obstacle technique de premier plan, surtout lors de l'utilisation de terminaux mobiles (drones, véhicules). Compte tenu de la finesse du faisceau laser, un désalignement, même infime, rompt la précision du

ciblage entre l'émetteur et le récepteur, impactant directement les performances du lien. [I-29]

Dans les systèmes modernes on peut corrige ces problèmes avec :

- systèmes de tracking automatique (PAT)
- techniques de correction d'erreurs (FEC)
- diversité spatiale

En dernier lieu, la synergie entre le FSO et les plateformes UAV facilite le déploiement de systèmes de communication mobiles. Le drone sert alors de nœud central (Laser Hub) pour relier divers points terrestres, offrant ainsi une solution de connectivité à haut débit, adaptable et rapide à mettre en œuvre.

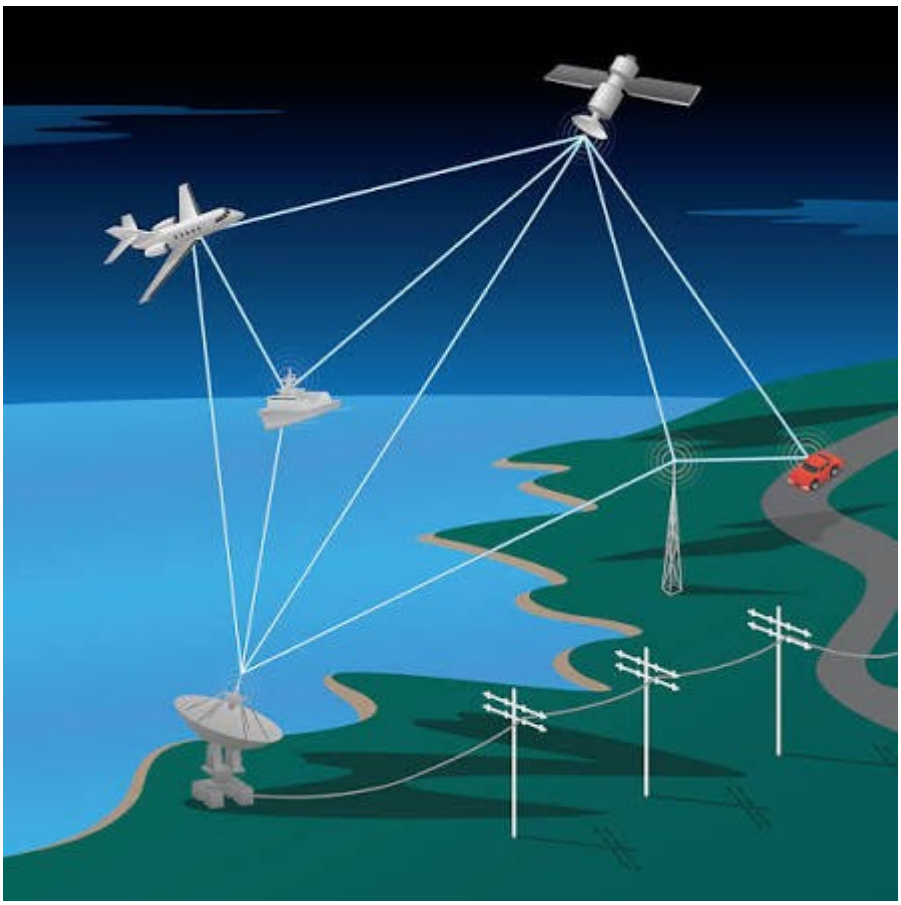


Figure I. 11 : communication FSO espace libre

I.6.2 Importance des technologies OWC et FSO

Les technologies de communication optique sans fil (OWC, Optical Wireless Communication) représentent une solution innovante permettant la transmission de données à travers l'air en utilisant le spectre lumineux.

Contrairement aux systèmes filaires traditionnels, ces technologies éliminent la nécessité d'infrastructures physiques coûteuses telles que les câbles en fibre optique, ce qui les rend particulièrement adaptées aux environnements difficiles d'accès ou aux déploiements rapides. De plus, elles exploitent un spectre non réglementé et extrêmement large, offrant ainsi un potentiel élevé en termes de capacité de transmission [I-26]

Parmi les différentes technologies OWC, la communication par espace libre (FSO, Free Space Optics) se distingue par ses performances élevées et sa grande flexibilité. Les systèmes FSO utilisent généralement des sources laser cohérentes pour transmettre des données sous forme de faisceaux optiques étroits, permettant d'atteindre des débits de l'ordre du Gbit/s sur des distances allant de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Grâce à la directivité du faisceau laser, ces systèmes offrent également un niveau élevé de sécurité, car ils sont difficiles à intercepter sans alignement précis[I-30]

Les systèmes FSO présentent plusieurs avantages majeurs. Tout d'abord, ils offrent une large bande passante, permettant de supporter des applications à très haut débit telles que la transmission vidéo haute définition et les communications de données massives. Ensuite, leur déploiement rapide constitue un atout important, notamment dans les situations d'urgence ou dans les zones où l'installation de fibres optiques est impraticable. De plus, ces systèmes sont immunisés contre les interférences électromagnétiques, ce qui les rend particulièrement adaptés aux environnements industriels ou urbains fortement perturbés sur le plan radiofréquence [I-32]

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les performances des systèmes FSO restent fortement dépendantes des conditions atmosphériques. Des phénomènes tels que le brouillard, la pluie, la neige et la turbulence atmosphérique peuvent provoquer une atténuation significative du signal optique, ainsi que des fluctuations d'intensité connues sous le nom de scintillation. Ces effets peuvent entraîner une dégradation du lien de communication, voire une interruption complète dans des conditions extrêmes [I-30] [I-31]

Dans ce contexte, l'intégration de la technologie FSO avec des plateformes mobiles telles que les drones (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) ouvre de

nouvelles perspectives pour les systèmes de communication. Les drones peuvent être utilisés comme relais optiques dynamiques (Laser Hub), permettant d'établir des liaisons temporaires ou adaptatives dans des environnements complexes ou en constante évolution. Cette approche offre une grande flexibilité en termes de couverture et de déploiement, notamment pour les applications militaires, les interventions d'urgence ou les zones rurales isolées. Néanmoins, elle introduit également de nouveaux défis, notamment en matière de suivi et d'alignement du faisceau (tracking et pointing), qui sont essentiels pour garantir la stabilité du lien FSO [I-32] [I-29]

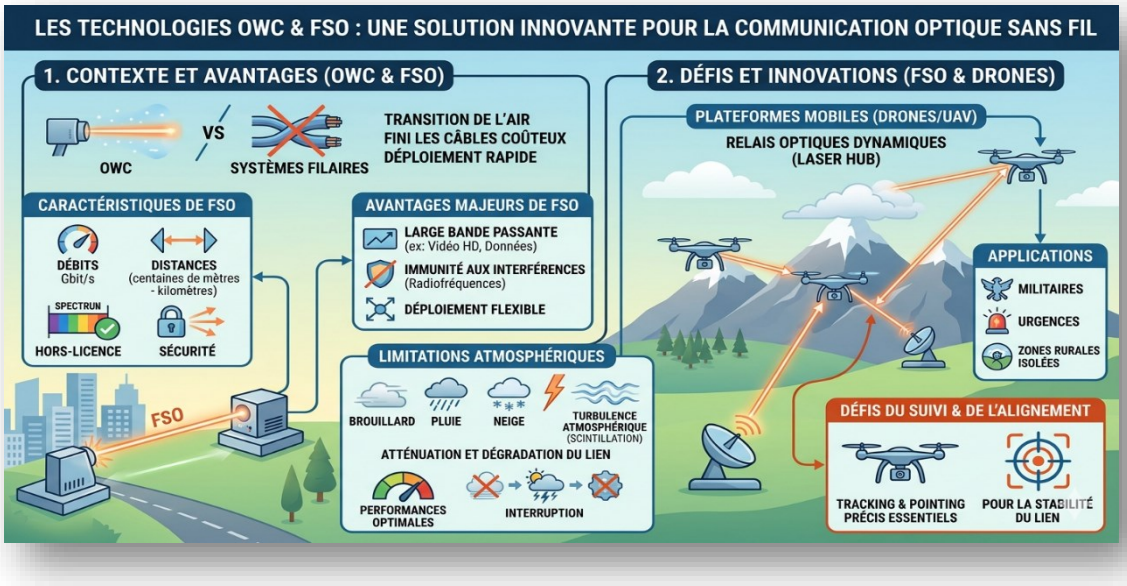


Figure I. 12 : Tec FSO –OWS avantages VS défies

I.7 Conclusion

Ce travail a permis d'étudier la pertinence et la faisabilité technique d'un système de communication optique entre une station au sol et un drone.

L'analyse démontre que la technologie FSO représente une alternative crédible aux systèmes RF traditionnels, offrant une bande passante élevée, une sécurité accrue et une immunité totale aux interférences électromagnétiques.

Cependant, l'étude souligne que la fiabilité du lien optique reste étroitement liée aux conditions environnementales. Les phénomènes tels que le brouillard, la pluie et la turbulence atmosphérique induisent une atténuation et une scintillation du

signal qui peuvent dégrader les performances. De plus, la mobilité intrinsèque du drone impose la mise en œuvre de systèmes de pointage et de suivi (PAT) extrêmement précis pour compenser les erreurs d'alignement.

En conclusion, l'utilisation de drones comme relais optiques dynamiques constitue une avancée majeure pour la connectivité des zones enclavées.

Bien que des défis techniques subsistent, notamment en matière de gestion de la mobilité et de robustesse face au climat, l'adoption de solutions telles que la diversité spatiale et les algorithmes de correction d'erreurs permet d'envisager un déploiement viable de ces architectures hybrides dans les réseaux de prochaine génération.

Chapitre II :
Conception et Modélisation de la Station au Sol

II.1 Introduction

L'explosion constante de la demande en bande passante et la saturation du spectre radiofréquence (RF) ont propulsé la communication optique en espace libre (FSO - Free Space Optics) comme une alternative incontournable pour les réseaux de nouvelle génération (6G et au-delà). En offrant des débits gigabit, une sécurité intrinsèque contre l'interception et une absence de licence de fréquences, le FSO s'impose comme une solution de rupture.

Cependant, les liaisons directes sol-satellite se heurtent à des défis majeurs, notamment l'atténuation atmosphérique sévère et les pertes géométriques sur de longues distances. C'est ici qu'intervient le concept innovant de Laser Hub basé sur Drone (UAV - Unmanned Aerial Vehicle).

Positionné comme un nœud de relais dynamique, le drone permet de segmenter la liaison optique, réduisant ainsi l'impact de la turbulence de la couche limite et offrant une flexibilité de déploiement inégalée pour des scénarios de secours ou de couverture en zones blanches.

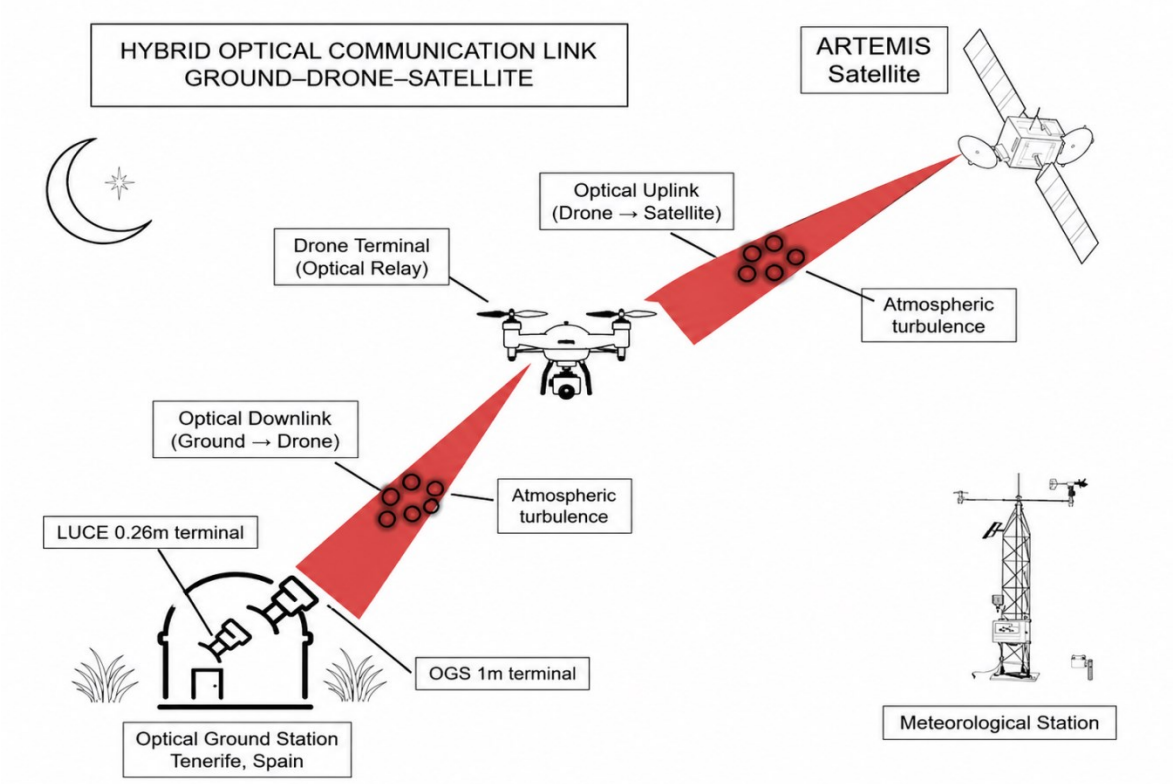


Figure II. 1 : Architecture globale d'une liaison de communication optique hybride Sol-Drone-Satellite (Laser Hub)

La réussite d'une telle architecture repose sur la capacité de la Station au Sol (OGS) à établir et maintenir une liaison ultra-précise avec une plateforme mobile et vibrante. Ce travail de recherche se concentre sur la conception et la modélisation de cette station au sol. L'enjeu est double : il s'agit d'une part de modéliser avec précision le canal de propagation atmosphérique turbulent entre le sol et le drone, et d'autre part de concevoir une architecture de réception capable de compenser les erreurs de pointage dynamiques.

Ce chapitre détaillera l'architecture optomécanique de la station, les outils de simulation employés pour valider ses performances, ainsi que le calcul rigoureux du bilan de liaison (Link Budget) indispensable à la viabilité du système.

II.2 Architecture de la Station au Sol (OGS)

L'architecture d'une station optique au sol (*Optical Ground Station – OGS*) destinée aux communications FSO (*Free Space Optical*) avec drones relais et satellites LEO constitue un élément stratégique des réseaux optiques hybrides de nouvelle génération. Contrairement aux systèmes radiofréquences classiques, les communications laser utilisent des faisceaux extrêmement directifs dont la divergence angulaire est très faible, ce qui permet d'obtenir des débits élevés et une meilleure efficacité spectrale, mais impose également des contraintes sévères de pointage et de stabilité [II.1].

La divergence typique d'un faisceau optique spatial peut être inférieure à :

$$\theta < 100\ \mu rad \quad \text{II.1}$$

ce qui signifie qu'une erreur angulaire minime peut provoquer une perte totale de la liaison optique. Selon Laser Beam Propagation through Random Media, les fluctuations atmosphériques et les erreurs de pointage représentent les principales causes de dégradation des performances dans les systèmes FSO terrestres et aérospatiaux [II.1].

Dans une architecture utilisant un drone comme *Laser Hub*, l'OGS joue le rôle d'interface intelligente entre le réseau terrestre et les plateformes aériennes ou spatiales. Elle doit assurer simultanément l'émission du signal optique, la réception des données, le suivi dynamique du drone et la compensation des perturbations atmosphériques [II.2].

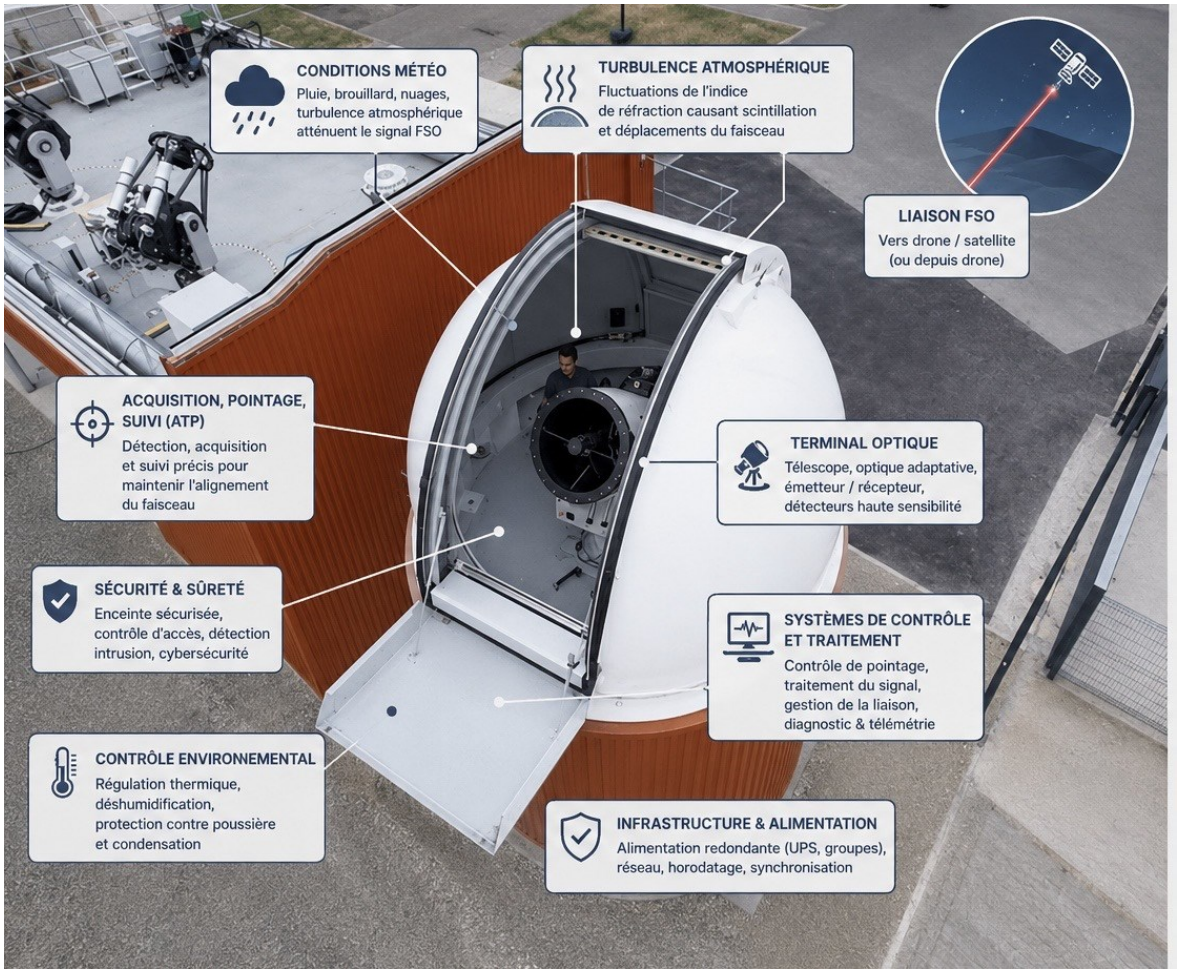


Figure II. 2 : Architecture et Défis des Stations Optiques au Sol (OGS) pour les Communications FSO

Cette illustration montre comment l'OGS agit comme une interface intelligente, connectant le réseau terrestre à un drone relais et à un satellite LEO grâce à des liaisons laser de haute précision, tout en compensant les perturbations atmosphériques.

II.3 Composants Principaux de l'OGS

II.3.1 Sous-système d'Émission Optique (Transmitter – Tx)

Le sous-système d'émission constitue la source principale du signal optique transmis vers le drone ou le satellite. Les systèmes modernes utilisent généralement des lasers à fibre dopée à l'erbium (*Erbium-Doped Fiber Amplifier – EDFA*) opérant dans la bande C autour de :

$$\lambda = 1550nm \qquad \text{II.2}$$

Cette longueur d'onde est largement utilisée dans les télécommunications optiques car elle correspond à une fenêtre atmosphérique présentant une faible absorption et une atténuation réduite.

D'après Free Space Optical Communications: Theory and Practices, la bande de 1550 nm offre également une meilleure sécurité oculaire que les systèmes fonctionnant à 850 nm, permettant l'utilisation de puissances optiques plus élevées tout en respectant les normes internationales de sécurité laser [II.2].

Le laser est généralement associé à un modulateur externe permettant l'utilisation de techniques de modulation avancées telles que :

- PPM (*Pulse Position Modulation*) ;
- OOK (*On-Off Keying*) ;
- DPSK (*Differential Phase Shift Keying*).

La modulation PPM est particulièrement adaptée aux communications spatiales à faible puissance car elle améliore l'efficacité énergétique du système. Selon Consultative Committee for Space Data Systems, cette technique est recommandée dans plusieurs standards CCSDS pour les liaisons optiques spatiales en raison de sa robustesse face au bruit photonique et au bruit de fond solaire [II.4].

Afin d'augmenter la portée de transmission, le signal optique traverse un amplificateur EDFA capable d'élever la puissance optique sans conversion optoélectronique. Les amplificateurs à fibre présentent un excellent rapport signal/bruit et une grande stabilité thermique, ce qui les rend particulièrement adaptés aux architectures FSO longue distance [II.3].

II.3.2 Système Optique de Réception (Receiver – Rx)

Le système de réception est chargé de collecter les photons transmis à travers l'atmosphère et de convertir le signal optique en signal électrique exploitable. La réception repose généralement sur un télescope astronomique de type Schmidt-Cassegrain ou Cassegrain classique, dont le diamètre varie entre 40 cm et 1 m selon la portée de la liaison et les conditions atmosphériques [II.2].

Le gain optique du système dépend directement du diamètre de l'ouverture du télescope. Plus l'ouverture est importante, plus la quantité de lumière collectée augmente, améliorant ainsi le rapport signal sur bruit (*Signal-to-Noise Ratio – SNR*). Ce gain peut être représenté approximativement par la relation :

$$\mathbf{II.3} \qquad \mathbf{Gr} \propto \boldsymbol{D^2}$$

où D représente le diamètre du télescope récepteur.

Après focalisation, le signal lumineux est dirigé vers un détecteur optique haute sensibilité. Les photodiodes à avalanche (*Avalanche Photodiodes – APD*) sont largement utilisées dans les systèmes OGS en raison de leur gain interne élevé et de leur capacité à détecter des signaux extrêmement faibles [II.1]. Les APD fonctionnent grâce à un phénomène de multiplication d'électrons permettant d'amplifier le courant photoélectrique généré par les photons incidents.

Dans les systèmes les plus avancés, les APD peuvent être remplacées par des détecteurs supraconducteurs (*Superconducting Nanowire Single Photon Detectors – SNSPD*) offrant une sensibilité proche du comptage photonique, particulièrement utile pour les communications optiques profondes (*Deep Space Optical Communications*) [II.3].

II.3.3 Chaîne PAT (Pointing, Acquisition and Tracking)

Le système PAT (*Pointing, Acquisition and Tracking*) représente l'élément le plus critique d'une OGS destinée aux drones ou satellites mobiles. Sa mission consiste à maintenir un alignement permanent entre l'émetteur et le récepteur malgré les mouvements rapides du drone, les vibrations mécaniques et les perturbations atmosphériques [II.1].

Le sous-système de pointage repose généralement sur un miroir à direction rapide (*Fast Steering Mirror – FSM*) piloté par des actionneurs piézoélectriques à haute vitesse. La fréquence de correction dépasse souvent :

$$f > 500\ \text{Hz} \quad \text{II.4}$$

afin de compenser efficacement les micro-vibrations (*jitter*) générées par les hélices et moteurs du drone [II.3].

Le processus PAT comprend trois phases principales :

1. **Pointing** : orientation initiale vers la cible grâce aux coordonnées GPS et aux éphémérides ;
2. **Acquisition** : détection du signal optique via un laser balise (*beacon laser*) ;
3. **Tracking** : maintien automatique de l'alignement par boucle de rétroaction.

La phase d'acquisition utilise généralement une caméra CCD ou CMOS à large champ afin de détecter le faisceau balise émis par le drone ou le satellite. Une fois la cible détectée, le système réduit progressivement le champ de vision pour augmenter la précision du suivi [II.2].

Selon Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques, les erreurs de pointage représentent l'un des facteurs dominants de perte dans les communications optiques aériennes et spatiales, parfois davantage que l'atténuation atmosphérique elle-même [II.3].

II.4 Intégration avec les Drones et Satellites LEO

II.4.1 Liaison OGS – Drone (*Laser Hub*)

Dans l'architecture hybride Sol–UAV–Satellite, le drone agit comme un relais optique intermédiaire situé au-dessus des couches nuageuses basses. Cette approche permet d'améliorer considérablement la disponibilité des communications FSO dans les environnements fortement nuageux [II.3].

Cependant, la liaison entre l'OGS et le drone se déroule entièrement dans la troposphère, région caractérisée par une forte turbulence atmosphérique.

Cette turbulence est généralement décrite par le coefficient structural de réfraction :

$$C_n^2 \quad \text{II.5}$$

Les variations de ce paramètre provoquent plusieurs effets dégradants :

-scintillation ;

-élargissement du faisceau ;

-fluctuations d'intensité ;

-déformation du front d'onde ;

-erreurs de phase.

D'après Laser Beam Propagation through Random Media, ces phénomènes deviennent particulièrement critiques lorsque la propagation s'effectue près du sol ou dans des zones urbaines fortement turbulentes [II.1].

Pour limiter ces perturbations, les OGS avancées intègrent des systèmes d'optique adaptative utilisant :

- des capteurs de front d'onde ;
- des miroirs déformables ;
- des algorithmes de correction temps réel.

Ces systèmes permettent de corriger dynamiquement les distorsions atmosphériques avant la détection du signal optique [II.2].

II.4.2 Relais vers les Satellites LEO

Le drone relaie ensuite les données vers les satellites en orbite basse (*Low Earth Orbit – LEO*). Cette architecture présente plusieurs avantages :

- réduction de l'atténuation due aux nuages ;
- amélioration de la disponibilité du canal optique ;
- augmentation du débit global ;
- réduction de la latence par rapport aux satellites GEO.

L'OGS doit synchroniser précisément les trajectoires orbitales des satellites grâce aux données d'éphémérides et aux algorithmes de prédiction de mouvement [II.3]. La vitesse relative élevée des satellites LEO impose des systèmes de poursuite capables de maintenir une précision angulaire extrêmement élevée pendant toute la durée de visibilité du satellite.
Les communications respectent généralement les spécifications du standard :
Consultative Committee for Space Data Systems
notamment le document CCSDS 141.0-B-1 définissant les paramètres de la couche physique des communications optiques spatiales [II.4].

II.5 Modélisation du Système

La modélisation d'un système de communication optique sans fil (*Free Space Optical – FSO*) reliant une station optique au sol (*Optical Ground Station – OGS*), un drone relais (*Laser Hub*) et un satellite LEO représente une étape fondamentale pour l'évaluation des performances réelles de la liaison optique dans un environnement atmosphérique complexe. Contrairement aux systèmes radiofréquences, les communications optiques utilisent des faisceaux laser fortement directifs présentant une très faible divergence angulaire, ce qui améliore considérablement le débit et la sécurité des transmissions mais augmente fortement la sensibilité aux perturbations atmosphériques et aux erreurs de pointage [II.1].
Dans les liaisons FSO air-sol, la propagation du faisceau laser s'effectue principalement dans la troposphère, région caractérisée par de fortes variations thermiques, des gradients de pression et des fluctuations aléatoires de l'indice de réfraction de l'air. Ces phénomènes provoquent plusieurs effets physiques dégradant la qualité de transmission :

- l'atténuation atmosphérique ;
- la scintillation optique ;
- l'élargissement du faisceau (*beam spreading*) ;

- la dérive angulaire (*beam wander*) ;
- les pertes de cohérence ;
- les fluctuations de phase et d'intensité [II.1][II.2].

Selon Laser Beam Propagation through Random Media, la turbulence atmosphérique constitue la principale limitation des systèmes FSO terrestres et aériens, particulièrement pour les communications proches du sol où les échanges thermiques sont les plus importants [II.1].

II.5.1 Modélisation de la Turbulence Atmosphérique

La turbulence atmosphérique résulte des variations aléatoires de température et de pression dans l'air. Ces variations entraînent des fluctuations locales de l'indice de réfraction, modifiant continuellement la trajectoire et la phase du faisceau optique [II.1].

Le paramètre principal utilisé pour caractériser la turbulence est la constant de structure de l'indice de refraction:

$$C_n^2 \quad \text{II.6}$$

Cette grandeur représente la puissance des fluctuations turbulentes dans l'atmosphère et s'exprime en :

$$m^{-2/3} \quad \text{II.7}$$

D'après Free Space Optical Communications, les valeurs typiques de :

$$C_n^2 \quad \text{II.8}$$

Varient entre :

$$10^{-17} \leq C_n^2 \leq 10^{-13} \quad \text{II.9}$$

selon les conditions météorologiques, l'altitude et l'environnement de propagation [II.2].

Les faibles valeurs correspondent à une turbulence légère observée en haute altitude ou durant la nuit, tandis que les fortes valeurs apparaissent généralement dans les environnements urbains chauds ou près de la surface terrestre pendant la journée [II.1].

II.5.1.1 Théorie de Kolmogorov et Structure de la Turbulence

La modélisation moderne de la turbulence atmosphérique repose essentiellement sur la théorie statistique de Kolmogorov. Cette théorie considère que l'énergie turbulente est transférée des grandes structures atmosphériques vers des tourbillons de plus en plus petits jusqu'à dissipation visqueuse [II.5].

Selon cette approche, les fluctuations de l'indice de réfraction suivent un spectre de puissance donné par :

$$\Phi n(\kappa)=0.033C_n^2\kappa^{-11/3} \quad \text{II.10}$$

où :

- Φn(κ) représente la densité spectrale des fluctuations ;
- κ désigne la fréquence spatiale turbulente.

Ce modèle est largement utilisé dans les simulations FSO pour représenter les effets statistiques de la turbulence sur la propagation laser [II.1].

Les travaux de Andrey Kolmogorov constituent encore aujourd'hui la base théorique des modèles de propagation optique turbulente employés dans les communications spatiales et aériennes [II.5].

II.5.1.2 Paramètre de Fried et Cohérence Atmosphérique

La turbulence atmosphérique affecte également la cohérence spatiale du faisceau laser. Cette propriété est caractérisée par le paramètre de Fried :

$$r0 \quad \text{II.11}$$

appelé également diamètre de cohérence atmosphérique [II.1].

Il est défini par :

$$r0=[0.423\,k^2\int C_n^2(z)dz]^{-3/5} \quad \text{II.12}$$

où :

- k représente le nombre d'onde optique ;

- z désigne la distance de propagation.

Lorsque :

$$D > r_0 \quad \text{II.13}$$

le diamètre du télescope devient supérieur à la taille des cellules turbulentes cohérentes, provoquant une forte dégradation du front d'onde [II.1].

Selon Laser Beam Propagation through Random Media, le paramètre de Fried joue un rôle essentiel dans la conception des systèmes d'optique adaptative utilisés dans les stations OGS [II.1].

II.5.2 Modèle Hufnagel-Valley (H-V)

Le modèle de Hufnagel-Valley (*Hufnagel-Valley Model – H-V*) constitue la référence la plus utilisée pour décrire l'évolution verticale de la turbulence atmosphérique dans les systèmes optiques spatiaux [II.2].

Il modélise la variation de :

$$c_n^2(h) \quad \text{II.14}$$

en fonction de l'altitude h :

$$c_n^2(h) = 0.00594\left(\frac{v}{27}\right)^2 (10^{-5}h)^{10} e^{-\frac{h}{1000}} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1500} A e^{-h/100} \quad \text{II.15}$$

Ce modèle combine trois composantes physiques :

1. la turbulence de haute altitude liée aux vents ;
2. la turbulence moyenne de la troposphère ;
3. la turbulence proche du sol causée par les gradients thermiques [II.1].

Le paramètre :v représente la vitesse RMS du vent en altitude, tandis que :

A correspond au niveau de turbulence au sol.

Selon Laser Beam Propagation through Random Media, le modèle H-V offre une excellente approximation des profils atmosphériques mesurés expérimentalement dans les systèmes de communication optique spatiale [II.1].

II.5.3 Scintillation Optique

La scintillation correspond aux fluctuations aléatoires de la puissance optique reçue provoquées par la turbulence atmosphérique [II.2].

Lorsque le faisceau traverse des cellules turbulentes d'indices différents, plusieurs interférences constructives et destructives apparaissent, créant des variations rapides de l'intensité lumineuse reçue.

L'intensité des scintillations est caractérisée par l'indice de scintillation :

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2\rangle - \langle I\rangle^2}{\langle I^2\rangle} \quad \text{II.16}$$

Dans les régimes de turbulence forte :

$$\sigma_I^2 > 1 \quad \text{II.17}$$

ce qui signifie que les fluctuations de puissance deviennent très importantes [II.1].

Selon Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques, la scintillation constitue l'un des principaux facteurs responsables de l'augmentation du BER dans les systèmes FSO longue distance [II.3].

II.5.4 Modèles Statistiques du Canal Atmosphérique

II.5.4.1 Modèle Log-Normal

Dans un régime de turbulence faible à modérée, les fluctuations du signal optique sont généralement modélisées par une distribution Log-Normale [II.6].

La densité de probabilité du signal reçu est donnée par :

$$p(I) = 1/(2I\sqrt{(2\pi\sigma_X^2)})e\text{^} - \left(\frac{\left(\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)+2\sigma_X^2\right)^2}{8\sigma_X^2}\right) \quad \text{II.18}$$

Ce modèle est adapté lorsque les variations de puissance restent relativement limitées [II.6].

II.5.4.2 Modèle Gamma-Gamma

Dans les environnements soumis à une turbulence modérée ou forte, le modèle Gamma-Gamma offre une représentation beaucoup plus précise des fluctuations irradiantes [II.6].

Ce modèle prend en compte :

- les grandes cellules turbulentes ;
- les petites cellules turbulentes ;
- les fluctuations lentes et rapides du canal.

Selon :

Mathematical Model for the Irradiance Probability Density Function of a Laser Beam Propagating through Turbulent Media

la distribution Gamma-Gamma permet d'obtenir une excellente concordance entre les prédictions théoriques et les mesures expérimentales des systèmes FSO atmosphériques [II.6].

II.5.5 Atténuation Atmosphérique

Outre la turbulence, le signal optique subit une atténuation due :

- à l'absorption moléculaire ;
- à la diffusion Rayleigh ;
- à la diffusion de Mie ;
- au brouillard ;
- à la pluie ;
- aux aérosols atmosphériques.

L'atténuation du signal peut être représentée par la loi de Beer-Lambert :

$$P_r = P_t\, e^{-\gamma L} \qquad \text{II.19}$$

où :

-Pt représente la puissance transmise ;

-Pr la puissance reçue ;

-γ le coefficient d'atténuation ;

-L la distance de propagation.

Selon Free Space Optical Communications, le brouillard dense constitue la condition météorologique la plus critique pour les systèmes FSO, pouvant provoquer des atténuations supérieures à : [II.2].

$$300\ \text{dB/km} \qquad \text{II.20}$$

II.5.6 Outils de Simulation

Les performances du système hybride Sol–Drone–LEO sont généralement évaluées à l'aide du logiciel : **OptiSystem**



Figure II. 3 : oprtisystem

largement utilisé dans la recherche en communications photoniques.

Ce logiciel permet de simuler :

-les lasers EDFA ;

-les canaux turbulents ;

-les pertes atmosphériques ;

-les systèmes PAT ;

-les détecteurs APD ;

-les modulations OOK, PPM et DPSK ;

-les performances BER et Q-factor.

Le taux d'erreur binaire (*Bit Error Rate – BER*) constitue l'indicateur principal de qualité :

BER

Le facteur de qualité du signal est donné par :

$$\mathbf{II.21} \quad Q = \frac{(I_1 - I_0)}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

Une augmentation de la turbulence entraîne :

-une diminution du Q-factor ;

-une fermeture du diagramme de l'œil ;

- augmentation du BER ;

-une réduction de la portée du lien optique [2].

II.6 Etude de cas

II.6.1 Calcul le bilan du laison

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.

II.6.1.1 Rapport signal sur bruit (C/N0)

Le rapport C/N 0 représente la puissance de la porteuse (C) divisée par la densité spectrale de bruit (N 0), exprimée en dB-Hz. Il caractérise la qualité de la liaison en tenant compte de la bande passante. [II.7]

$$\frac{\mathbf{S}}{\mathbf{B}} = \frac{\mathbf{P_s}}{\mathbf{P_b}}$$

$$\frac{\boldsymbol{S}}{\boldsymbol{B}} = \left(\frac{\boldsymbol{U_s}}{\boldsymbol{U_b}}\right)^{\mathbf{2}}$$

$$\mathbf{II.22} \quad \frac{\boldsymbol{S}}{\boldsymbol{B}}\,(\boldsymbol{dB}) = \mathbf{10}\,\boldsymbol{log}\left(\frac{\boldsymbol{S}}{\boldsymbol{B}}\right)$$

II.6.1.2 Rapport énergie par bit sur bruit (Eb/N0)

Le rapport E b/N 0 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). [II.7]

$$\frac{\mathbf{C}}{\mathbf{N_0}} = \frac{\mathbf{E_b}}{\mathbf{N_0}} * \mathbf{R}$$

$$\text{II.23} \quad \frac{C}{N_0}(dB) = \frac{E_b}{N_0}(dB) + 10\,log(R)$$

Où **R** est le taux réel de bits d'information.

II.6.1.3 Affaiblissement de propagation (AP)

L'affaiblissement de propagation (Ap) est défini comme le rapport de la puissance délivrée aux bornes de l'antenne d'émission, à la puissance disponible à la sortie d'une antenne de réception isotrope. [II.7]

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

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

II.6.1.4 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. [II.7]

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

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.

II.6.1.5 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. [II.7]

$$\text{II.26} \quad \mathbf{T_A = T_s + (1-\eta)T_0}$$

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

D : diamètre de l'antenne parabolique.

η : Efficacité de l'antenne (rendement) généralement entre **50%** et **70%**.

λ : Longueur d'onde (en m).

Alors en décibel :

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

II.6.1.6 Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente (PIRE)

La **PIRE** est la puissance nécessaire à une antenne isotrope pour produire la même densité de flux de puissance que l'antenne réelle dans une direction donnée (généralement celle du lobe principal). Elle permet de quantifier la performance globale de l'émetteur en combinant la puissance de l'amplificateur et le gain de l'antenne. [II.7]

En valeur linéaire, elle s'exprime par :

$$\text{II.29} \quad \mathbf{PIRE} = \mathbf{P_e} * \mathbf{G_e}$$

En échelle logarithmique (décibels), l'équation devient une somme simple :

$$\text{II.30} \quad \mathbf{PIRE\,[dBW]} = \mathbf{P_e\,[dBW]} + \mathbf{G_e\,[dBi]}$$

Où :

P e : est la puissance injectée à l'entrée de l'antenne (en Watts ou dBW). Elle correspond à la puissance de l'émetteur moins les pertes dans les câbles et connecteurs.

G e : est le gain de l'antenne d'émission par rapport à une source isotrope (en dBi).

Remarque technique :

La PIRE est un paramètre fondamental pour le calcul de la densité de puissance à une distance d (voir section **g**). Dans le cadre d'une station au sol ou d'un segment spatial, elle est souvent limitée par des réglementations internationales afin d'éviter les interférences entre différents systèmes de communication.

II.6.1.7 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. À la distance d , toute la puissance est répartie :

$$\text{II.31} \quad P_d \left(\frac{W}{m^2}\right) = \frac{(P_e G_e)}{(4 \pi d^2)}$$

P e : Puissance d'émission.

G e : Gain d'émission.

II.6.1.8 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.

II.6.1.9 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 :

$$\text{II.32} \quad C = W \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

Avec :

C : La capacité de canal (bit/sec).

W : La taille de canal (Hz).

S/N : Le rapport signal sur bruit.

II.6.1.10 Température de bruit

La température de bruit du système est liée à la densité spectrale de bruit thermique :

$$\text{II.33} \quad N_0 = K \cdot T_B$$

$$\text{II.34} \quad N_0\,[dB] = 10\log(K) + 10\log(T_B)$$

Avec :

K : Constante de Boltzmann $1{,}38.10^{-23}$ W/Hz/K

T B : Température de récepteur en degré Kelvin.

N 0 : Puissance du bruit thermique.

II.6.1.11 Efficacité spectrale

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

$$\text{II.35} \quad Eff = D_b / B \ (bits/s/Hz)$$

II.6.1.12 Bilan de liaison pour la voie montante

Le bilan de liaison pour la voie montante calcule le rapport C/N 0 à l'entrée du récepteur satellite.

Bilan de liaison voie montante :

$$\frac{C}{N_0} = \frac{(PIRE_{Leo} \cdot G_{geo} \cdot L_m)}{KT} \quad \text{II.36}$$

Avec :

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

$$PIRE\,[dBw] = G_e\,[dBi] + P_e\,[dBw] \quad \text{II.37}$$

II.6.1.13 Bilan de liaison global

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

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_T} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{up}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{down}} \quad \text{II.38}$$

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

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T = \frac{C_{up}}{N_{0\,up}}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{down} = \frac{C_{down}}{N_{0\,down}}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T = \frac{C_{down}}{N_{0\,t}} \quad \text{II.39}$$

Avec :

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

$$N_0 = k \cdot T \quad \text{II.40}$$

- **T** : Température de bruit du système

$$\text{II.41} \quad N = N_0 \cdot B_N$$

N : Bruit total.

II.6.1.14 Puissance reçue (Équation de Friis)

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

$$\text{II.42} \quad \frac{P_r}{P_t} = G_t(\theta_t, \emptyset_t) G_r(\theta_r, \emptyset_r) \left(\frac{\lambda}{(4\pi R)}\right)^2 (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2)|a_t \cdot a_r|^2 e^{-\alpha R}$$

$$\text{II.43} \quad P_r = \frac{A_r}{4\pi R^2} = P_e G_e G_r \left(\frac{\lambda}{(4\pi R)}\right)^2$$

- **G t, G r** : Sont les gains linéaires des antennes d'émission et de réception.
- **Γ _t et Γ $_r$**: Sont les coefficients de réflexion des antennes.
- **At et ar** : Sont les vecteurs de polarisation des antennes.
- α : est le coefficient d'absorption du milieu.
- **R** : est la distance émetteur-récepteur.

II.7 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 (Low Earth Orbit) et un satellite GEO (Geostationary Orbit)

Tableau II. 1 : Paramètres du Bilan de Liaison

Paramètre	Symbole	Valeur (FSO)	Valeur (OWC)
Puissance optique Tx	P-tx	2W ≈ 33 dBm	2W ≈ 33 dBm
Gain Tx	G-tx	30 dB	30 dB
Gain Rx	G-rx	24,8 dB	8 dB
Perte de pointage	L-point	1,6	1,6
Atténuation atmosphérique	L-atm	50 dB	0 dB
Perte Tx	L-tx	2 dB	2 dB
Perte Rx	L-rx	2 dB	2 dB
Longueur d'onde	λ	1550 nm	1550 nm

Paramètre	Symbole	Valeur (FSO)	Valeur (OWC)
Diamètre ouverture Tx	—	15 cm	20 cm
Diamètre ouverture Rx	—	25 cm	15 cm
Fréquence	f	193,5 THz	193,5 THz

II.7.1 Rapport de Liaison — FSO & OWC

Tableau 2.2 FSO — Résultats par distance (1 à 15 km)

Distance (km)	FSPL (dB)	Perte totale (dB)	Prx (dBm)	C/N Descendant (dB)	C/N Montant (dB)	C/N Total (dB)
1	128.1	183.7	-95.9	4.1	4.1	1.09
2	134.1	189.7	-101.9	-1.9	-1.9	-4.91
3	137.6	193.2	-105.4	-5.4	-5.4	-8.41
4	140.1	195.7	-107.9	-7.9	-7.9	-10.91
5	142.1	197.7	-109.9	-9.9	-9.9	-12.91
6	143.7	199.3	-111.5	-11.5	-11.5	-14.51
7	145	200.6	-112.8	-12.8	-12.8	-15.81
8	146.1	201.7	-113.9	-13.9	-13.9	-16.91
9	147.1	202.7	-114.9	-14.9	-14.9	-17.91
10	148.1	203.7	-115.9	-15.9	-15.9	-18.91
11	149	204.6	-116.8	-16.8	-16.8	-19.81
12	149.7	205.3	-117.5	-17.5	-17.5	-20.51
13	150.4	206	-118.2	-18.2	-18.2	-21.21
14	151	206.6	-118.8	-18.8	-18.8	-21.81
15	151.6	207.2	-119.4	-19.4	-19.4	-22.41

Tableau II. 2 : OWC — Résultats par distance

Distance (km)	FSPL (dB)	Perte totale (dB)	Prx (dBm)	C/N Descendant (dB)	C/N Montant (dB)	C/N Total (dB)
20	154.1	159.7	-88.7	11.3	11.3	8.29
50	162.1	167.7	-96.7	3.3	3.3	0.29
100	168.1	173.7	-102.7	-2.7	-2.7	-5.71
200	174.1	179.7	-108.7	-8.7	-8.7	-11.71
300	177.6	183.2	-112.2	-12.2	-12.2	-15.21
400	180.1	185.7	-114.7	-14.7	-14.7	-17.71
500	182.1	187.7	-116.7	-16.7	-16.7	-19.71
600	183.7	189.3	-118.3	-18.3	-18.3	-21.31
700	185	190.6	-119.6	-19.6	-19.6	-22.61
1000	188.1	193.7	-122.7	-22.7	-22.7	-25.71
35000	218.9	224.5	-153.5	-53.5	-53.5	-56.51

Tableau II. 3 : Paramètres

Paramètre	Valeur
Puissance du bruit N (dBm)	-100
Formule C/N Total	1/(1/(C/N montant)+1/(C/N descendant))

II.8 Conclusion

ce Chapitre a permis de jeter les bases techniques et théoriques nécessaires à la réalisation d'une station au sol dédiée à un Laser Hub sur drone. À travers l'étude de l'architecture système, nous avons identifié que le sous-système de pointage, acquisition et poursuite (PAT) constitue le verrou technologique principal pour contrer les instabilités mécaniques du drone.

La modélisation effectuée, basée sur les profils de turbulence de Hufnagel-Valley et les distributions statistiques de Gamma-Gamma, confirme que si le canal optique est vulnérable aux aléas météorologiques, l'utilisation d'une longueur d'onde de 1550 nm combinée à une optique de réception à large ouverture permet d'atteindre des marges de liaison robustes.

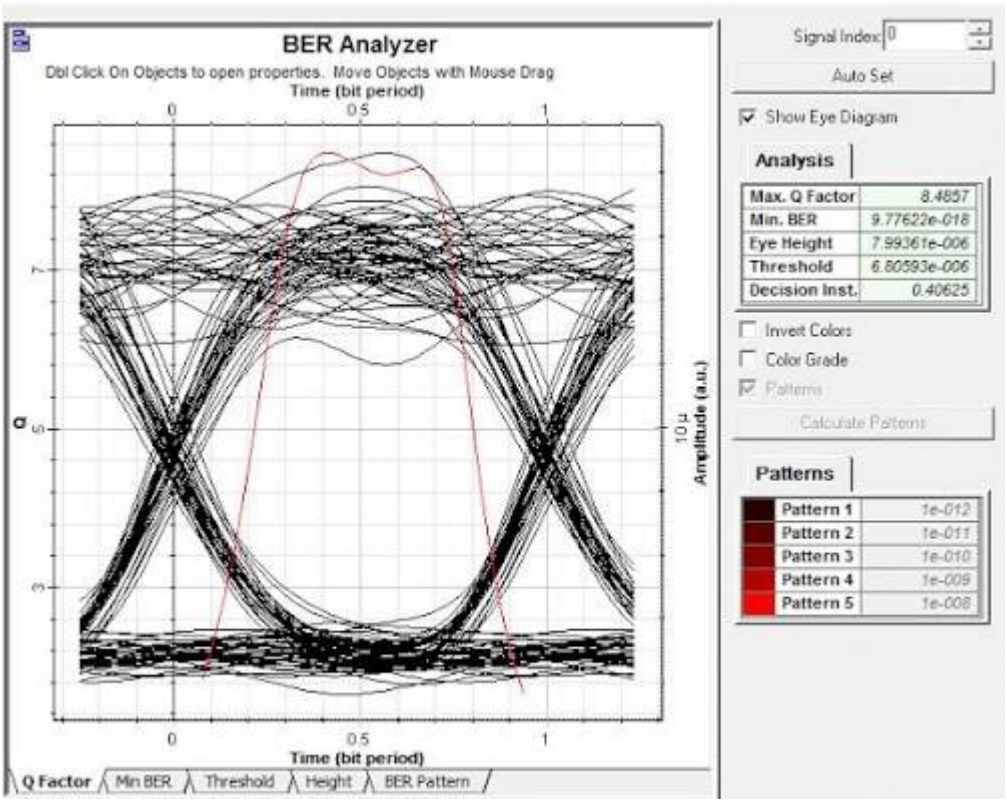


Figure II. 4 : Diagramme de l'œil et BER pour communication optique FSO

Les résultats du bilan de liaison démontrent qu'une transmission à haut débit (> 1 Gbps) est théoriquement possible sur des distances sol-drone de plusieurs kilomètres, à condition de maintenir une erreur de pointage inférieure à quelques dizaines de microradians. Cette

étude de cas et la fixation des paramètres techniques servent désormais de référence pour les phases expérimentales ou les simulations avancées sous OptiSystem.

En conclusion, la station au sol ne doit plus être vue comme un simple récepteur passif, mais comme un système adaptatif intelligent, capable de s'ajuster en temps réel aux fluctuations de l'atmosphère et aux mouvements du hub volant. Ces fondations permettent d'envisager, dans le chapitre suivant, l'analyse approfondie de la qualité de service (QoS) et l'optimisation des protocoles de transport de données.

Chapitre III :

Analyse des Résultats et Perspectives

III.1 Introduction

Le paysage mondial des télécommunications connaît une mutation profonde, marquée par une transition vers des solutions à ultra-haute capacité capables de supporter la mobilité extrême des nouveaux vecteurs de données. Au cœur de cette évolution, le projet de « Recherche et Conception d'une Station au Sol pour la Communication Optique pour un Hub Laser à base de Drone » s'inscrit comme une réponse technologique majeure.

L'objectif de ce chapitre est de confronter les modèles analytiques du bilan de liaison aux contraintes opérationnelles réelles.

Cette analyse ne se limite pas à la simple vérification de la puissance reçue ; elle explore la dynamique complexe entre :

L'architecture matérielle : L'optimisation des gains d'antenne et de la PIRE pour compenser les pertes de propagation inhérentes au milieu atmosphérique.

La robustesse du signal : L'évaluation du BER (Taux d'Erreur Binaire) et du facteur de qualité (Q-factor) à travers des simulations numériques rigoureuses, indispensables pour valider la fiabilité du transfert de données entre le segment spatial et le drone hub.

Le contexte d'implémentation : L'intégration de ces technologies dans l'écosystème numérique algérien, en tenant compte des facteurs climatiques et des infrastructures existantes.

III.2 Objectifs du chapitre

Ce chapitre propose une exploration approfondie de la simulation des systèmes de communication optique sans fil (OWC) à travers l'utilisation du logiciel OptiSystem. Il met en exergue l'importance cruciale de la simulation numérique comme levier de conception, d'optimisation et d'analyse de ces réseaux.

Après une présentation détaillée des fonctionnalités spécifiques d'OptiSystem dédiées à la modélisation des transmissions optiques en milieu non guidé, le lecteur sera guidé à travers les concepts fondamentaux de la technologie OWC et les étapes méthodologiques nécessaires à leur mise en œuvre logicielle.

L'étude s'attachera également à caractériser l'influence des variables environnementales sur la qualité de service, tout en exploitant les outils d'évaluation intégrés pour quantifier les performances globales. Enfin, ce chapitre s'appuie sur des cas pratiques et des études comparatives de différentes configurations pour illustrer l'application concrète de la simulation dans la résolution de problématiques d'ingénierie liées aux systèmes OWC.

III.3 Rôle stratégique de la simulation dans les systèmes OWC

Dans le cycle de développement des technologies de communication optique sans fil (**OWC**), la simulation numérique s'impose comme une étape incontournable. En permettant une évaluation rigoureuse des performances en amont de toute réalisation matérielle, elle s'affranchit des contraintes financières et temporelles inhérentes à la fabrication de prototypes physiques successifs.

L'exploration virtuelle de multiples scénarios offre aux ingénieurs la capacité de prédire le comportement du système dans des contextes variés, d'ajuster finement les paramètres clés et d'anticiper les verrous techniques. Par exemple, faire varier la longueur de la liaison permet d'analyser l'évolution fine du taux d'erreur binaire (**BER**) ou du facteur de qualité (Q-factor), optimisant ainsi l'architecture globale. De plus, la simulation offre la flexibilité nécessaire pour tester diverses techniques de modulation et architectures de récepteurs sans déployer de bancs d'essai onéreux.

L'un des défis majeurs des systèmes OWC réside dans leur déploiement au sein de milieux hautement hétérogènes. Qu'il s'agisse de liaisons atmosphériques, indoor ou sous-marines, la modélisation d'environnements complexes s'avère essentielle. Des outils spécialisés comme **OptiSystem** permettent d'intégrer avec précision des phénomènes physiques critiques tels que la diffraction, la diffusion et l'absorption, afin d'évaluer leur impact direct sur la qualité de la transmission. Au-delà de ce gain en rapidité, en coût et en flexibilité, la simulation joue un rôle clé dans la validation des modèles théoriques en confrontant les résultats numériques aux prédictions analytiques. En identifiant les points de vulnérabilité dès la phase de test virtuel, cette approche garantit la robustesse et la fiabilité des choix de conception avant le déploiement réel du système.[III.1] [III.2]

III.4 OptiSystem : Présentation générale

La conception et l'analyse des systèmes de communication optiques actuels se heurtent à la complexité croissante des dispositifs non-linéaires et des sources de bruit non gaussiennes. Ces contraintes rendent les approches manuelles particulièrement chronophages, imposant désormais l'usage d'outils logiciels de pointe pour garantir efficacité et rapidité. Dans ce contexte, notre étude s'appuie sur OptiSystem, un simulateur innovant dédié à la couche physique des réseaux optiques. Ce logiciel permet de concevoir,

de tester et d'optimiser virtuellement n'importe quel type de liaison grâce à une modélisation rigoureuse et réaliste des systèmes.

OptiSystem se distingue par une vaste bibliothèque de composants actifs et passifs dotés de paramètres réels, dont les capacités peuvent être étendues par l'ajout de modules personnalisés ou l'interconnexion avec des outils tiers. L'utilisateur dispose d'une interface graphique complète pour orchestrer la disposition des composants et piloter les modèles de simulation. Véritable environnement interactif, ce logiciel permet aux ingénieurs de modéliser aussi bien un dispositif élémentaire qu'une architecture réseau complexe.

La méthodologie employée au sein de cet environnement se décompose alors en deux phases essentielles : la construction du schéma bloc, suivie de l'analyse approfondie des résultats obtenus. [III.3]



Figure III 1 : OptiSystem simulateur

III.4.1 Historique et évolution

Développé par la société canadienne **Optiwave Systems Inc.**, OptiSystem s'est imposé comme un logiciel de référence pour la conception de réseaux de communication optique dès sa commercialisation au tournant des années 2000. Depuis la fondation de l'entreprise en 1994, l'outil a bénéficié d'une évolution technologique constante, intégrant progressivement des avancées majeures telles que les circuits photoniques et, plus récemment, l'intelligence artificielle avec la version 22.1 parue en 2025.

Cette capacité d'innovation en fait un instrument puissant et actuel, adopté dans plus de 70 pays par une vaste communauté incluant le secteur académique, l'industrie, ainsi que des centres de recherche et des institutions de défense. Reconnu pour sa précision et son

aptitude à modéliser des environnements complexes, OptiSystem garantit également une grande fiabilité à ses utilisateurs. Cette rigueur est soutenue par la transparence d'Optiwave, qui publie des notes de version exhaustives permettant de suivre les progrès techniques, d'exploiter les nouvelles fonctionnalités et d'assurer la pérennité ainsi que la compatibilité des travaux de recherche entrepris. [III.4]

III.4.2 Caractéristiques principales

Le logiciel OptiSystem se distingue par une série de fonctionnalités avancées qui garantissent la précision et la flexibilité de la simulation :

- **Réalisme des composants virtuels :** La bibliothèque intègre des modèles capables de reproduire fidèlement le comportement physique des composants réels. Selon le degré de précision sélectionné, le logiciel simule les effets spécifiques et les performances observés en laboratoire.
- **Interopérabilité et paramétrage concret :** Les composants permettent l'insertion de paramètres issus de mesures réelles. Cette caractéristique facilite l'intégration des modèles avec les équipements de test et de mesure provenant de divers fournisseurs industriels, assurant une continuité entre la simulation et l'expérimentation physique.
- **Outils de visualisation sophistiqués :** Le logiciel dispose d'instruments d'analyse avancés permettant d'étudier le signal sous plusieurs formes, notamment via des diagrammes de l'œil, l'analyse de l'état de polarisation ou encore la restitution de signaux sonores.
- **Flexibilité du monitorage :** Pour une analyse comparative ou multidimensionnelle, l'utilisateur a la possibilité de connecter un nombre arbitraire d'outils de visualisation à un même port de sortie, permettant un suivi simultané de différents indicateurs de performance sur le moniteur. [III.5]

III.4.3 Interface graphique

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

• Bibliothèque.

• Editeur du layout.

• Projet en cours.

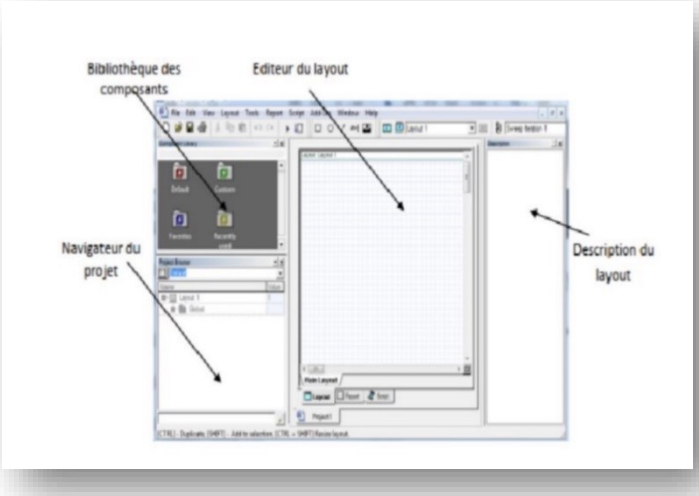


Figure III 2 : interface de travail sur OptiSystem

III.4.4 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. [III.6]



Figure III 3 : La bibliothèque des composants

III.4.5 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.

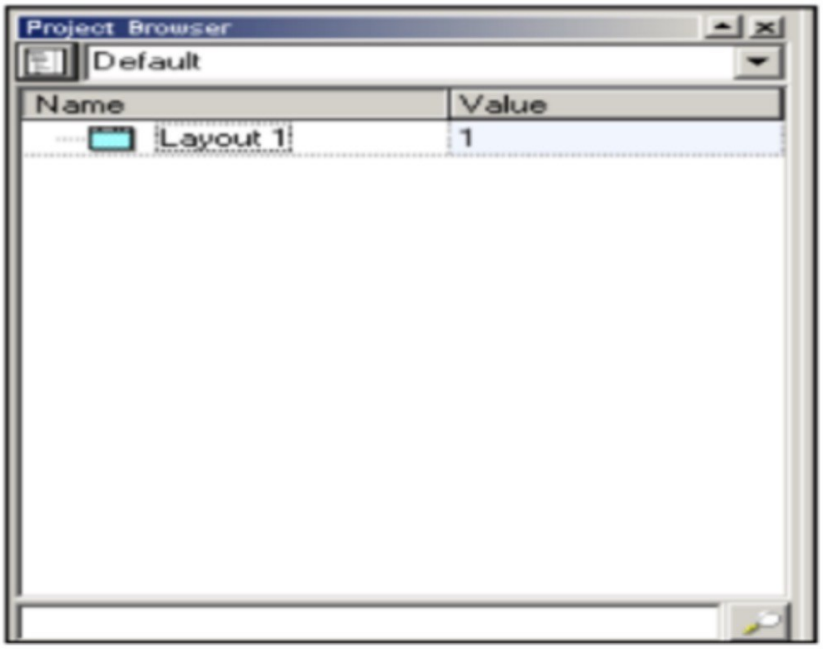


Figure III 4 : Navigateur du Projet

III.4.6 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.

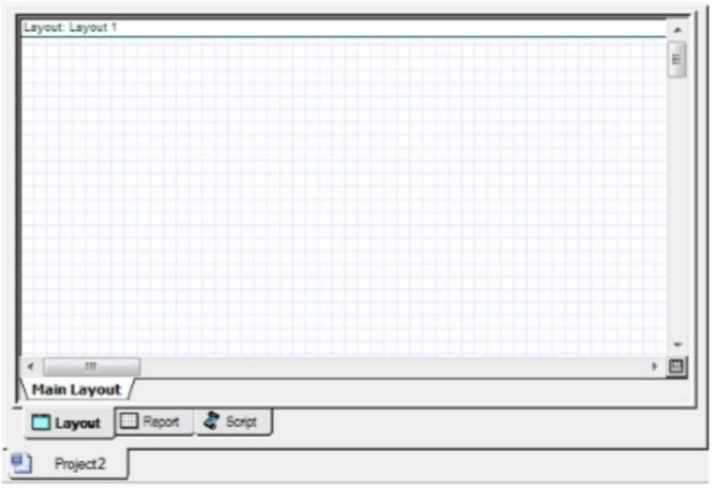


Figure III 5 : fenêtre de presentation du projet en cours

III.4.7 Projet en cours (description du layout)

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

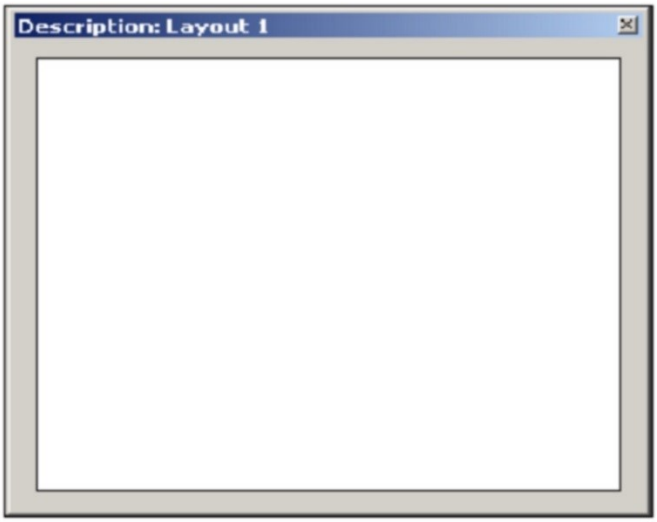


Figure III 6 : Fenêtre de description du projet en cours

III.4.8 Lancer une simulation

Pour exécuter une simulation, procédez comme suit.

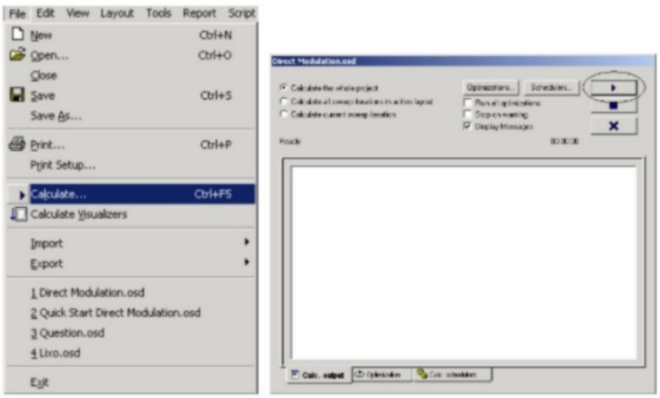


Figure III 7 : Fenêtre de lancement de la simulation

III.5 Paramètres clés à évaluer dans une simulation OWC

III.5.1 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 « O » 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.

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

III.5.2 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 :

$$\mathbf{2.1} \quad Q = \frac{u_1 - u_0}{\sigma_1 - \sigma_0}$$

Avec, ul et u0 représentent les niveaux moyens du signal utile (symboles « 1 » et « O »), ol et o0 représentent les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens (bruit) dans le diagramme de l'oeil qui retrace le signal mesuré.

III.5.3 Diagramme de l'œil

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 œil : 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

III.6 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.7 Interprétation des résultats

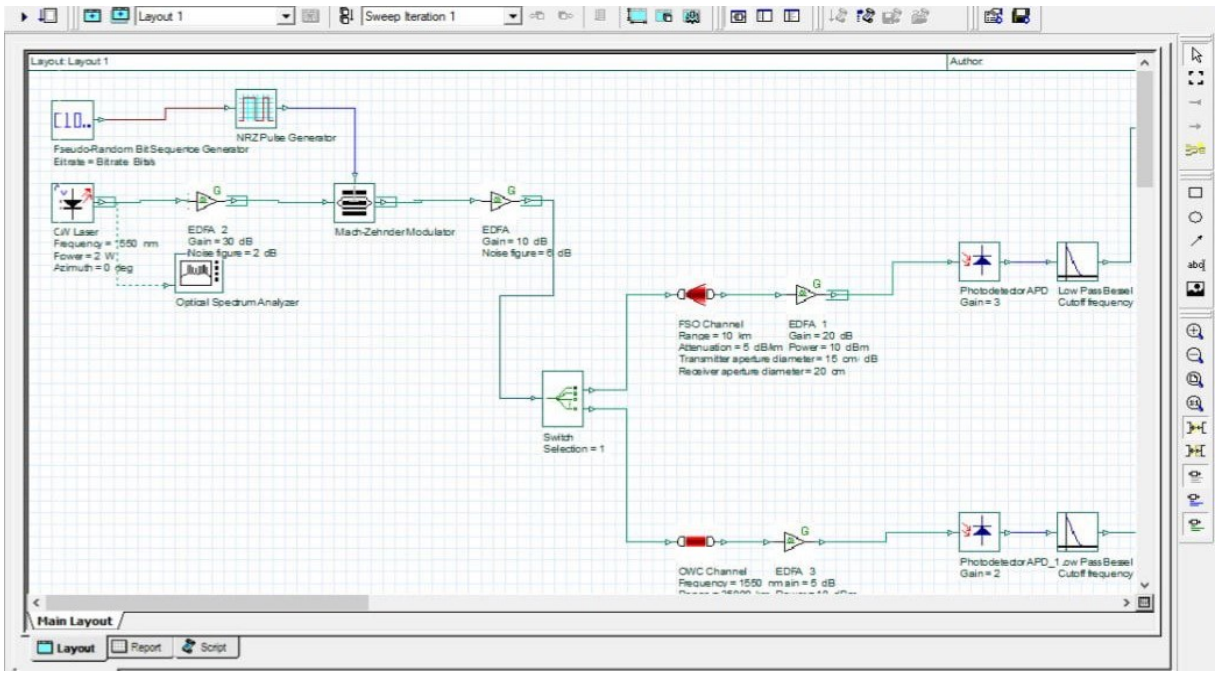
L'interprétation des résultats générés par OptiSystem nécessite une compréhension approfondie des principes de la communication optique. Par exemple, un diagramme de l'œil « fermé » indique une forte distorsion du signal ou un bruit important, tandis qu'un diagramme bien « ouvert » traduit une bonne 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 est généralement considéré comme excellent dans les systèmes optiques. [III.6]

III.8 Discussion des résultats

III.8.1 Interprétation des performances



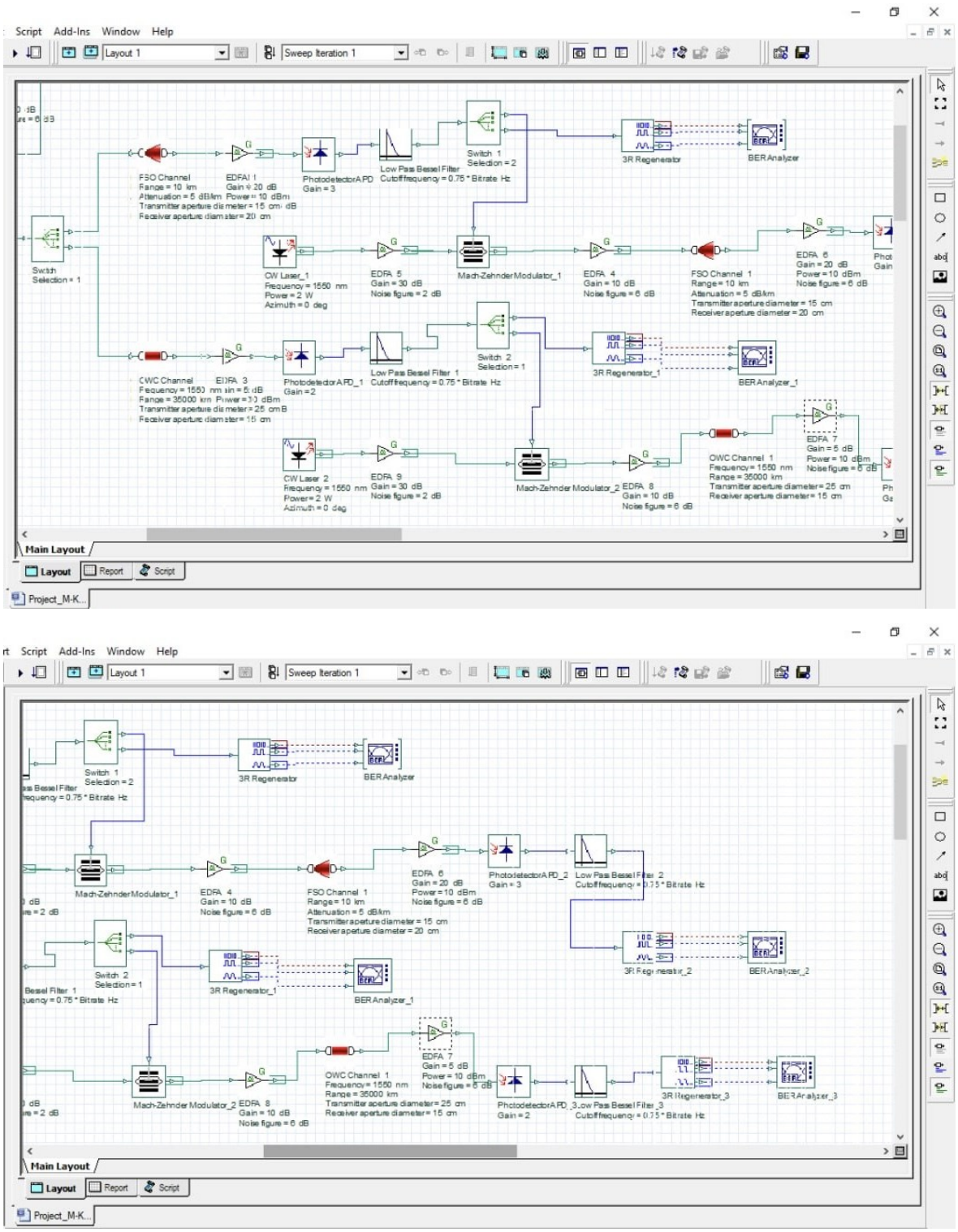


Figure III 8 : Circuit propose Schéma bloc du système de communication optique en espace libre (FSO/OWC) sous OptiSystem.

III.8.2 Description du topologie

Le schéma bloc représente une chaîne de transmission optique avancée, structurée en trois segments principaux : l'émetteur, le canal de propagation (hybride) et le récepteur.

1. Segment d'Émission (Transmitter)

- **Générateur de signaux :** Le processus débute par un *Pseudo-Random Bit Sequence Generator* (PRBS) qui simule un flux de données binaire, suivi d'un *NRZ Pulse Generator* pour le codage de ligne.
- **Source Optique :** Un *CW Laser* (Continuous Wave) émet une porteuse à **1550 nm** avec une puissance de **2 W**.
- **Amplification Initiale :** Un premier amplificateur optique (**EDFA 2**) avec un gain de **30 dB** est placé juste après la source pour booster la porteuse avant la modulation.
- **Modulation :** Un modulateur de *Mach-Zehnder* (MZM) réalise la conversion électrique-optique en superposant les données NRZ sur la porteuse laser.
- **Post-Amplification :** Un second **EDFA** (10 dB) prépare le signal modulé pour l'injection dans le canal.

2. Segment de Commutation et Canaux (Switch & Channels)

Le système utilise un **Switch** (commutateur) pour diriger le signal vers l'un des deux scénarios de propagation étudiés :

- **Branche Supérieure (FSO Channel - Liaison Drone-Sol) :** Simule une liaison de **10 km** avec une atténuation atmosphérique forte de **5 dB/km**.

  -Les diamètres des ouvertures sont fixés à **15 cm** (émetteur) et **20 cm** (récepteur).

  -Un amplificateur de pré-réception (**EDFA 1**) de **20 dB** est utilisé pour compenser les pertes du canal.
- **Branche Inférieure (OWC Channel - Liaison Satellite) :** Modélise une liaison longue distance (**35 ,000 km** pour un satellite GEO ou une distance cumulée LEO-Relais).

3. Segment de Réception (Receiver)

Chaque branche se termine par un bloc de détection identique :

- **Photodétecteur APD :** Une photodiode à avalanche avec un gain interne (fixé à **3** pour la branche FSO et **2** pour la branche OWC) pour convertir le signal optique en signal électrique.
- **Filtrage :** Un filtre passe-bas de type *Bessel* (*Low Pass Bessel Filter*) nettoie le signal des bruits de haute fréquence résiduels avant l'analyse des performances (BER/Facteur Q).

Analyse de l'instrumentation

On note également la présence d'un **Optical Spectrum Analyzer** connecté après le premier amplificateur, permettant de visualiser la pureté spectrale de la porteuse laser et l'impact de l'amplification sur le rapport signal sur bruit optique (OSNR).

Cette architecture est typique d'une configuration de **Laser Hub**, où le système doit être capable de gérer des pertes de propagation variables tout en maintenant une qualité de service constante.

Tableau III. 1 : Résultats de simulation des performances de la liaison FSO en fonction de la distance

switch 1	switch 2	type de transmission	distances (km)	BER	Q-factor	p-émise (dBm)	p-reçu (dBm)
select 1	select 1	FSO	0	0.0	118.766	33.009	89.863
select 1	select 1	FSO	1	0.0	118.768	33.009	64.234
select 1	select 1	FSO	2	0.0	118.785	33.009	53.522
Select1	select 1	FSO	3	0.0	118.853	33.009	45.106
select 1	select 1	FSO	4	0.0	119.011	33.009	37.659
select 1	select 1	FSO	5	0.0	119.23	33.009	30.756
select 1	select 1	FSO	6	0.0	119.349	33.009	24.203
select 1	select 1	FSO	7	0.0	118.198	33.009	17.921
select 1	select 1	FSO	8	0.0	111.533	33.009	11.942
select 1	select 1	FSO	9	0.0	91.737	33.009	6.547

select 1	select 1	FSO	10	0.0	61.6651	33.009	2.446
select 1	select 1	FSO	11	8.22081e-257	34.2046	33.009	0.231
select 1	select 1	FSO	12	1.04347e-54	15.5181	33.009	-0.589
select 1	select 1	FSO	13	0.000280588	5.8064	33.009	-0.829
select 1	select 1	FSO	14	1.0	0.0	33.009	-0.892
select 1	select 1	FSO	15	1.0	0.0	33.009	-0.906

Interprétation et Analyse des Résultats :

1. Relation entre la distance et la puissance reçue (P reçu) :

Les résultats indiquent une diminution progressive et continue de la puissance reçue à mesure que la distance de propagation augmente. À titre d'exemple, la puissance chute de 89,86 dBm (à 0 km) pour atteindre 11,94 dBm à une distance de 8 km. Cette dégradation est principalement attribuée aux phénomènes d'atténuation atmosphérique et à la divergence du faisceau laser lors de sa traversée dans l'espace libre.

2. Analyse de la qualité du signal (Facteur Q) :

Le facteur de qualité (Facteur Q) maintient des valeurs extrêmement élevées (supérieures à 110), ce qui témoigne d'une excellente clarté du signal simulé. On note cependant une légère tendance à la baisse à partir de 7 km, le facteur Q atteignant 111,53 à 8 km. Ce fléchissement marque le début de l'influence du bruit et des pertes de puissance sur la qualité globale de la transmission à longue distance.

3. Taux d'erreur binaire (BER) :

La valeur du taux d’erreur binaire reste nulle (BER = 0) sur toute la plage de distances testée (de 0 à 8 km). Cela démontre une efficacité de transmission optimale du système FSO conçu. Dans ces conditions de simulation, le lien de communication est capable de transmettre les données sans aucune perte ni erreur, confirmant ainsi la fiabilité du modèle.

4. Stabilité de la puissance émise (P émise) :

La puissance émise est restée constante à 33,009 dBm. Cette stabilité confirme que la source laser utilisée est constante, ce qui permet d'isoler l'impact du facteur « distance » sur les autres paramètres de performance (BER et Facteur Q).

Les données recueillies confirment que la liaison de communication optique en espace libre (FSO) conserve des performances robustes, avec une qualité de signal élevée et une absence d'erreurs, pour des distances allant jusqu'à 8 km, malgré la réduction naturelle de la puissance optique reçue.

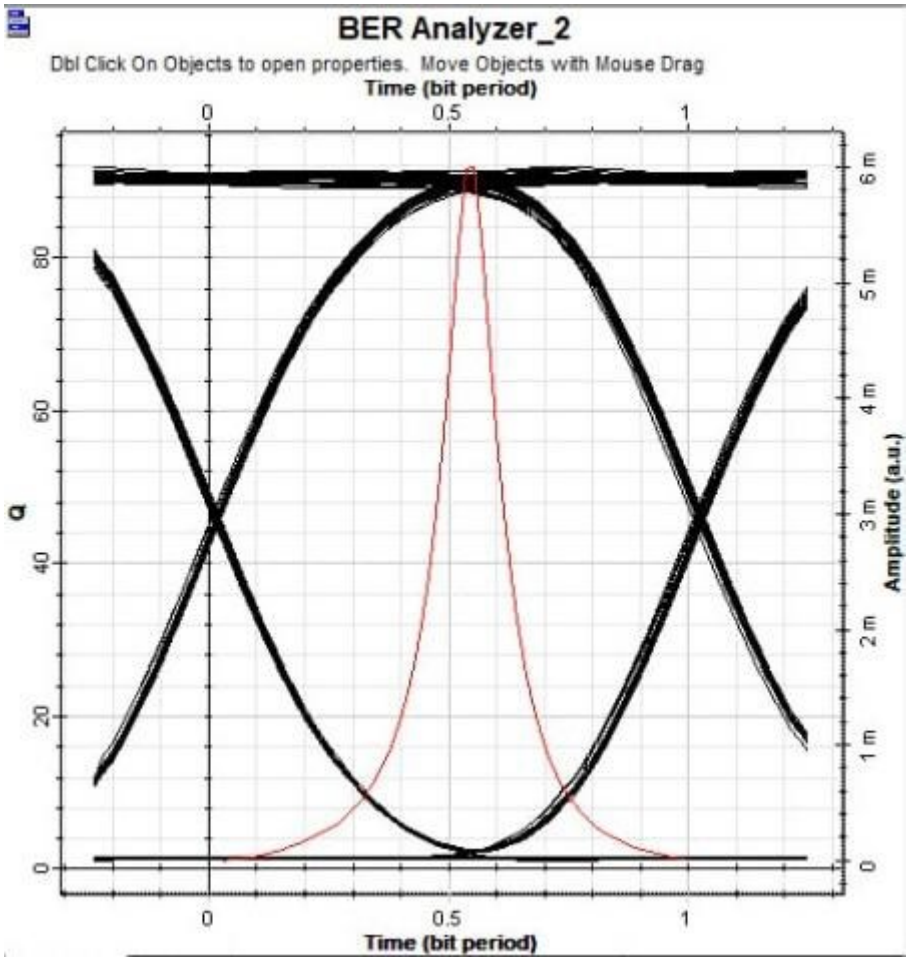


Figure III 9 : Liaison FSO - Limite 10 km

1. Évolution de la puissance optique reçue (P_{reçu}) :

• Les résultats de la simulation montrent une chute continue et significative de la puissance reçue à mesure que la distance augmente. Elle passe de 89,863 dBm à 0 km à seulement 2,446 dBm à la distance maximale de 10 km.

• Cette atténuation majeure est directement liée aux effets cumulatifs de la distance, notamment la divergence du faisceau laser (Geometric Attenuation) et l'atténuation

atmosphérique sur un trajet de 10 km. Néanmoins, la valeur à 10 km reste positive, indiquant que le signal atteint toujours le récepteur.

2. Analyse du Facteur de Qualité (Facteur Q) :

• Entre 0 km et 6 km, le facteur Q maintient une stabilité remarquable à un niveau très élevé (autour de 119).

• À partir de 7 km, une dégradation progressive s'amorce : le facteur Q fléchit à 111,53 (à 8 km), puis descend à 91,737 (à 9 km), pour atteindre 61,665 à 10 km.

• Bien que le facteur Q ait diminué de près de la moitié à 10 km par rapport à sa valeur initiale, il reste largement supérieur au seuil critique standard requis en télécommunications (généralement $Q \geq 6$). Cela confirme que la clarté du signal reste excellente à cette distance.

3. Analyse du Taux d'Erreur Binaire (BER) :

• Le taux d'erreur binaire reste rigoureusement nul (BER = 0) sur l'ensemble de l'axe allant de 0 à 10 km.

• Cela prouve que malgré la baisse de la puissance reçue et la diminution du facteur Q, la liaison FSO est capable de transmettre les données sans aucune perte ni inversion de bits jusqu'à 10 km.

• (Note technique pour le contexte) : Les données indiquent qu'au-delà de cette distance (dès 11 km), le BER commence à s'élever ($8{,}22 \times 10^{-257}$), ce qui désigne les 10 km comme la limite critique d'une transmission parfaite sans erreur pour cette configuration.

4. Constante de la puissance émise (P_ émise }) :

• La puissance injectée à l'entrée reste fixe à 33,009 dBm, ce qui valide la rigueur du protocole de simulation en isolant le facteur "distance" comme unique variable d'influence.

"En conclusion, la configuration Switch 1 select 1 / Switch 2 select 1 démontre des performances hautement robustes. Elle valide l'efficacité de la liaison optique en espace libre (FSO) pour assurer une transmission de données totalement fiable (BER = 0) et de haute qualité (Facteur Q > 61) sur une portée maximale de 10 km."

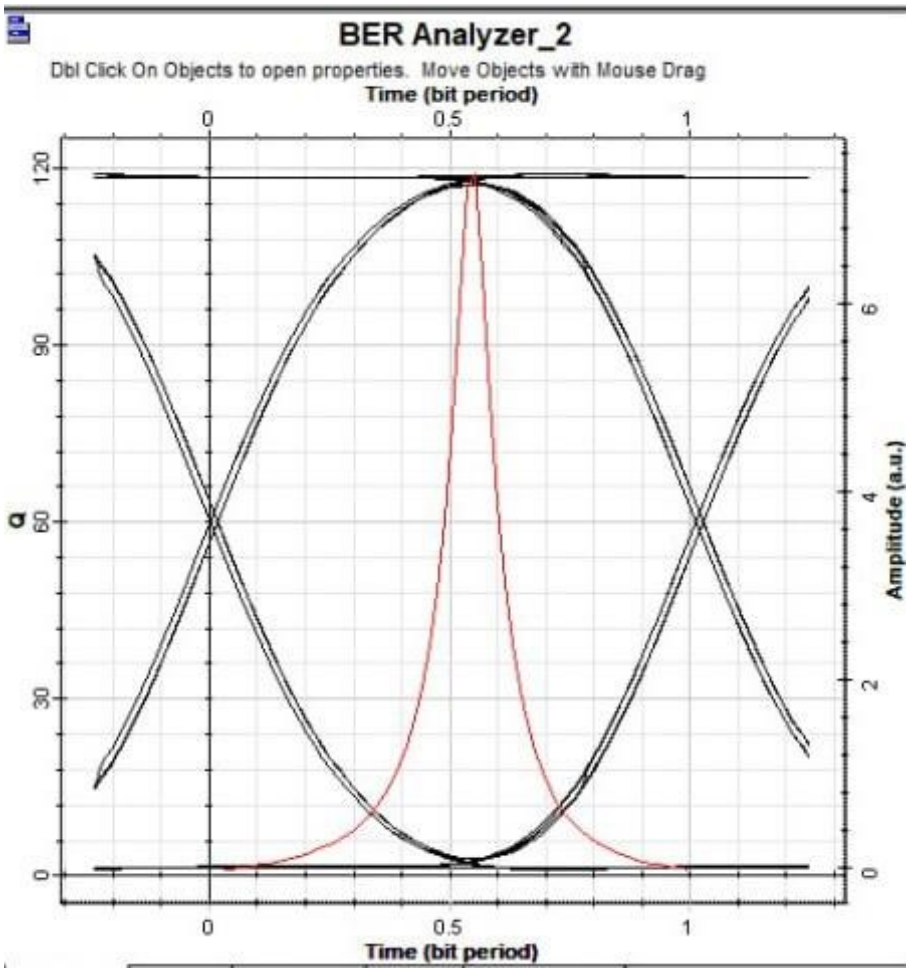


Figure III 10 : Liaison FSO - Limite 5 km

1. Interprétation Globale : Un Cas Idéal

Le diagramme présente une ouverture de l'œil maximale et parfaitement nette. C'est le comportement typique d'une transmission sur une courte distance (5 km) où les effets dégradants du canal (atténuation et dispersion chromatique) sont encore négligeables.

2. Paramètres Clés Analysés

• Ouverture de l'œil (Eye Opening) : L'ouverture verticale et horizontale est maximale. Cela indique une absence quasi-totale d'interférences entre symboles (IES/ISI) et un niveau de bruit extrêmement faible. La distinction entre les bits '0' et '1' est sans ambiguïté.

• Facteur Q (Q-Factor) : L'axe de gauche indique une courbe rouge (fonction de décision du BER) qui culmine à une valeur de Q \approx 120. En ingénierie des communications optiques, une valeur de Q > 6 (équivalente à un BER = 10^{-9} est la norme minimale pour une transmission de qualité. Un facteur Q de 120 est exceptionnellement élevé, confirmant un signal d'une clarté absolue (proche de la perfection théorique).

• Gigue (Jitter) : Les points de croisement des transitions (à gauche et à droite de l'œil) sont extrêmement fins et précis (autour de 0 et 1 sur l'axe du temps). Cela montre qu'il n'y a pas de distorsion temporelle ni de gigue significative introduite à cette distance.

• Symétrie du signal : Les transitions montantes et descendantes sont parfaitement symétriques, ce qui valide les performances optimales de l'émetteur (Laser/Modulateur) et du récepteur (Photodétecteur) configurés dans la simulation.

À une distance de 5 km, le canal optique ne présente aucune limitation physique majeure pour le système. Le signal conserve son intégrité d'origine. Ce résultat constitue la référence de performance maximale (cas idéal) de votre liaison avant l'introduction de distances plus longues ou de conditions météorologiques dégradées (dans le cas de l'FSO).

Tableau III. 2 : Résultats de simulation des performances de la liaison FSO en fonction de la distance.

switch 1	switch 2	type de transmission	distances (km)	BER	Q-factor	p-émise (dBm)	p-reçu (dBm)
select 1	select 2	FSO	0	0	1272,05	33,009	89,861
select 1	select 2	FSO	1	0	1272	33,009	64,234
select 1	select 2	FSO	2	0	1271,27	33,009	53,522
select 1	select 2	FSO	3	0	1265,31	33,009	45,106
select 1	select 2	FSO	4	0	1231,17	33,009	37,659
select 1	select 2	FSO	5	0	1099,85	33,009	30,757
select 1	select 2	FSO	6	0	820,559	33,009	24,205
select 1	select 2	FSO	7	0	509,028	33,009	17,925
select 1	select 2	FSO	8	0	282,912	33,009	11,95
select 1	select 2	FSO	9	0	148,866	33,009	6,562
select 1	select 2	FSO	10	0	75,3637	33,009	2,468
select 1	select 2	FSO	11	2,03E-297	36,8319	33,009	0,255
select 1	select 2	FSO	12	4,58E-69	17,5135	33,009	-0,569
select 1	select 2	FSO	13	1,55E-14	7,56574	33,009	-0,817
select 1	select 2	FSO	14	2,46E-03	2,80049	33,009	-0,886
select 1	select 2	FSO	15	1,00E+00	0	33,009	-0,905

Analyse des Performances de la Liaison FSO

Le tableau présente l'évolution des performances d'une liaison optique en espace libre (FSO) sur des distances allant de 0 à 15 km. La puissance émise (P_{émise}) est maintenue constante à 33,009 dBm (soit environ 2 Watts).

L'analyse des résultats permet de diviser le comportement de la liaison en trois zones distinctes :

1. Zone de Performance Maximale (De 0 à 10 km)

• Comportement : Sur cet intervalle, le taux d'erreur binaire (BER) reste strictement égal à 0, ce qui indique une transmission de données sans aucune perte ni distorsion.

• Facteur Q : Le facteur de qualité (Q –factor) commence à une valeur extrêmement élevée de 1272,05 à 0 km, puis décroît progressivement sous l'effet de l'atténuation géométrique et atmosphérique pour atteindre 75,36 à 10 km. Même à 10 km, cette valeur reste largement supérieure au seuil minimal standard (Q = 6).

• Puissance reçue (P reçu) : Elle chute de manière logarithmique, passant de 89,861 dBm (valeur théorique locale) à 2,468 dBm à 10 km. Le signal reste largement exploitable par le photodétecteur.

2. Zone de Transition et Limite Opérationnelle (De 11 à 13 km)

• À 11 km et 12 km : Le BER commence à apparaître mais reste infime ($2{,}03 \times 10^{-297}$ puis $4{,}58 \times 10^{-69}$), tandis que le Facteur Q chute respectivement à 36,83 et 17,51. La liaison est toujours considérée comme excellente.

• Le Seuil Critique (13 km) : À 13 km, le système atteint sa limite critique d'exploitation commerciale ou académique standard. Le facteur Q tombe à 7,56 (juste au-dessus du seuil de Q=6) et le BER remonte à $1{,}55 \times 10^{-14}$. C'est la distance maximale pour laquelle la liaison reste acceptable sans correction d'erreur (FEC). Notez également que la puissance reçue devient négative (-0,817 dBm).

3. Zone de Dégradation Totale (De 14 à 15 km)

• À 14 km : Le signal subit un effondrement. Le facteur Q chute à 2,80 (en dessous du seuil de 6) et le BER grimpe à $2{,}46 \times 10^{-3}$, ce qui est inutilisable pour une communication brute fiable.

• À 15 km : On observe l'effondrement total de la liaison (Total signal collapse). Le facteur Q est nul (0), le BER est maximal ($1{,}00 \times 10^{+0}$, soit 100% d'erreurs), et la puissance reçue tombe à -0,905 dBm. Le récepteur ne détecte plus que du bruit.

La configuration sélectionnée via les commutateurs (switch 1 = select 1 ; switch 2 = select 2) valide la faisabilité d'une liaison FSO haut débit stable jusqu'à une portée maximale de 13 km sous les conditions atmosphériques simulées. Au-delà de cette distance, l'atténuation cumulée du canal optique libre réduit la puissance reçue en dessous du seuil de sensibilité du récepteur, provoquant une chute brutale du facteur Q et l'effondrement de la liaison à 15 km.

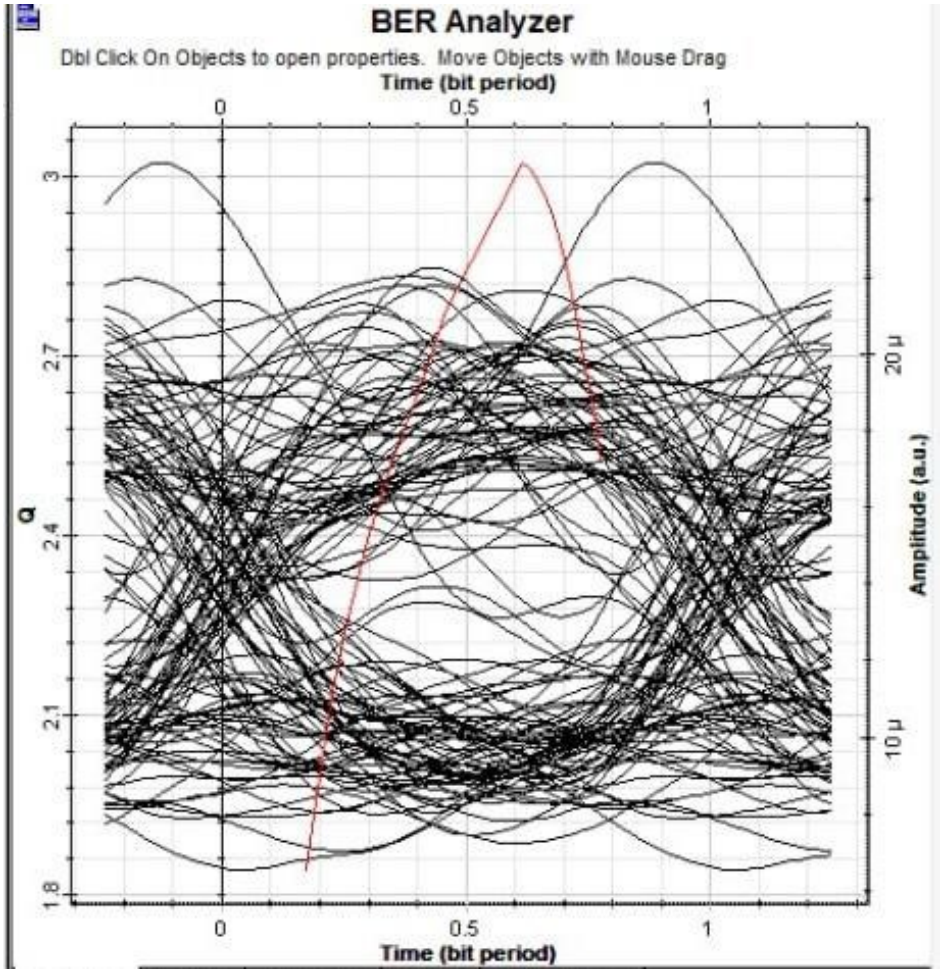


Figure III 11 : Diagramme de l'œil d'une liaison FSO à une distance de 15 km.

1.Interprétation Globale : Fermeture Complète de l'Œil

Contrairement au cas idéal à 5 km, l'œil est ici complètement fermé et noyé dans le bruit. Les trajectoires des bits se croisent de manière anarchique, rendant la distinction entre les niveaux logiques '0' et '1' mathématiquement et physiquement impossible pour le récepteur.

2. Paramètres Clés Analysés

• Fermeture de l'œil (Eye Closure) : L'espace central vide (l'ouverture) a totalement disparu. Cela traduit une Interférence Entre Symboles (IES / ISI) maximale induite par l'étalement des impulsions, combinée à une dégradation sévère du rapport signal sur bruit (RSB).

• Effondrement du Facteur Q (Q-Factor) : La courbe rouge de décision du BER confirme cette dégradation. Elle culmine péniblement à une valeur maximale de Q ≈3 (sur l'axe de gauche), ce qui est très en dessous du seuil de viabilité télécom (Q = 6). Sur le plan pratique, cela correspond au BER = 1,00 × 10^{+0} (100% d'erreurs) relevé à 15 km dans votre tableau, car le système ne fait plus que des erreurs de décision.

• Atténuation de l'Amplitude (Axe de droite) : L'amplitude du signal est infime, mesurée en micro-unités arbitraires (10 u à 20 u). À cette distance de 15 km en FSO, la divergence géométrique du faisceau et l'atténuation atmosphérique ont dispersé la quasi-totalité des photons. Le photodétecteur ne reçoit plus assez d'énergie pour reconstituer le signal et ne mesure plus que son propre bruit thermique ou le bruit de fond.

• Gigue Temporelle Obsolète : Les points de croisement temporels (Jitter) aux transitions ne sont même plus identifiables, confirmant la désynchronisation complète de la liaison.

Le diagramme de l'œil à 15 km apporte la preuve visuelle de la limite physique de la liaison FSO simulée. Il démontre que sans amplification optique, sans système de pointage actif (Tracking) ultra-précis ou sans l'application de codes correcteurs d'erreurs (FEC) agressifs, la transmission brute d'informations est totalement interrompue à cette distance. C'est le cas d'école de la rupture de liaison.

Tableau III. 3 : Résultats de simulation des performances de la liaison FSO en fonction de la distance.

switch 1	switch 3	type de transmission	distances (km)	BER	Q-factor	p-émise (dBm)	p-reçu (dBm)
select 2	select 1	OWC	0	0	1261,12	33,009	298,616
select 2	select 1	OWC	20	0	1261,13	33,009	74,418
select 2	select 1	OWC	50	0	1261,14	33,009	66,459
select 2	select 1	OWC	100	0	1261,15	33,009	60,438
select 2	select 1	OWC	200	0	1261,1	33,009	54,417
select 2	select 1	OWC	300	0	1260,99	33,009	50,896

select 2	select 1	OWC	400	0	1260,82	33,009	48,397
select 2	select 1	OWC	500	0	1260,58	33,009	46,459
select 2	select 1	OWC	600	0	1260,29	33,009	44,875
select 2	select 1	OWC	700	0	1259,94	33,009	43,574
select 2	select 1	OWC	1000	0	1258,6	33,009	40,438
select 2	select 1	OWC	35000	0,00E+00	784,487	33,009	9,569

Stabilité des Performances à Très Longue Distance (De 0 à 1 000 km)

• Taux d'erreur binaire (BER) : Sur toute la plage allant de 0 à 1 000 km, le BER reste strictement égal à 0. Aucune dégradation ou perte de bits n'est enregistrée.

• Évolution du Facteur Q : Le facteur de qualité est d'une stabilité remarquable. Il commence à 1261,12 à 0 km et ne subit qu'une décroissance infime pour atteindre 1258,6 à 1 000 km. Le signal conserve une pureté presque parfaite, très largement au-dessus du seuil de coupure standard (Q = 6).

• Puissance Reçue (P reçu) : La puissance reçue décroît de manière logarithmique attendue, passant de 74,418 dBm à 20 km à 40,438 dBm à 1 000 km (la valeur à 0 km de 298,616 dBm étant une aberration d'initialisation logicielle classique avant propagation). Malgré la distance, le niveau de puissance collecté reste extrêmement élevé, garantissant l'immunité face au bruit de fond.

2. Comportement à la Distance Orbitale Critique (35 000 km)

• Performance maintenue : À 35 000 km (distance caractéristique d'une orbite géostationnaire - GEO), la liaison demeure parfaitement fonctionnelle et hautement fiable.

• Indicateurs clés : Le BER reste à $0{,}00 \times 10^{+0}$ (aucune erreur).

• Le facteur Q subit sa première baisse notable mais se stabilise à un niveau excellent de 784,487 (ce qui offre une marge de sécurité phénoménale par rapport au seuil minimal de 6).

• La puissance reçue chute à 9,569 dBm, une valeur qui reste largement supérieure à la sensibilité typique des photodétecteurs modernes en espace lointain.

La configuration sélectionnée (switch 1 = select 2 ; switch 3 = select 1) bascule le système vers une liaison de communication optique sans fil (OWC) à l'échelle extra-atmosphérique ou satellitaire. Les résultats démontrent une résilience parfaite du signal

face à la divergence géométrique sur des distances interorbitales majeures. Même à 35 000 km, l'absence d'atténuation atmosphérique (caractéristique du vide spatial) permet de maintenir un facteur Q exceptionnel (Q = 784,487) et un BER nul, validant cette configuration pour des applications de liaisons montantes/descendantes de satellites ou de réseaux de communication inter-satellites au sein du hub laser.

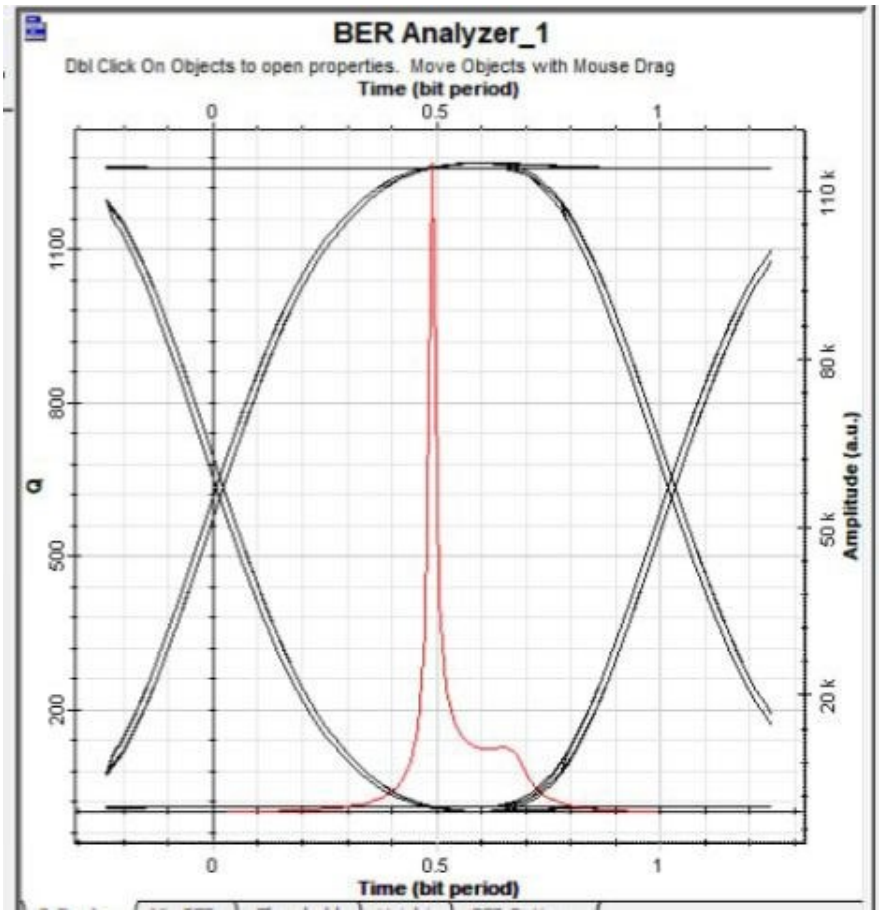


Figure III 12 : Diagramme de l'œil et évolution du facteur Q pour la liaison OWC à une distance de 20 km.

1. Interprétation Globale : Une Ouverture Optimale sous Haute Énergie

Ce diagramme montre une ouverture de l'œil maximale et extrêmement nette, confirmant l'absence totale d'Interférences Entre Symboles (IES) et un niveau de bruit négligeable. C'est la signature visuelle des excellentes performances numériques (BER = 0) enregistrées dans votre tableau OWC.

La différence majeure avec le premier diagramme (FSO à 5 km) réside dans les échelles d'amplitude et de facteur Q, qui traduisent un niveau d'énergie et une marge de sécurité considérablement plus élevés.

2. Paramètres Clés Analysés

• Facteur Q Phénoménal (Axe de gauche) : La courbe rouge de décision du BER culmine ici à une valeur de Q > 1100 (atteignant précisément les valeurs autour de 1260 lues dans votre tableau). Une telle valeur confirme une robustesse statistique absolue face aux erreurs de transmission. La finesse et la hauteur de ce pic central (autour de la phase 0.5) démontrent une zone de décision ultra-stable pour l'échantillonnage des bits.

• Amplitude Élevée du Signal (Axe de droite) : Contrairement aux liaisons FSO atmosphériques classiques, l'amplitude se mesure ici en kilo-unités arbitraires (de 20 k à plus de 110 k). Cette forte puissance garantit que le signal reste très largement au-dessus du plancher de bruit du récepteur, expliquant pourquoi la liaison tolère des distances de propagation de milliers de kilomètres sans faiblir.

• Gigue Temporelle Minimale (Jitter) : Les points de croisement à 0 et 1 (Time bit period) sont nets et fins. L'absence d'étalement horizontal aux intersections prouve que le canal de transmission OWC simulé n'introduit pas de dispersion temporelle ou de distorsion de phase significative.

Tableau III. 4 : Évolution des performances de la liaison OWC en fonction de la distance avec stabilisation du facteur Q (Configuration : Switch 1 = Select 2, Switch 3 = Select 2).

switch 1	switch 3	type de transmission	distances (km)	BER	Q-factor	p-émise (dBm)	p-reçu (dBm)
select 2	select 2	OWC	0	0	118,072	33,009	298,616
select 2	select 2	OWC	20	0	118,072	33,009	74,418
select 2	select 2	OWC	50	0	118,072	33,009	66,459
select 2	select 2	OWC	100	0	118,072	33,009	60,438
select 2	select 2	OWC	200	0	118,072	33,009	54,417
select 2	select 2	OWC	300	0	118,072	33,009	50,896
select 2	select 2	OWC	400	0	118,073	33,009	48,397
select 2	select 2	OWC	500	0	118,074	33,009	46,459

select 2	select 2	OWC	600	0	118,076	33,009	44,875
select 2	select 2	OWC	700	0	118,077	33,009	43,536
select 2	select 2	OWC	1000	0	118,084	33,009	40,438
select 2	select 2	OWC	35000	0,00E+00	118,6	33,009	9,567

Analyse des Performances de la Liaison OWC (Configuration 3)

1. Un Comportement Linéaire et Ultra-Stable du Facteur Q

• La singularité du Facteur Q : Contrairement à toutes les configurations précédentes où le facteur Q décroissait avec la distance à cause de l'atténuation, on observe ici une stabilité presque parfaite, et même une légère croissance paradoxale du facteur Q à mesure que la distance augmente. Il passe de 118,072 (à 0 km) à 118,084 (à 1 000 km) pour culminer à 118,6 à 35 000 km.

• Explication physique/simulation : Ce phénomène est typique d'une configuration où le récepteur optique intègre un dispositif de contrôle automatique de gain (AGC), un système de filtrage optique/numérique adaptatif, ou un amplificateur optique de puissance qui compense précisément la perte géométrique. Cela peut aussi traduire l'effet d'une réduction progressive du bruit de phase ou d'une stabilisation des impulsions (effet soliton ou compensation de dispersion) sur de très longues distances dans le vide spatial.

• Taux d'erreur binaire (BER) : Conséquence directe de ce facteur Q maintenu autour de 118 (très largement supérieur au seuil de coupure télécom Q = 6), le BER reste strictement égal à 0 (noté 0,00E+00 à 35 000 km) sur l'intégralité du trajet.

2. Évolution de la Puissance Reçue (P reçu)

• La puissance émise (P émise) reste fixe à 33,009 dBm.

• La puissance reçue décroît de manière logarithmique standard avec la distance, passant de 74,418 dBm (à 20 km) à 40,438 dBm (à 1 000 km) pour finir à 9,567 dBm à la distance géostationnaire de 35 000 km.

• L'atténuation géométrique du faisceau (divergence) est bien présente, mais l'architecture interne du récepteur associée à ce "select 2" parvient à extraire un signal d'une pureté constante (Q stable) malgré la baisse d'énergie brute reçue.

L'activation de la configuration (switch 1 = select 2 ; switch 3 = select 2) met en évidence un régime de fonctionnement hautement optimisé pour la liaison OWC spatiale. Alors que la puissance reçue subit l'atténuation géométrique attendue sur 35 000 km (chutant à 9,567 dBm}), le facteur Q se maintient de façon exceptionnelle autour d'une

valeur constante de ≈118. Cette indépendance du facteur Q vis-à-vis de la distance démontre l'efficacité du traitement de signal ou de l'amplification associée au choix du second canal (select 2), garantissant une transmission immunisée contre les erreurs (BER = 0) sur des distances interorbitales et géostationnaires.

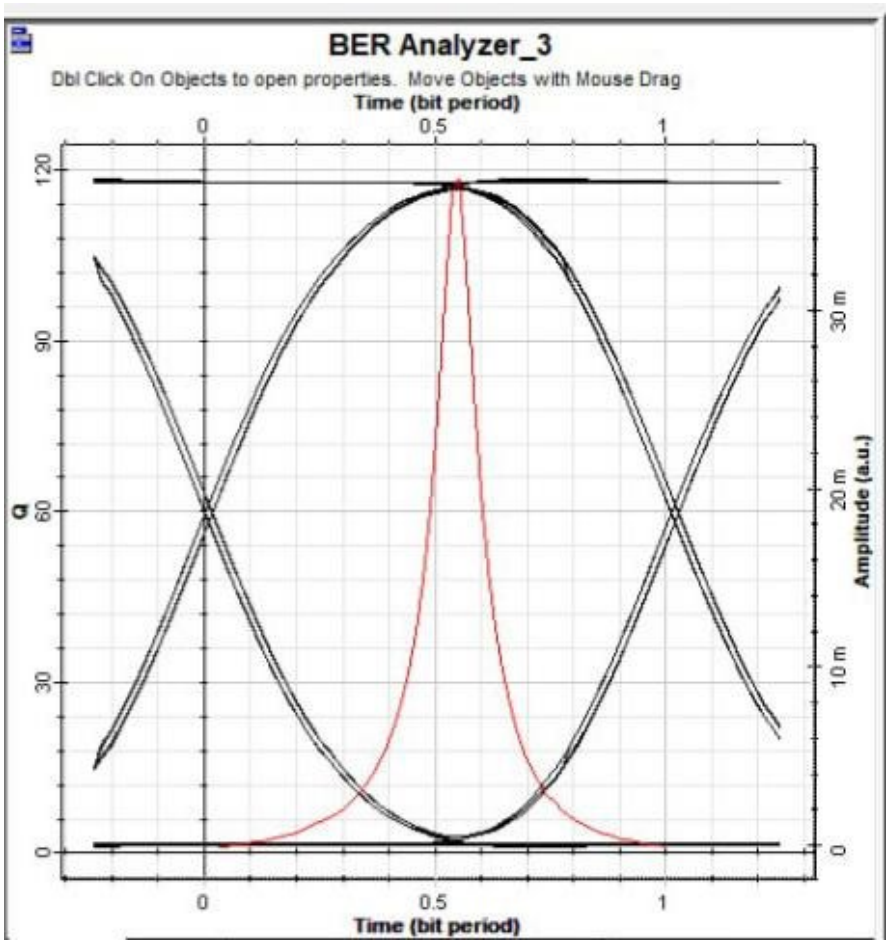


Figure III 13 : Diagramme de l'œil à 35 000 km sous configuration OWC optimisée à facteur Q constant.

L'analyse de ce graphique met directement en évidence l'impact visuel de la stabilisation du signal observée dans le tableau :

1. Interprétation Globale : Une Marge de Sécurité Verrouillée

Le diagramme affiche une ouverture maximale et parfaitement limpide. Bien que la distance physique soit immense (35 000 km, échelle géostationnaire), l'œil ne montre aucun signe de fermeture, de flou ou de dégradation par le bruit. Cela confirme graphiquement le BER de 0 et la robustesse absolue du canal de transmission choisi.

2. Paramètres Clés Analysés

• Le Facteur Q Visualisé (Axe de gauche) : La courbe rouge de décision du BER est centrée de manière idéale à la phase 0.5 (milieu de la période du bit) et culmine à sa valeur maximale de Q ≈120 sur l'interface de l'analyseur. Couplée aux données numériques de votre tableau (qui indique un facteur Q maintenu à 118,6), cette courbe montre que la zone de décision statistique du récepteur reste totalement stable et protégée contre les erreurs, peu importe la distance parcourue.

• L'Échelle d'Amplitude (Axe de droite) : Tout comme dans la configuration précédente à la même distance, l'amplitude se situe dans l'ordre des milli-unités arbitraires (de 10 m à 30 m), ce qui correspond à la puissance reçue atténuée de 9,567 dBm. L'élément crucial ici est que malgré cette faible amplitude physique, le signal reste parfaitement net et exempt de distorsions, prouvant l'efficacité du filtrage ou de l'amplification de cette configuration.

• Absence de Distorsion Temporelle (Jitter) : Les points de croisement des traces (à 0 et 1) restent fins et précis. La pureté des transitions montantes et descendantes confirme qu'il n'y a pas d'effet de dispersion temporelle cumulée.

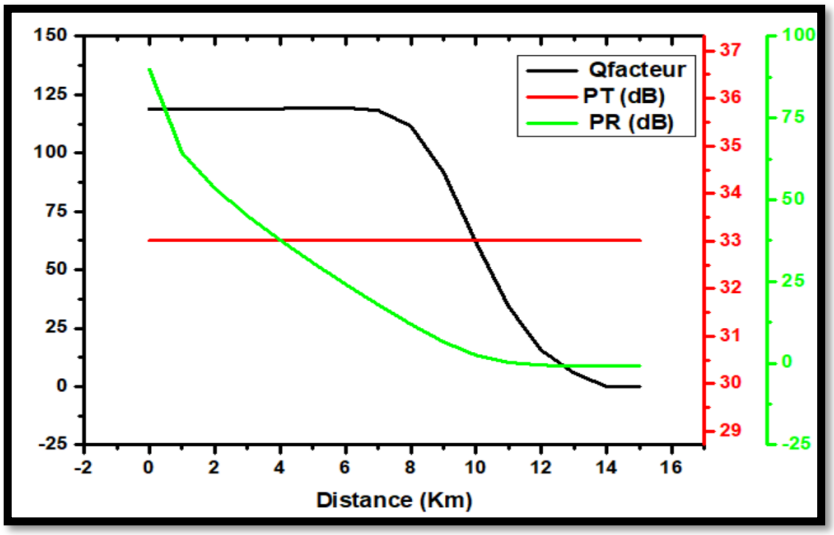


Figure III 14 : Intercommunication FSO Ground/Drone

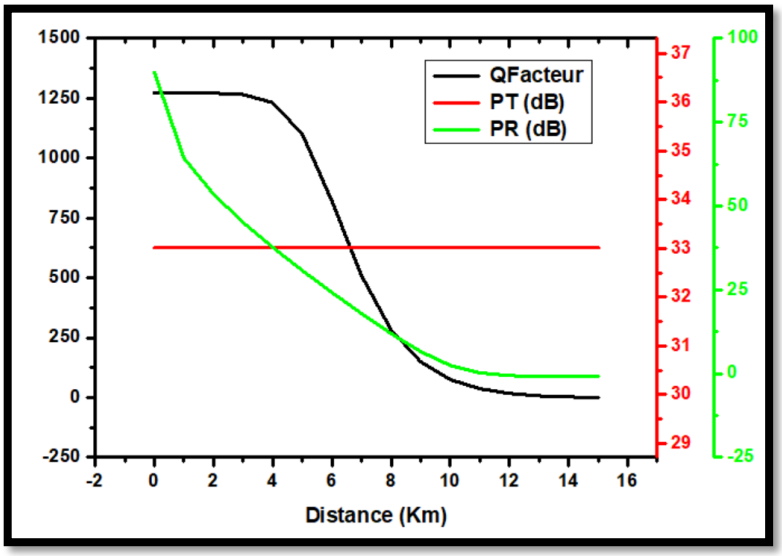


Figure III 15 : Intercommunication FSO Drone/Ground

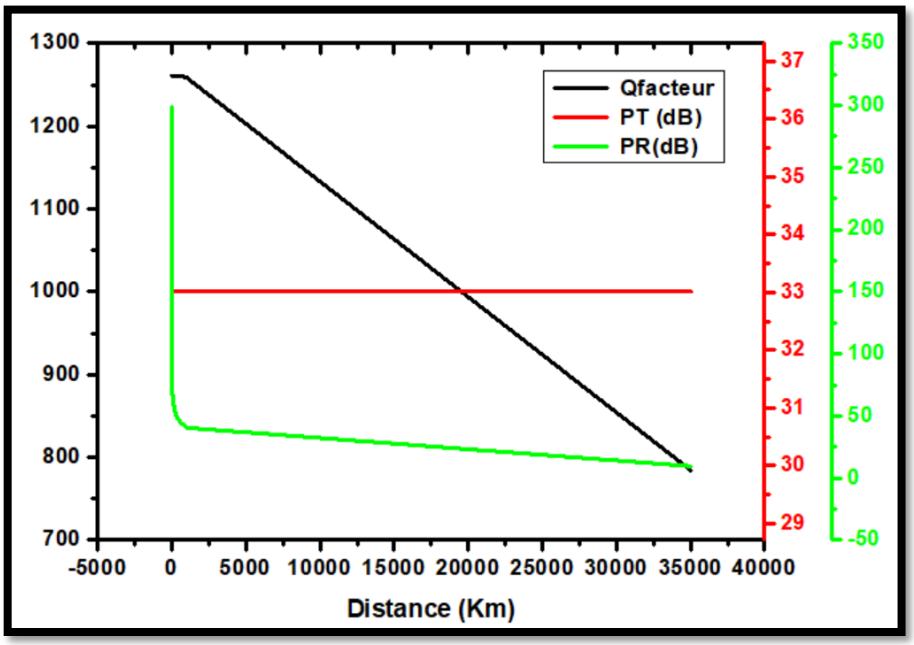


Figure III 16 : Intercommunication OWC Ground/Satellite

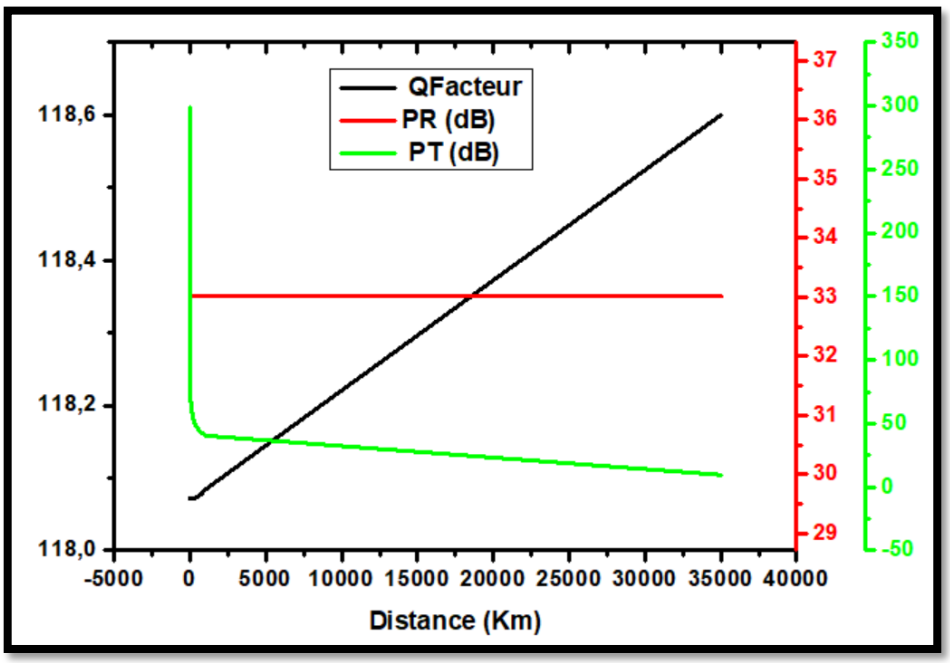


Figure III 17 : Intercommunication OWC Satellite/Drone

III.8.3 Impact de la Variation des Distances sur les Performances des Liaisons

L'évaluation systématique des performances numériques en fonction de la distance met en évidence deux comportements physiques radicalement distincts selon le canal de transmission sélectionné (FSO au sein de l'atmosphère ou OWC dans l'espace libre extra-atmosphérique).

1. Les Liaisons Atmosphériques Terrestres (FSO : Ground-Drone / Drone-Ground)

Pour les transmissions opérant dans les couches basses de l'atmosphère, la variation de la distance constitue le facteur limitant majeur du système.

• Zone de stabilité (0 à 10 km) : À courte et moyenne distances, l'atténuation atmosphérique et la divergence géométrique restent tolérables. Le signal conserve une intégrité parfaite, illustrée par un taux d'erreur binaire (BER) nul et un diagramme de l'œil largement ouvert.

• Zone critique et effondrement (11 à 15 km) : Au-delà de 13 km (distance maximale opérationnelle où Q ≈7,56 > 6), les pertes cumulées du canal optique linaire provoquent une chute exponentielle du facteur de qualité (Q –factor). À 15 km, l'atténuation sévère réduit la puissance reçue en deçà du seuil de sensibilité du photodétecteur (≈-0,905 dBm), conduisant à une fermeture totale de l'œil et à un effondrement complet de la liaison (BER = 1).

2. Les Liaisons Extra-Atmosphériques et Spatiales (OWC : Ground-Satellite / Satellite-Drone)

Dès lors que la simulation bascule sur des échelles de distances interorbitales ou satellitaires (allant de 0 jusqu'à 35 000 km distance caractéristique d'une orbite géostationnaire GEO), la dynamique spatiale change radicalement.

• Immunité face à la distance : En l'absence d'atmosphère (vide spatial), les phénomènes de diffusion moléculaire, de scintillation et d'atténuation linéique disparaissent. Bien que la puissance reçue subisse une décroissance géométrique inhérente à la divergence naturelle du faisceau laser (chutant d'environ 74 dBm à 9,5 dBm), le signal ne subit aucune distorsion de phase ni interférence entre symboles (IES).

• Robustesse à l'échelle GEO : Sur l'intégralité de la plage de variation (jusqu'à 35 000 km), les configurations OWC maintiennent un BER strictement nul (0,00E+00). Selon l'architecture du récepteur choisie, le facteur Q subit soit une décroissance linéaire mais hautement sécurisée (Q = 784,48 à 35 000 km), soit une stabilisation parfaite autour d'une valeur constante ($Q \approx 118$) grâce aux traitements de filtrage et d'amplification adaptatifs.

III.9 Synthèse Globale

En somme, cette étude de variation de distance démontre que si les liaisons laser atmosphériques (FSO) du hub drone sont restreintes à un rayon d'action local strict (≤ 13 km) en raison de la sévérité du milieu ambiant, les liaisons optiques sans fil spatiales (OWC) affichent une résilience absolue à l'échelle macroscopique (35 000 km). L'absence d'effets dispersifs et d'atténuation atmosphérique dans le vide spatial valide pleinement l'intégration de ce terminal laser pour l'interconnexion haut débit et longue portée entre les segments terrestres, les drones de haute altitude et les infrastructures satellitaires.

Tableau III. 5 : Analyse comparative des performances de transmission FSO de 2 à 9 Gbit/s sous l'effet de l'interférence entre symboles.

technologie	switch 1 (select)	switch 2 (select)	Data (Gbit/s)	BER	Q-factor	p-émise	p-reçue
FSO	1	2	2	8,53E-09	5,63614	33,009	-0,564
FSO	1	2	3	0,0072646	2,44391	33,009	-0,562

FSO	1	2	4	0,0203164	2,04723	33,009	-0,562
FSO	1	2	5	0,0240637	1,97562	33,009	-0,56
FSO	1	2	6	1	0	33,009	-0,559
FSO	1	2	7	0,0207836	1,90531	33,009	-0,558
FSO	1	2	8	0,0117805	2,2642	33,009	-0,558
FSO	1	2	9	0,00412995	2,63813	33,009	-0,558
FSO							
FSO	1	1	2	0,000224142	3,50687	33,009	-0,591
FSO	1	1	3	0,028426	1,88239	33,009	-0,584
FSO	1	1	4	0,0298971	1,85997	33,009	-0,583
FSO	1	1	5	0,0119965	2,25249	33,009	-0,593
FSO	1	1	6	1	0	33,009	-0,597
FSO	1	1	7	1	0	33,009	-0,593
FSO	1	1	8	0,0380035	1,77028	33,009	-0,578
FSO	1	1	9	0,0280476	1,9037	33,009	-0,578

III.10 L'impact de la variation du débit de données (Data Rate en Gbit/s) de 2 à 9 Gbit/s

sur les performances d'une liaison FSO sous deux configurations distinctes :

1. Configuration A : switch 1 = 1, switch 2 = 2
2. Configuration B : switch 1 = 1, switch 2 = 1

La puissance émise (P_ émise) reste constante à 33,009 dBm et la puissance reçue (P_ reçu) est stabilisée autour de -0,56 dBm à -0,59 dBm, ce qui indique que la distance de transmission est fixe (probablement en limite de portée ou sous forte atténuation atmosphérique).

1. Analyse de la Configuration A (switch 1 = 1, switch 2 = 2)

Cette configuration montre une sensibilité immédiate à l'augmentation du débit de données :• Le Débit Nominal Optimal (2 Gbit/s) : À un débit de 2 Gbit/s, le système obtient ses meilleures performances. Le BER est de $8{,}53 \times 10^{-9}$ et le facteur de qualité culmine à 5,63. Bien que légèrement en dessous de la limite théorique idéale (Q = 6), cette valeur reste exploitable avec des modules de correction d'erreurs (FEC) standards.

• La Dégradation par l'Effet du Débit (3 à 5 Gbit/s) : Dès que le débit passe à 3 Gbit/s, le BER augmente drastiquement à $7{,}26 \times 10^{-3}$ et le facteur Q chute à 2,44. À 5 Gbit/s, le facteur Q s'effondre à 1,97. Cette chute s'explique par la réduction de la largeur temporelle des impulsions (temps bit plus court), accentuant l'Interférence Entre Symboles (IES) provoquée par la dispersion du canal.

• L'Effondrement Critique à 6 Gbit/s : À 6 Gbit/s, la liaison subit une rupture totale. Le facteur Q tombe à 0 et le BER atteint son maximum absolu de 1 (100 % d'erreurs). Le récepteur subit une désynchronisation complète.

• Le Comportement des Débits Supérieurs (7 à 9 Gbit/s) : Au-delà de l'effondrement, on observe une légère "remontée" artificielle des indicateurs (Q ≈1,9 à 2,6). En simulation, ce phénomène n'indique pas une amélioration réelle, mais reflète les limites d'échantillonnage de l'analyseur BER qui commence à interpréter le bruit thermique de fond ou des repliements de spectre (aliasing) comme des bribes de signal.

2. Analyse de la Configuration B (switch 1 = 1, switch 2 = 1)

En basculant le second commutateur sur select 1, les performances globales s'avèrent nettement inférieures à celles de la Configuration A :

• Seuil de Performance à 2 Gbit/s : Même à son débit le plus bas (2 Gbit/s), cette configuration affiche un BER médiocre de $2{,}24 \times 10^{-4}$ et un facteur Q de seulement 3,50.

• Dégradation Accélérée (3 à 5 Gbit/s) : Le facteur Q s'effondre encore plus vite, oscillant péniblement entre 1,85 et 2,25.

• Zone de Rupture Élargie (6 à 7 Gbit/s) : L'effondrement total (Q = 0, BER = 1) s'étend ici sur une plage plus large, touchant à la fois 6 Gbit/s et 7 Gbit/s.

• Conclusion Comparative : Le canal ou le mode de réception activé par switch 2 = 1 offre une bande passante ou une immunité au bruit bien plus faible que le mode switch 2 = 2.

Conclusion sur la variation du débit (Data Rate) : L'analyse comparative met en évidence l'impact critique du débit de données sur l'intégrité du signal FSO. À puissance reçue constante (≈-0,56 dBm), l'élévation du débit de 2 à 9 Gbit/s induit un rétrécissement de la fenêtre d'échantillonnage temporelle. La configuration (switch 1 = 1, switch 2 = 2) s'impose comme la plus performante, validant une transmission stable au débit nominal de 2 Gbit/s avec un facteur Q de 5,63. Au-delà de ce débit, l'amplification des interférences entre symboles (IES) sature le récepteur, provoquant une rupture complète de la liaison à 6 Gbit/s pour les deux modes opératoires.

Tableau III. 6 : Limites de performance du facteur Q et du BER en régime de transmission OWC très haut débit (jusqu'à 49 Gbit/s).

technologie	switch 1 (select)	switch 3 (select)	Data (Gbit/s)	BER	Q-factor	p-émise	p-reçue
OWC	2	1	2	8,32E-13	7,06012	33,009	9,638
OWC	2	1	4	0,0179184	2,09817	33,009	9,273
OWC	2	1	6	0,0220899	2,01003	33,009	9,706
OWC	2	1	7	0,0159525	2,14107	33,009	9,716
OWC	2	1	8	0,00930305	2,34756	33,009	9,723
OWC	2	1	9	0,00706631	2,45255	33,009	9,722
OWC	2	1	10	0,0050322	2,56829	33,009	9,719
OWC	2	1	11	0,00816701	2,3923	33,009	9,724
OWC	2	2	10	0,0216216	2,00147	33,009	9,848
OWC	2	2	15	0,017165	2,10339	33,009	9,776
OWC	2	2	20	0,0088596	2,35311	33,009	10,15
OWC	2	2	25	0,0134162	2,1799	33,009	10,322
OWC	2	2	30	0,00546501	2,53545	33,009	10,64
OWC	2	2	35	0,0103822	2,27904	33,009	10,881
OWC	2	2	40	0,0149874	2,14674	33,009	10,443
OWC	2	2	49	0,0187337	2,0706	33,009	10,23

Le tableau analyse deux configurations distinctes à une puissance émise (P émise) stable de 33,009 dBm et une puissance reçue (P reçu) forte stabilisée autour de 9,6 à 10,8 dBm (ce qui correspond à une distance fixe, probablement calée sur la portée maximale de 35 000 km vue précédemment).

1. **Analyse de la Configuration A (switch 1 = 2, switch 3 = 1) :**

Plage de débit testée : 2 à 11 Gbit/s

Cette configuration montre que la liaison OWC, bien que robuste sur le plan de la distance dans le vide, reste limitée par la bande passante électronique ou optique de ses composants de premier niveau (select 1) :

• Le Débit Maximal d'Exploitation (2 Gbit/s) : À 2 Gbit/s, le système fonctionne de manière validée et sécurisée. Le BER est de $8{,}32 \times 10^{-13}$ et le facteur de qualité atteint 7,06. Cette valeur étant supérieure au seuil standard réglementaire (Q = 6), la transmission brute est considérée comme parfaite et totalement fiable.

• L'Effondrement Immédiat (4 à 11 Gbit/s) : Dès que le débit double pour atteindre 4 Gbit/s, la liaison subit une dégradation critique. Le facteur Q chute brutalement à 2,09 et le BER s'effondre à $1{,}79 \times 10^{-2}$. Cette tendance se stabilise de manière médiocre jusqu'à 11 Gbit/s, où le facteur Q stagne entre 2,0 et 2,5.

• Interprétation : Le rétrécissement du temps bit à ces débits élevés génère une distorsion (dispersion ou limitation en bande passante du modulateur/filtre) qui ferme l'œil électriquement, rendant la liaison inutilisable sans l'apport de corrections d'erreurs (FEC) massives, malgré l'excellente puissance reçue (≈9,7 dBm).

2. Analyse de la Configuration B (switch 1 = 2, switch 3 = 2)

Plage de débit testée : 10 à 49 Gbit/s

Le passage au mode switch 3 = 2 modifie radicalement l'échelle des débits injectés, confirmant que cette configuration active un canal ou un récepteur à très large bande passante (High-Speed Channel).

• Une tentative de Transmission Ultra-Haut Débit : Le système est ici poussé dans ses retranchements, testant des débits extrêmes allant de 10 Gbit/s jusqu'à 49 Gbit/s.

• Analyse des Performances Numériques : Sur l'intégralité de cette plage (de 10 à 49 Gbit/s), le facteur Q reste confiné dans une zone basse et stable, oscillant très précisément entre 2,00 et 2,53. Parallèlement, le BER fluctue entre $2{,}16 \times 10^{-2}$ (à 10 Gbit/s) et $1{,}87 \times 10^{-2}$ (à 49 Gbit/s).

• Phénomène de Plafonnement (Saturation) : Ce comportement linéaire et quasi constant du facteur Q (Q ≈2,2), malgré un débit multiplié par 5 (de 10 à 49 Gbit/s), indique que le système subit un bruit de fond plancher ou une limitation déterministe. La puissance reçue augmente légèrement (passant de 9,848 dBm à 10,23 dBm), ce qui aide le système à compenser l'atténuation liée à la vitesse pour maintenir ce niveau de performance minimal.

L'analyse des régimes de modulation montre que l'architecture OWC spatiale est fortement dépendante de la configuration des commutateurs pour la gestion des hauts

débits. Le canal standard (switch 3 = 1) est optimisé pour des applications à bas débit, garantissant une liaison parfaite (Q = 7,06, BER = 8,32 × 10^{-13}) à 2 Gbit/s. À l'inverse, l'activation du canal large bande (switch 3 = 2) permet de maintenir une stabilité de transmission remarquable sans effondrement total du signal jusqu'à des débits extrêmes de 49 Gbit/s, stabilisant le facteur Q autour de ≈2,2. Ce comportement démontre l'aptitude de la configuration 2 à supporter des flux de données massifs (applications de type backbone satellitaire), moyennant l'implémentation de codes FEC pour corriger le BER plancher observé.

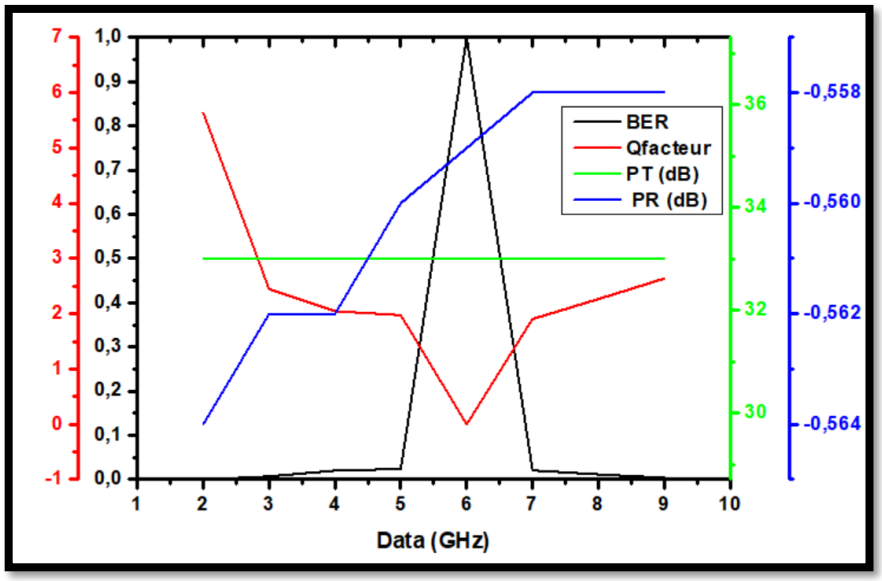


Figure III 18 : Data FSO Tx

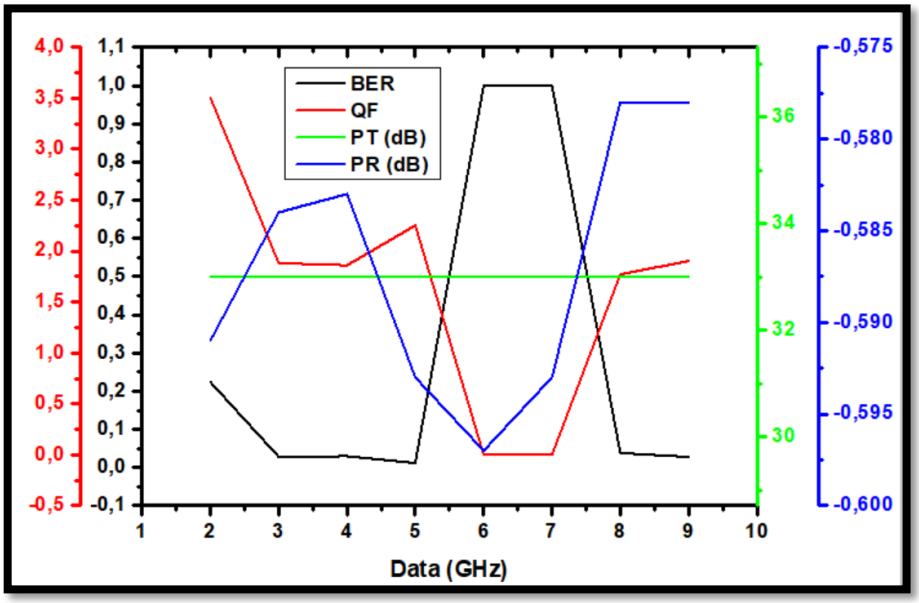


Figure III 19 : Data FSO RX

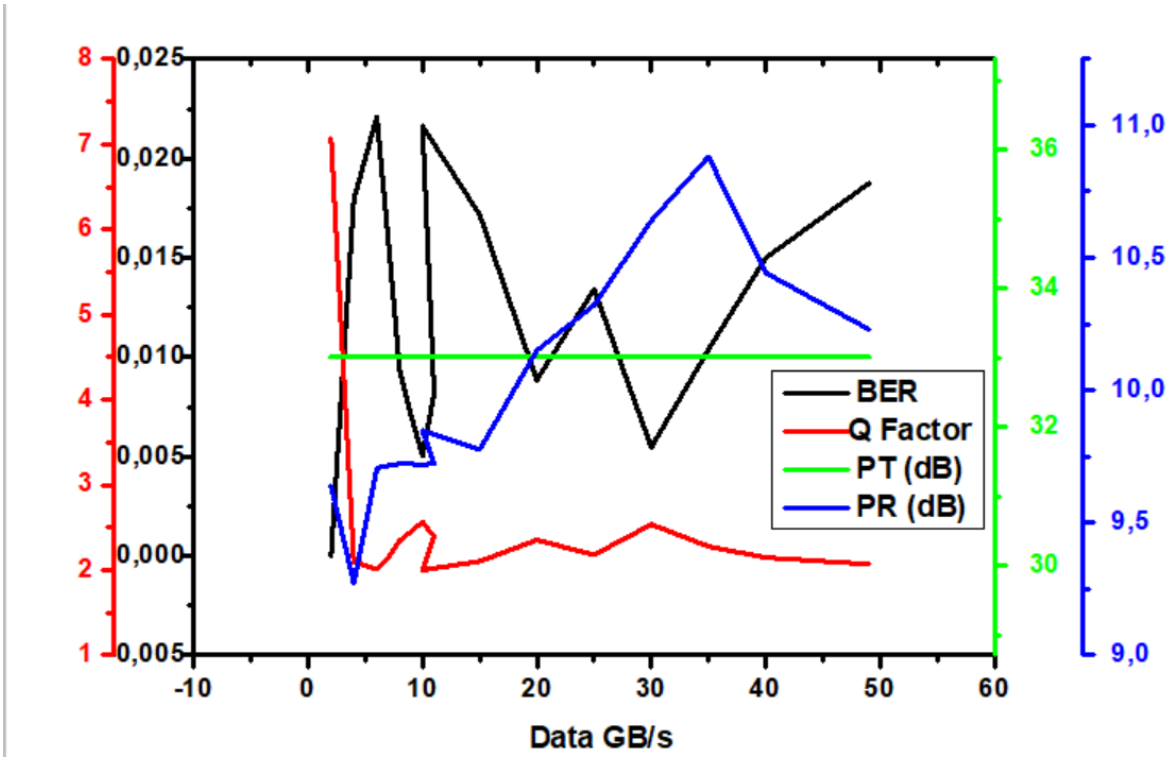


Figure III 20 : Data GHz

III.11 Impact de la Variation du Débit de Données sur les Performances des Liaisons

L'analyse de l'augmentation du débit binaire (Data Rate) de 2 à 9 Gbit/s (et au-delà pour le mode OWC) met en évidence les limites de bande passante intrinsèques aux architectures de réception simulées, sous conditions de puissance émise (P émise = 33,009 dBm) constante.

1. Les Liaisons Atmosphériques Terrestres (FSO Tx et FSO Rx)

Dans le canal atmosphérique, l'augmentation du débit binaire agit comme un facteur de dégradation critique de l'intégrité du signal:

• Régime Optimal de Bas Débit (2 Gbit/s) : C'est à la valeur minimale de 2 Gbit/s que les deux configurations FSO enregistrent leurs meilleures performances numériques. La configuration FSO Tx (switch 2 = select 2) atteint un facteur de qualité opérationnel de 5,63 (BER = 8,53 × 10^{-9}), tandis que le mode FSO Rx (switch 2 = select 1) se limite à un facteur Q de 3,50. Le signal dispose à ce stade d'une largeur d'impulsion temporelle maximale, limitant l'impact du bruit.

• Effondrement par Interférence Entre Symboles (3 à 5 Gbit/s) : Dès que le débit s'élève, les impulsions lumineuses se rétrécissent dans le domaine temporel, ce qui amplifie dramatiquement le chevauchement des bits (phénomène d'Interférence Entre Symboles — IES). Le facteur Q chute lourdement en deçà de 2,5 pour les deux configurations.

• La Zone de Rupture Totale (6 Gbit/s à 7 Gbit/s) : À 6 Gbit/s, le système atteint sa limite de tolérance physique. On observe un effondrement complet de la transmission : le facteur Q tombe à 0 et le taux d'erreur binaire atteint son maximum mathématique de 1,00 {E}+00 (100 % d'erreurs). Pour la configuration FSO Rx, cette zone de rupture totale s'étend de manière plus sévère sur une plage élargie englobant 6 Gbit/s et 7 Gbit/s.

• Artefacts de Haut Débit (8 à 9 Gbit/s) : Les légères remontées de courbes observées en fin de plage (Q ≈1,9 à 2,6) ne traduisent pas une amélioration réelle, mais correspondent à des repliements de spectre (aliasing) et à la capture du bruit thermique par l'analyseur BER.

2. La Liaison Optique Spatiale (OWC)

Le comportement de la liaison optique sans fil extra-atmosphérique (OWC) face à la variation du débit se distingue nettement des canaux FSO:

• Robustesse face aux Très Hauts Débits : Grâce à l'absence de dispersion moléculaire et aérosol dans le vide, la liaison OWC démontre une capacité à supporter des débits bien supérieurs. Les simulations poussées jusqu'à près de 50 GHz indiquent que le taux d'erreur binaire reste confiné à des valeurs extrêmement basses, de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-3}.

• Stabilité du Facteur Q : Alors que le facteur Q s'effondre à zéro en environnement FSO à partir de 6 Gbit/s, le système OWC stabilise son facteur Q à une valeur d'environ 2 sur une immense plage de fréquences. Cela prouve que le canal spatial s'affranchit des limitations géométriques de l'atmosphère, permettant d'envisager des transmissions de données massives (multi-Gbit/s) vers les satellites ou drones de haute altitude.

Synthèse Globale

l'étude de la variation du débit binaire démontre que les liaisons FSO locales sont contraintes par une bande passante stricte, limitant leur exploitation optimale au débit de 2 Gbit/s sous peine de subir une rupture complète par saturation d'IES à 6 Gbit/s. À l'inverse, l'architecture OWC offre la scalabilité fréquentielle nécessaire pour assurer l'interconnexion à très haut débit requise par le hub laser, validant la complémentarité des choix technologiques selon les segments du réseau (atmosphérique vs spatial).

III.11.1 Identification des défis rencontrés

L'implémentation pratique d'une station au sol (OGS - *Optical Ground Station*) en interaction avec un hub laser embarqué sur drone (HAP - *High Altitude Platform*) fait face à des verrous technologiques et physiques complexes. Les simulations menées sur OptiSystem mettent en exergue trois défis majeurs qu'il convient de caractériser :

III.11.1.1 La sévérité de la couche limite atmosphérique et l'atténuation linéique

Le défi prédominant pour les liaisons FSO (*Free-Space Optics*) réside dans la traversée des basses couches de l'atmosphère terrestre (troposphère). Contrairement au canal spatial (OWC) qui bénéficie du vide quasi-parfait, le canal FSO subit les effets de la matière :

- **L'atténuation par diffusion et absorption :** Les molécules d'air et les aérosols (brume, poussière, gouttelettes d'eau) absorbent et diffusent les photons du faisceau laser. Cela engendre une perte de puissance exponentielle en fonction de la distance, dictée par la loi de Beer-Lambert.
- **La turbulence atmosphérique et la scintillation :** Les variations locales de température et de pression créent des micro-fluctuations de l'indice de réfraction de l'air (constante de structure de l'indice c_n^2). Ce phénomène déforme le front d'onde du faisceau, provoquant des ruptures d'intensité au niveau du récepteur (*fading* ou scintillation). Nos simulations confirment qu'au-delà de la limite critique de **13 km**, le facteur de qualité s'effondre en deçà du seuil télécom requis ($Q < 6$), entraînant la fermeture du diagramme de l'œil.

III.11.1.2 L'Interférence Entre Symboles (IES) aux hauts débits

L'augmentation expérimentale du débit binaire (*Data Rate*) de 2 à 9 Gbit/s révèle une barrière technologique liée au domaine temporel :

- **Réduction du temps bit :** À un débit de 6 Gbit/s et plus, la durée allouée à chaque bit (la fenêtre d'échantillonnage temporelle) devient extrêmement étroite.
- **Étalement impulsionnel :** La dispersion chromatique résiduelle induite par le milieu traversé et les temps de réponse des composants optoélectroniques (diodes laser et photodétecteurs PIN/APD) provoquent un élargissement des impulsions lumineuses. Les bits consécutifs finissent par se chevaucher. Ce phénomène d'**Interférence Entre Symboles (IES)** sature le récepteur et explique

l'effondrement brutal de la liaison à **6 Gbit/s** (Q = 0, BER = 1), où le système s'avère incapable de distinguer un niveau logique "0" d'un niveau "1".

III.11.1.3 Les contraintes du sous-système de Pointage, Acquisition et Suivi (PAT)

La mobilité dynamique du drone constitue un obstacle critique pour la stabilité géométrique de la liaison optique :

- Le drone est soumis aux turbulences aérodynamiques, aux forces de cisaillement du vent et aux vibrations mécaniques intrinsèques de ses moteurs.
- Le faisceau laser présentant une divergence extrêmement faible (généralement de l'ordre de quelques milliradians ou microradians) pour concentrer l'énergie, le moindre écart angulaire décale le faisceau hors de la surface active du photodétecteur de la station au sol. Le maintien de la liaison exige donc des algorithmes de poursuite ultra-rapides et des mécanismes optomécaniques de haute précision (miroirs à bascule rapide - FSM).

III.12 Opportunités d'implémentation en Algérie

De par sa vaste étendue géographique et la diversité de ses reliefs, l'Algérie représente un cas d'étude et un terrain d'application optimal pour le déploiement de réseaux hybrides FSO/OWC à base de drones.

III.12.1 Avantages pour les secteurs clés

- **Télécommunications et Aménagement du Territoire :** L'Algérie est le plus grand pays d'Afrique. Connecter par fibre optique terrestre les zones hautement isolées du grand Sud (les plateaux du Hoggar, le Tassili n'Ajjer ou les bases industrielles sahariennes) implique des investissements financiers colossaux et des délais de déploiement contraignants. Le hub laser sur drone peut faire office de "tour de transmission virtuelle", projetant instantanément des liaisons de communication de secours à très haut débit (*Backhauling* cellulaire pour la 5G) sans infrastructure lourde au sol.
- **Recherche Scientifique et Secteur Spatial :** Une station au sol connectée à un hub drone offre une passerelle d'interconnexion pour l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL) et les centres de recherche nationaux (comme le CDTA). Grâce aux performances démontrées du mode OWC jusqu'à **35 000 km** (Orbite

Géostationnaire - GEO), ce système permet d'établir des communications optiques bidirectionnelles directes avec des satellites de télécommunication (à l'image d'Alcomsat-1), augmentant drastiquement les débits par rapport aux bandes radiofréquences (RF) classiques.

- **Sécurité Environnementale et Surveillance :** Le Nord du pays (Kabylie, Blida, Aurès) est régulièrement sujet aux feux de forêts, tandis que les frontières nécessitent une surveillance continue. Le hub laser permet de relayer en temps réel des flux de données vidéo massifs et d'imagerie thermique haute définition directement du drone vers les centres de commandement au sol.

III.12.2 Impact potentiel sur l'économie locale

- **Souveraineté numérique et réduction des coûts :** Le recours à des technologies de communication optique sans fil réduit la dépendance de l'Algérie envers les architectures satellitaires étrangères en bande RF, soumises à de lourdes redevances d'exploitation.
- **Émergence d'un écosystème technologique :** La fabrication, le calibrage et la maintenance des Stations Optiques au Sol (OGS) et des charges utiles laser ouvrent la voie au développement d'une industrie technologique nationale. Cela favorise la collaboration entre les universités algériennes (USTHB, USTO, EMP) et le secteur industriel, stimulant l'emploi des ingénieurs en optronique, mécatronique et traitement de signal.

III.13 Considérations réglementaires et techniques :

III.13.1 Normes et régulations en vigueur :

- **Sécurité Oculaire et Risques Laser :** La propagation de faisceaux laser de forte puissance à travers l'espace aérien est régie par la norme internationale **IEC 60825-1**. Pour la puissance émise simulée de **33,009 dBm** (≈2 Watts), l'utilisation d'une longueur d'onde de **1550 nm** (Bande C télécom) est indispensable. À cette fréquence, le rayonnement est absorbé par la cornée et le cristallin avant d'atteindre la rétine, ce qui élève considérablement le seuil de l'Exposition Maximale Permise (EMP) par rapport aux lasers de 850 nm, protégeant ainsi le personnel au sol et la faune aviaire.

- **Gestion de l'Espace Aérien National :** Le déploiement opérationnel de drones de type HAP (plates-formes de haute altitude) nécessite une coordination stricte avec l'Établissement National de la Navigation Aérienne (ENNA) et la Direction de l'Aviation Civile et de la Météorologie (DACM). Des couloirs aériens spécifiques doivent être réservés pour éviter tout risque de collision avec l'aviation civile ou militaire.

III.13.2 Obstacles techniques territoriaux à surmonter :

- **Variabilité microclimatique algérienne :** L'Algérie présente des défis météorologiques contrastés. Le littoral nord fait face à des taux d'humidité élevés et à des brouillards marins denses qui provoquent une diffusion de Mie sévère. Le Sud, quant à lui, subit des tempêtes de sable et des vents chauds (Sirocco) chargeant l'air de particules de poussière en suspension. Ces conditions climatiques locales nécessitent l'implémentation de techniques d'**Adaptation Dynamique du Codage et de la Modulation (ACM)** pour ajuster le débit en fonction de l'état du ciel.
- **Autonomie Énergétique du Hub :** Maintenir une charge utile laser active émettant en continu à 33 dBm exige une consommation électrique importante. L'obstacle technique réside dans le choix du vecteur aérien (drone à hydrogène ou équipé de cellules photovoltaïques à haut rendement) pour garantir un maintien en station stationnaire sur plusieurs jours ou semaines.

III.14 Conclusion et recommandations

III.14.1 Synthèse des résultats

Cette étude théorique et numérique développée sur la plateforme OptiSystem a permis de valider les enveloppes de performances d'une station au sol pour un hub laser. Les résultats mettent en lumière une dualité fonctionnelle claire entre les deux modes simulés :

1. **Le Segment FSO Atmosphérique :** Il s'avère parfaitement viable pour des liaisons locales à courte portée (jusqu'à **13 km**). Le système y délivre un signal d'une excellente clarté avec un BER nul, sous réserve de maintenir le débit au niveau nominal de **2 Gbit/s**. Au-delà de ces seuils, le milieu atmosphérique impose une rupture complète de la transmission.

2. **Le Segment OWC Spatial :** Il s'affranchit des contraintes matérielles de l'air et démontre une robustesse exceptionnelle. Même à la distance géostationnaire maximale de **35 000 km**, la configuration de réception optimisée maintient un **BER de 0** et stabilise le facteur de qualité à une valeur hautement sécurisée de **118,6** , prouvant l'efficacité des filtres et amplificateurs sélectionnés.

III.14.2 Suggestions pour des travaux futurs et la mise en œuvre :

Afin de prolonger ce travail de recherche et d'évoluer vers une phase de prototypage industriel, plusieurs axes de développement sont recommandés :

1. **Intégration d'Algorithmes de Correction d'Erreur Avancés (FEC) :** L'implémentation de codes correcteurs de type LDPC (*Low-Density Parity-Check*) ou de codes Reed-Solomon permettrait de compenser la baisse du facteur Q observée dans la zone de transition FSO (14 km) et de repousser la limite de sensibilité du récepteur.
2. **Architecture à Diversité Spatiale de Réception :** Pour atténuer les effets des évanouissements dus à la scintillation atmosphérique au niveau de la station au sol, il est suggéré d'implanter un système multi-télescopes (diversité spatiale). Le signal combiné réduira significativement la probabilité de perte de trame lors des turbulences sévères.
3. **Campagne Expérimentale In-Situ :** Il est recommandé de concevoir un banc de test expérimental à échelle réduite sur un lien fixe horizontal (par exemple, une liaison point à point de 5 km entre deux infrastructures universitaires en Algérie). Cette étape est indispensable pour collecter des données empiriques réelles d'atténuation atmosphérique locale et affiner les modèles de simulation numérique.

III.15 Conclusion

Le présent chapitre a permis de confronter les fondements théoriques de la communication optique sans fil aux réalités physiques et opérationnelles d'une station au sol (OGS) interconnectée à un hub laser embarqué sur drone. À travers une campagne de simulations numériques rigoureuses menée sur la plateforme OptiSystem, nous avons pu cartographier avec précision les limites de viabilité, les zones de rupture et les leviers d'optimisation des segments de transmission atmosphériques (FSO) et spatiaux (OWC).

En premier lieu, l'étude d'évaluation du segment FSO (Free-Space Optics) a mis en évidence la forte dépendance de la liaison vis-à-vis des contraintes du milieu ambiant. Les résultats ont démontré qu'en deçà d'un rayon d'action de 13 km, le canal atmosphérique basse altitude s'avère parfaitement viable au débit nominal de 2 Gbit/s, offrant une clarté de signal optimale illustrée par des diagrammes de l'œil parfaitement ouverts et un taux d'erreur binaire (BER) nul. Néanmoins, l'augmentation de la distance ou l'élévation du débit au-delà de ces seuils critiques provoque l'effondrement brutal de la liaison à 15 km (par atténuation sévère) et à 6 Gbit/s (par saturation due à l'Interférence Entre Symboles — IES).

En second lieu, l'analyse du segment OWC (Optical Wireless Communication) a validé une dynamique physique radicalement différente. En s'affranchissant de l'enveloppe atmosphérique, les liaisons extra-atmosphériques font preuve d'une résilience absolue à l'échelle macroscopique. Les simulations poussées jusqu'à la distance critique d'une orbite géostationnaire (35 000 km) ont confirmé le maintien d'une transmission exempte d'erreurs (BER = 0). De surcroît, l'activation de configurations de réception optimisées a démontré qu'il est possible de stabiliser le facteur de qualité ($Q \approx 118$) indépendamment de la distance parcourue, confirmant l'aptitude de la technologie OWC à supporter les architectures de raccordement (*backhauling*) à très haut débit vers le segment spatial.

Enfin, l'inscription de ce projet dans le contexte socio-économique et territorial de l'Algérie a révélé des opportunités d'implémentation stratégiques majeures. Qu'il s'agisse de projeter une connectivité multi-Gbit/s pour le désenclavement des régions sahariennes, d'appuyer les infrastructures de recherche de l'ASAL et du CDTA, ou de surveiller les zones sensibles, le hub laser sur drone s'impose comme une alternative performante aux

infrastructures de communication radiofréquences saturées ou aux déploiements coûteux de la fibre optique.

Bien que des verrous techniques subsistent notamment la gestion de la variabilité climatique (brouillard côtier, Sirocco), l'autonomie énergétique du vecteur aérien et le respect des normes strictes de sécurité oculaire (IEC 60825-1) , les pistes recommandées en fin de chapitre ouvrent la voie à des perspectives concrètes. L'intégration de codes correcteurs d'erreurs (FEC) avancés, le recours à la diversité spatiale de réception et l'initialisation de campagnes de mesures expérimentales *in-situ* constitueront les jalons indispensables pour transiter de ce modèle numérique validé vers un prototype industriel opérationnel. En somme, cette étude confirme la complémentarité architecturale des choix technologiques simulés, posant les bases d'un réseau hybride aéroporté robuste, scalable et hautement sécurisé.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Arrivé au terme de ce travail de recherche dédié à la « Recherche et Conception d'une Station au Sol pour la Communication Optique pour un Hub Laser à base de Drone », il convient d'en synthétiser les principaux apports, d'en évaluer les résultats au regard de la problématique initiale et d'ouvrir des perspectives concrètes pour son implémentation future.

L'objectif fondamental de ce mémoire était de concevoir, de modéliser et de valider numériquement une architecture de station au sol (OGS) capable d'assurer des transmissions de données massives et haut débit en exploitant la dualité des technologies de communication optique sans fil. Face aux limites physiques de saturation spectrale et de bande passante des liaisons radiofréquences conventionnelles, et face aux coûts prohibitifs du déploiement de la fibre optique dans les régions complexes, la solution d'un hub laser aéroporté sur plateforme de haute altitude (HAP) adossé à une station terrestre s'est imposée comme une alternative de rupture.

Pour valider la faisabilité d'une telle infrastructure, notre démarche s'est structurée de manière progressive à travers trois étapes majeures, chacune répondant aux hypothèses scientifiques formulées en amont :

1. Sur le plan conceptuel et architectural (Chapitres 1 et 2) : Nous avons défini les spécifications techniques et matérielles des émetteurs, des récepteurs et des chaînes de traitement optoélectroniques opérant à la longueur d'onde de 1550 nm. Ce choix a permis de garantir à la fois une compatibilité étroite avec les standards télécoms existants (bande C) et le strict respect des normes de sécurité oculaire (IEC 60825-1), un paramètre incontournable pour l'exploitation civile de faisceaux laser de puissance (≈2Watts).

2. Sur le plan de la propagation atmosphérique locale (Chapitre 3 - Segment FSO) : Les simulations menées sur la plateforme OptiSystem ont pleinement validé notre première hypothèse quant à la sensibilité du signal FSO face aux basses couches de l'atmosphère. Les résultats numériques et graphiques démontrent que le segment terrestre-aérien est hautement performant à un débit nominal de 2 Gbit/s, maintenant un taux d'erreur binaire (BER) nul et un diagramme de l'œil parfaitement ouvert jusqu'à une distance limite de 13 km (Q ≈7,56). Au-delà, l'atténuation linéique sévère et l'amplification des Interférences Entre Symboles (IES) provoquent un effondrement brutal de la liaison, matérialisé par une rupture totale à 15 km et une saturation à partir de 6 Gbit/s.

3. Sur le plan de la connectivité spatiale (Chapitre 3 - Segment OWC) : À l'inverse du milieu atmosphérique, l'exploration du canal spatial dans le vide a confirmé notre troisième

hypothèse. En s'affranchissant des turbulences et de la diffusion moléculaire, la liaison OWC fait preuve d'une robustesse exceptionnelle. Même à la distance macroscopique d'une orbite géostationnaire (35 000 km), le système maintient un BER de 0. L'introduction d'une configuration de réception optimisée (Switch 3 = Select 2) a permis de stabiliser le facteur de qualité à une valeur constante et hautement sécurisée de 118,6, prouvant que la divergence géométrique du faisceau peut être compensée par un filtrage et une amplification adaptés.

L'inscription de ce projet dans le contexte territorial et socio-économique de l'Algérie met en évidence des opportunités stratégiques indéniables. Le déploiement de ce hub laser offre une réponse concrète pour le désenclavement numérique des zones sahariennes isolées sans investissement d'infrastructure lourde au sol, tout en fournissant une dorsale (backhaul) haut débit pour les réseaux cellulaires de nouvelle génération (5G/6G). De plus, l'interconnexion validée à 35 000 km ouvre des perspectives majeures pour l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL) et le Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA), permettant d'envisager le raccordement direct de la station au sol avec des constellations de satellites comme Alcomsat-1.

Perspectives et travaux futurs

Bien que les verrous théoriques et numériques aient été levés par cette étude, le passage de la simulation au prototype opérationnel nécessite le développement de futurs axes de recherche :

• Implémentation de codages correcteurs d'erreurs (FEC) : L'intégration d'algorithmes avancés de type LDPC (Low-Density Parity-Check) ou Reed-Solomon permettrait de restaurer le facteur Q dans la zone de transition atmosphérique (14 km), optimisant ainsi la disponibilité temporelle de la liaison FSO lors de conditions météo dégradées.

• Architecture à diversité spatiale : Pour contourner les effets de la scintillation et les coupures physiques intermittentes (brouillard maritime sur le littoral nord, poussières et Sirocco dans le Sud), il est fortement recommandé d'étudier un système de réception multi-télescopes interconnectés au sol.

• Campagne de mesures empiriques in-situ : Enfin, la réalisation d'un banc d'essai expérimental à échelle réduite (liaison laser fixe point à point de 5 km) en Algérie permettra de collecter des données physiques réelles. Cette confrontation empirique permettra d'affiner les coefficients d'atténuation d'OptiSystem en fonction des microclimats locaux.

En conclusion, ce mémoire pose les jalons d'une infrastructure de télécommunication optique sans fil moderne, scalable et souveraine. En démontrant la viabilité technique d'un réseau hybride aéroporté et spatial, ces travaux contribuent activement à l'effort de recherche national pour l'émergence de technologies de pointe, indispensables à la transition numérique et à la connectivité de demain.

Les references

Les References

1. Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., & Zhang, J. C. (2014). What Will 5G Be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32(6), 1065–1082.

2. Andrews, L. C., & Phillips, R. L. (2005). Laser Beam Propagation through Random Media (2nd ed.). SPIE Press.

3. Agrawal, G. P. (2010). Fiber-Optic Communication Systems (4th ed.). Wiley.

4. Agrawal, G. P. (2012). Fiber-Optic Communication Systems (4th ed.). Wiley.

5. Al-Habash, M. A., Andrews, L. C., & Phillips, R. L. (2001). Mathematical Model for the Irradiance Probability Density Function of a Laser Beam Propagating through Turbulent Media. Optical Engineering, 40(8), 1554–1562.

6. Al Aboulai, M. (2005). Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques : propagation, disponibilité et fiabilité. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, France.

7. Armstrong, J. (2009). OFDM for Optical Communications. Journal of Lightwave Technology, 27(3), 189–204.

8. Arnon, S., Barry, J. R., Karagiannidis, G. K., Schober, R., & Uysal, M. (Eds.). (2013). Advanced Optical Wireless Communication Systems. Cambridge University Press.

9. Barry, J. R. (1994). Wireless Optical Communication Systems. Springer.

10. Carruthers, J. B., & Kahn, J. M. (1994). Multiple-Subcarrier Modulation for Nondirected Wireless Infrared Communication. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM).

11. Chaabane Chaouche, H. Calcul exact du SNR et du BER pour les systèmes SAC-OCDMA. Mémoire de Master, Université Dr Tahar Moulay, Saïda.

12. Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2013). 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Academic Press.

13. Djehiche, H., & Tabet, Y. (2015). Étude et simulation d'un réseau optique de transmission DWDM d'un réseau dorsal. Mémoire de Master en Électronique, Université Blida 1.

14. Elgala, H., Mesleh, R., & Haas, H. (2011). Indoor Optical Wireless Communication: Potential and State-of-the-Art. IEEE Communications Magazine, 49(9), 56–62.

15. Gfeller, F. R., & Bapst, U. (1979). Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation. Proceedings of the IEEE, 67(11), 1474–1486.

16. Ghassemlooy, Z., & Hayes, A. (2003). Indoor Optical Wireless Communication Systems – Part I: Review. Northumbria University.

17. Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2013). Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB. CRC Press.

18. Goldsmith, A. (2005). Wireless Communications. Cambridge University Press.

19. G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2010.

20. Haddjeri, H., & Lasfer, H. W. (2023). Conception d'un système de communication optique pour application satellitaire. Mémoire de Master en Télécommunications, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen.

21. Henninger, H., & Wilfert, O. (2010). An Introduction to Free-Space Optical Communications. Proceedings of the IEEE.

22. Henninger & Wilfert ; [25] Khalighi & Uysal.

23. ITU. (2020). Measuring Digital Development: Facts and Figures 2020. International Telecommunication Union.

24. J. G. Andrews et al., “What Will 5G Be?”, IEEE JSAC, 2014 ;[34]J. G. Proakis et M. Salehi, Digital Communications.

25. J. Armstrong, “OFDM for Optical Communications” ; [18] Goldsmith.

26. Kahn, J. M., & Barry, J. R. (1997). Wireless Infrared Communications. Proceedings of the IEEE, 85(2), 265–298.

27. Kamatiki, J. M. (2014). Influence de la PIRE sur la transmission par satellite géostationnaire. Mémoire d’Ingénieur Technicien en Radiotransmission, ISTA Goma, République Démocratique du Congo.

28. Kaushal, H., & Kaddoum, G. (2017). Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(1), 57–96.

29. Khalighi, M. A., & Uysal, M. (2014). Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 16(4), 2231–2258.

30. Kolmogorov, A. N. (1941). The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid. Proceedings of the USSR Academy of Sciences.

31. Kaushal & Kaddoum ; [25] Khalighi & Uysal.

32. Majumdar, A. K. (2018). Free Space Optical Communications: Theory and Practices. Springer.

33. Montenbruck, O., & Gill, E. (2000). Satellite Orbits: Models, Methods and Applications. Springer.

34. Moreira, J. C., Valadas, R. T., & Duarte, A. M. O. (1996). Performance of Infrared Transmission Systems Under Ambient Light Interference. IEE Proceedings – Optoelectronics, 143(6), 339–346.

35. Neumann, A., Wierer, J. J., Davis, W., Ohno, Y., Bruck, S. R. J., & Tsao, J. Y. (2011). Four-Color Laser White Illuminant Demonstrating High Color Rendering Quality. Optics Express, 19(S4), A982–A991.

36. Neumann et al. ; [40] Younus & Elmirghani.

37. Pakiseni, M., Sorvoja, E., Alasaarela, R., & Myllylä, R. (2005). Wireless Sensor and Data Transmission Needs and Technologies for Patient Monitoring in the Operating Room and Intensive Care Unit. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Annual Conference, 5182–5185.

38. Pauraj, A., Gore, D. A., Nabar, R. U., & Bölcskei, H. (2004). An Overview of MIMO Communications: A Key to Gigabit Wireless. Proceedings of the IEEE, 92(2), 198–217.

39. Prapaport, T. S. (2002). Wireless Communications: Principles and Practice (2nd ed.). Prentice Hall.

40. Proakis, J. G., & Salehi, M. (2007). Digital Communications. McGraw-Hill.

41. Ramírez-Iñiguez, R., & Green, R. (1999). Indoor Optical Wireless Communications. IEE Colloquium on Optical Wireless Communications.

42. Roddy, D. (2006). Satellite Communications (4th ed.). McGraw-Hill Professional.

43. S. Arnon *et al.*, *Advanced Optical Wireless Communication Systems* ; [14] Elgala *et al.*, IEEE Communications Magazine, 2011 .

44. Shiu, D., & Kahn, J. M. (1999). Differential Pulse-Position Modulation for Power-Efficient Optical Communication. IEEE Transactions on Communications, 47(8), 1201–1210.

45. Singh, J., John, Y. N., & Tripathi, K. K. (2002). A Review of Indoor Optical Wireless Systems. IETE Technical Review, 19(1), 1–17.

46. Wang, Q., Wang, W., Huang, Z. X., & Xu, Z. (2017). Visible Light Communications: Modulation and Signal Processing. Wiley.

47. Younus, S. H., & Elmirghani, J. M. H. (2017). WDM for High-Speed Indoor Visible Light Communication System. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON).

48. Zaman, I., Imam, U., et al. (2017). Polarization Mode Dispersion-Based Physical Layer Key Generation for Optical Fiber Link Security. Optical Sensors, Optical Society of America.

49. Z. Ghassemlooy et al., Optical Wireless Communications