

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de Fin d'Etude  
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Techniques**  
Filière : **Télécommunications**  
Spécialité : **Réseaux et Télécommunications**

---

**Etude et évaluation des performances d'un système de  
communication sous-marine par lumière visible  
– Underwater VLC –**

---

Présenté par :  
**AMADOU TIDIANE LY Khadija**

**TOURE Salama**

Sous la direction de :

**Dr. GRAINI Leila**

**Année Universitaire : 2024-2025**



---

## Remerciements

*Louange à Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux, qui nous a accordé la santé, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce travail. C'est grâce à Sa volonté que nous avons pu franchir chaque étape avec persévérance.*

*Nous exprimons notre profonde reconnaissance aux membres **du jury**, pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce travail, ainsi que pour l'intérêt et l'attention qu'ils ont portés à notre mémoire.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement **Dr Graini Leila**, notre encadrante, pour son encadrement rigoureux, ses conseils avisés, sa patience et sa bienveillance tout au long de ce projet. Son accompagnement a été un véritable appui pour nous.*

*Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble du **corps professoral du Département Électronique et Télécommunications de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma**, pour la qualité de l'enseignement reçu, ainsi que pour leur engagement et leur soutien tout au long de notre formation.*

*Enfin, nous adressons toute notre gratitude à nos familles, nos amis et toutes les personnes qui nous ont encouragés, soutenus et motivés tout au long de ce parcours.*



---

## *Dédicaces*

*Ce travail est dédié à toutes les personnes qui me sont chères :*

*À mes parents, piliers de ma vie,*

*À ma mère, dont l'amour, les sacrifices et les prières silencieuses ne connaissent aucune limite. Elle n'épargne aucun effort pour le bonheur de ses enfants, et je lui en suis infiniment reconnaissante.*

*À mon père, que la vie a arraché trop tôt, mais qui reste à jamais vivant dans mon cœur. Que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son paradis.*

*À mes frères et sœurs, pour leur soutien constant, leur affection et leurs mots d'encouragement, même à distance.*

*À ma sœur de cœur, mon amie précieuse,*

*Adama Aliou Fofana, pour son amour indéfectible, sa présence, son écoute et son soutien sans faille à chaque étape de mon parcours.*

*Et enfin, à ma binôme Khadija Ly pour sa patience, sa confiance et sa collaboration.*

*À vous tous, je dédie ce mémoire avec amour, gratitude et respect.*

*Touré Salama*



## *Dédicaces*

### *À mes très chers parents,*

*Il me paraît très approprié de dédier ce travail, aussi modeste soit-il, à mes parents qui se sont évertués à m'assurer la scolarité nonobstant les vicissitudes de la quotidienneté. Leur amour inconditionnel, leur patience silencieuse et leur foi en moi ont été les piliers de mon parcours. Que ce travail soit l'aboutissement, pour eux, de nombreuses années de sacrifices silencieux et de soutien indéfectible.*

*J'espère qu'un jour je pourrais leurs rendre ne serait-ce qu'une infime partie de tout ce qu'ils ont fait pour moi. Que Dieu leur prête bonheur et longue vie et les entoure de son amour infini.*

### *À mes frères et sœurs,*

*Pour leurs affections, leurs encouragements permanents et leurs précieux conseils qu'ils me prodiguent chaque jour que Dieu fait.*

### *À mon binôme « Salama Touré »*

*Pour sa collaboration, son engagement et sa patience tout au long de ce parcours.*

### *À ma famille,*

*Pour leurs soutiens moraux tout au long de mon cursus, mes amis pour une sincérité si merveilleuse, tous mes professeurs qui nous ont enseigné et à ceux qui ont veillé à ce que ce mémoire soit à la hauteur.*

*Enfin à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi, Ce mémoire vous est dédié avec toute ma reconnaissance.*

*Ly Khadija*



## الملخص

ان الحاجة المتزايدة لنقل البيانات بسرعة عالية، والحجم الهائل للبيانات المُعالَجة في التطبيقات تحت الماء، تجعل من اتصالات الضوء المرئي تحت الماء (UVLC) بديلاً واعداً للاتصالات الصوتية، التي غالباً ما تكون محدودة في معدل نقل البيانات. ومع ذلك، يُعد اختيار تقنية التضمين المناسبة في نظام UVLC أمراً بالغ الأهمية، إذ يؤثر بشكل مباشر على أداء النظام ودقته وأمانه. تقترح هذه الدراسة استخدام التضمين الضوئي (CPM)، تحديداً، التضمين الضوئي (MSK) في أنظمة UVLC، من أجل تحسين أداء أنظمة UVLC نظراً لخصوصيات البيئة تحت الماء ومتطلبات نقل البيانات، مع الاستفادة من مزايا MSK، بما في ذلك طيفها المدمج، وطورها المستمر، وانخفاض تعقيد تنفيذها.

الهدف من هذا العمل هو دراسة أنظمة UVLC مع استخدام التضمين الضوئي MSK، وخاصةً MSK-IPS في بيئات لا تتوفر فيها رؤية مباشرة (NLOS)، لتقييم جدواها في الاتصالات تحت الماء طويلة المدى، عالية السرعة، ومنخفضة معدل الخطأ، مع التغلب على تحديات سعة الاتصالات العالية.

في هذا السياق، أُجريت عمليات محاكاة باستخدام برنامج OptiSystem لنمذجة وتقييم أداء نظام UVLC المقترح تحت تأثير عوامل متنوعة، مثل أنواع المياه المختلفة (مياه البحر النقية، ومياه المحيط الصافية، والمياه الساحلية)، مسافة الإرسال، العمق، ومستويات الاضطراب. وشملت المعايير الرئيسية المستخدمة معدل الخطأ (BER)، معامل الجودة (Q)، مخطط العين، معدل نقل البيانات، نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) والطاقة المستقبلية عند جهاز الاستقبال. وتُظهر النتائج فعالية التضمين الضوئي MSK-IPS في تحقيق معدلات بيانات عالية مع الحفاظ على معدلات خطأ منخفضة، كما تُظهر النتائج أيضاً أن هذا النظام المقترح يُقدم تحسیناً مقارنةً بأنظمة UVLC التي تستخدم تقنيات تضمين أخرى خاصة في المياه النقية.

**الكلمات المفتاحية:** الاتصالات الضوئية المرئية تحت الماء (UVLC)، NLOS، التضمين

الضوئي MSK، عامل الجودة (Q)، معدل خطأ (BER).

# Abstract

The growing requirements for high-speed data transmission and a huge volume of data in underwater applications are significantly make underwater visible light communications (UVLC) a promising alternative than the incumbent acoustic technology, which is limited in data rate. However, the choice of the appropriate modulation scheme in the UVLC system is crucial, as it directly affects the system performance, its accuracy, and its security. Accordingly, we have suggested to using optical continuous phase modulation (CPM) and more specifically minimum shift keying modulation (MSK) in the UVLC systems. This approach is proposed to optimize the performance of UVLC systems due to the specificities of the underwater environment and data transmission requirements, while taking advantage of the MSK characteristics, including its compact spectrum, continuous phase, and reduced complexity.

The purpose of the study is to investigate underwater optical systems UVLC using optical MSK modulation particularly MSK-IPS (independent pulse shaping), in non-line-of-sight (NLOS) environments, to evaluate their feasibility for long-range underwater communications, high-speed, low-bit-error-rate, and while overcoming the challenges of high communication capacity.

In this context, simulations are conducted using OptiSystem software to design and analyze the performance of the proposed UVLC system under various underwater conditions, such as different water types (pure seawater, clear ocean water and coastal water), link range, water depth and turbulence levels. The key parameters used are bit error rate (BER), quality factor (Q), eye diagram, data bit rate, signal to noise ratio (SNR) variation and received power. The results demonstrate the effectiveness of the optical MSK modulation in achieving high data rates while maintaining low bit error rates, and the improvement that offers this system over UVLC systems using other modulation schemes, especially in clear water.

**Keywords:** Underwater visible light optical communications (UVLC), NLOS channel, optical MSK modulation, turbulence, quality factor (Q), Bit error rate (BER).

# Résumé

Les besoins croissants en matière de transmission de données à haut débit et l'énorme volume de données traitées dans les applications sous-marines rendent les communications optiques sous-marines par lumière visible UVLC (pour Underwater Visible Light Communications), une alternative prometteuse aux communications acoustiques qui sont souvent limitées en débit. Cependant, le choix de la technologie de modulation appropriée dans le système UVLC est crucial, car il affecte directement les performances, la précision et la sécurité du système. Cette étude suggère d'utiliser la modulation optique à phase continue optique (CPM) et plus particulièrement la modulation optique par déplacement minimum (MSK) pour les systèmes UVLC. Cette approche est proposée pour optimiser la performance des systèmes UVLC en raison des spécificités de l'environnement sous-marin et des exigences de transmission de données, tout en profitant des avantages de la MSK, notamment son spectre compact, sa phase continue et sa complexité de réalisation réduite.

Ce mémoire vise donc à étudier les systèmes optiques sous-marins UVLC en utilisant la modulation optique MSK, notamment MSK-IPS (independent pulse shaping) dans des environnements sans visibilité directe (NLOS), pour évaluer leur faisabilité pour des communications sous-marines à longue distance, à haut débit et avec un faible taux d'erreur binaire, tout en surmontant les défis liés à la grande capacité de communication.

Dans ce contexte, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel OptiSystem, pour modéliser et évaluer les performances du système UVLC proposé dans diverses conditions sous-marines, telles que différents types d'eau (eau de mer pure, eau océanique claire et eau côtière), la distance de transmission, la profondeur et les niveaux de turbulence. Les paramètres-clés utilisés sont le taux d'erreur binaire (BER), le facteur de qualité (Q), le diagramme de l'œil, le débit binaire de données, la variation du SNR (signal to noise ratio) et la puissance reçue. Les résultats démontrent l'efficacité de la modulation optique MSK pour atteindre des débits de données élevés tout en maintenant de faibles taux d'erreur binaire, et que ce système offre une amélioration par rapport aux systèmes UVLC utilisant d'autres techniques de modulation, notamment dans l'eau clair.

**Mots clé :** communications optique sous-marines par lumière visible (UVLC), canal NLOS, modulation optique MSK, turbulence, facteur de qualité (Q), Le taux d'erreur binaire (BER).

# Table Des Matières

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>TABLE DES MATIERES.....</b>                                               | <b>I</b>  |
| <b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>                                               | <b>V</b>  |
| <b>LISTE DES FIGURES .....</b>                                               | <b>VI</b> |
| <b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>                                           | <b>1</b>  |
| <b>CHAPITRE 1.....</b>                                                       | <b>4</b>  |
| <b>LES SYSTEMES DE COMMUNICATION SOUS- MARINE PAR LUMIERE VISIBLE (UVLC)</b> |           |
| 1.1 INTRODUCTION.....                                                        | 4         |
| 1.2 COMMUNICATION PAR LUMIERE VISIBLE (VLC).....                             | 5         |
| 1.2.1 Evolution/Historique .....                                             | 5         |
| 1.2.2 Fonctionnement de la VLC.....                                          | 6         |
| 1.2.3 Applications.....                                                      | 7         |
| 1.2.3.1. LiFi (Light Fidelity) .....                                         | 7         |
| 1.2.3.2. Communications intérieures (Indoor Positioning) .....               | 8         |
| 1.2.3.3. Véhicules intelligents et transports .....                          | 8         |
| 1.2.3.4. Panneaux publicitaires.....                                         | 9         |
| 1.2.3.5. Communications sous-marines .....                                   | 9         |
| 1.2.3.6. Systèmes de communication sous-marine UVLC.....                     | 10        |
| 1.2.4 Architecture et technologie associées.....                             | 10        |
| 1.2.4.1 Emetteur optique .....                                               | 10        |
| a. Diodes lasers (LD).....                                                   | 11        |
| b. Diodes électroluminescentes (LEDs) .....                                  | 11        |
| 1.2.4.2 Canal de transmission.....                                           | 12        |
| 1.2.4.3 Récepteur.....                                                       | 13        |
| a. Photodiode PIN .....                                                      | 13        |
| b. Photodiode à avalanche (APD) .....                                        | 13        |
| 1.2.5 Techniques de modulation dans l'UVLC .....                             | 14        |

|                                         |                                                                                                                      |           |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.2.5.1                                 | Modulation mono-porteuse (SCM : Single Carrier Modulation).....                                                      | 15        |
| a.                                      | Modulation OOK (On-Off Keying) .....                                                                                 | 15        |
| b.                                      | Modulation PAM (Pulse Amplitude Modulation) .....                                                                    | 16        |
| c.                                      | Modulation PPM (Pulse position modulation) :.....                                                                    | 16        |
| 1.2.5.2                                 | Modulation multi-porteuse (MCM : Multi-Carrier Modulation).....                                                      | 17        |
| a.                                      | Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM : Orthogonal frequency division multiplexing) : ..... | 17        |
| b.                                      | Modulation basée sur le couleur (CDBM : Color Domain-Based Modulation/CSK : Color Shift Keying) .....                | 19        |
| 1.2.6                                   | APPLICATIONS.....                                                                                                    | 20        |
| 1.2.6.1                                 | L'exploration et l'exploitation des ressources marines (explorations offshore) .....                                 | 20        |
| 1.2.6.2                                 | Surveillance environnementale .....                                                                                  | 20        |
| 1.2.6.3                                 | Sécurité des frontières et des côtes.....                                                                            | 21        |
| 1.2.6.4                                 | Archéologie marine .....                                                                                             | 21        |
| 1.2.7                                   | TRAVAUX RECENTS DANS LE DOMAINE DES UVLC.....                                                                        | 21        |
| 1.3                                     | CONCLUSION.....                                                                                                      | 22        |
| <b>CHAPITRE 2.....</b>                  |                                                                                                                      | <b>23</b> |
| <b>MODELISATION DU CANAL UVLC .....</b> |                                                                                                                      | <b>23</b> |
| 2.1                                     | INTRODUCTION.....                                                                                                    | 23        |
| 2.2                                     | SYSTEME DE TRANSMISSION UVLC/UOWC.....                                                                               | 23        |
| 2.3                                     | CARACTERISTIQUES DE PROPAGATIONS DES CANAUX DE COMMUNICATION SOUS-MARINS ...                                         | 24        |
| 2.3.1                                   | Atténuation.....                                                                                                     | 24        |
| 2.3.1.1                                 | L'absorption .....                                                                                                   | 25        |
| 2.3.1.2                                 | La diffusion .....                                                                                                   | 26        |
| 2.3.2                                   | La turbulence océanique .....                                                                                        | 27        |
| 2.3.3                                   | Erreur de pointage et Alignement.....                                                                                | 29        |
| 2.3.4                                   | Interférence et dispersion par trajets multiples.....                                                                | 30        |
| 2.3.5                                   | Obstacles physiques.....                                                                                             | 30        |
| 2.3.6                                   | Types d'eau .....                                                                                                    | 31        |
| 2.3.6.1                                 | Classification selon la concentration en chlorophylle.....                                                           | 31        |
| 2.3.6.2                                 | Classification selon la profondeur.....                                                                              | 32        |

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.7 Sources de bruits.....                                                            | 33        |
| a. Bruit de fond.....                                                                   | 33        |
| b. Bruit optique excessif.....                                                          | 33        |
| c. Bruit thermique .....                                                                | 34        |
| d. Bruit de grenaille .....                                                             | 34        |
| e. Bruit de courant d'obscurité du photodétecteur.....                                  | 34        |
| 2.3.8 Turbulence due au paramètre de structure de l'indice de réfraction .....          | 34        |
| 2.4 CONFIGURATION DES LIAISONS DANS L'UVLC .....                                        | 35        |
| 2.4.1 Liaison en visibilité directe LOS .....                                           | 35        |
| 2.4.2 Liaison LOS assistée par rétro-rélecteur .....                                    | 37        |
| 2.4.3 Configuration NLOS .....                                                          | 39        |
| 2.5 MODELES ET METHODES DE CALCUL DE CANAL UVLC .....                                   | 41        |
| 2.5.1 Loi de Beer-Lambert .....                                                         | 41        |
| 2.5.2 Techniques de simulations de Monte-Carlo .....                                    | 41        |
| 2.5.3 Equation de transfert radiatif (RTE).....                                         | 42        |
| 2.6 CONCLUSION .....                                                                    | 42        |
| <b>CHAPITRE 3 SIMULATION ET DISCUSSION DES RESULTATS .....</b>                          | <b>44</b> |
| 3.1 INTRODUCTION.....                                                                   | 44        |
| 3.3 CRITERE D'EVALUATIONS DU SYSTEME DE TRANSMISSION .....                              | 45        |
| 3.3.1 Le taux d'erreur binaire TEB .....                                                | 45        |
| 3.3.2 Le diagramme de l'œil.....                                                        | 46        |
| 3.3.3 Le facteur de qualité .....                                                       | 46        |
| 3.4 CHOIX DE TYPE DE LA MODULATION .....                                                | 47        |
| 3.4.1 Confirmation du choix du modulateur.....                                          | 47        |
| 3.5 ARCHITECTURE GENERALE DU SYSTEME NLOS UVLC UTILISANT LA MODULATION<br>MSK_IPS ..... | 49        |
| 3.6 Présentation de la liaison NLOS UVLC avec modulateur MSK_IPS sous OptiSystem .....  | 50        |
| 3.6.1 L'émetteur optique .....                                                          | 51        |
| 3.6.2 Le canal sous-marin NLOS .....                                                    | 52        |
| 3.6.3 Le récepteur.....                                                                 | 52        |
| 3.7 RESULTATS DE LA SIMULATION ET DISCUSSIONS .....                                     | 53        |
| 3.8 EFFET DE DIFFERENTS PARAMETRES SUR LA PERFORMANCE DU SYSTEME NLOS UVLC.....         | 58        |

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.8.1 Effet de la puissance optique transmise.....                                                                                | 58 |
| 3.8.2 Effet de l'atténuation dans les milieux sous-marins.....                                                                    | 59 |
| 3.8.3 Effet de la profondeur de l'émetteur / récepteur.....                                                                       | 60 |
| 3.8.4 Effet de la variation du diamètre de l'ouverture du récepteur.....                                                          | 61 |
| 3.8.5 Effet de la variation des angles d'émission/réception (angles intérieur $\theta_{\min}$ et extérieur $\theta_{\max}$ )..... | 62 |
| 3.8.6 Effet de la turbulence aquatique (l'indice de réfraction de la structure <b>Cn2</b> ).....                                  | 64 |
| 3.8.7 Effet de la variation de débit de transmission.....                                                                         | 65 |
| a Pour faible à moyenne turbulence : <b>Cn2</b> = $0.5 \times 10 - 15m - 2/3$ .....                                               | 65 |
| b Pour forte turbulence : <b>Cn2</b> = $0.5 \times 10 - 13m - 2/3$ .....                                                          | 66 |
| 3.8.8 Etude des performances face au bruit.....                                                                                   | 68 |
| 3.8.9 COMPARAISON ENTRE LA MODULATION MSK_IPS ET D'AUTRES TYPES DE MODULATION.....                                                | 69 |
| 3.9 CONCLUSION.....                                                                                                               | 72 |
| <b>CONCLUSION GENERALE</b> .....                                                                                                  | 73 |
| <b>ANNEXE 75</b>                                                                                                                  |    |
| 1. LA MODULATION CPM (CONTINUOUS PHASE MODULATION).....                                                                           | 75 |
| 1.1 LA MODULATION MSK .....                                                                                                       | 76 |
| 1.1.1. Modulateurs MSK externes basés sur la modulation par déplacement de phase .....                                            | 76 |
| a . Modulateur MSK à mise en forme directe des impulsions (DPS).....                                                              | 76 |
| b. Modulateur MSK à mise en forme d'impulsions séparée (SPS) .....                                                                | 78 |
| c. Modulateur de mise en forme d'impulsions indépendant IPS .....                                                                 | 79 |
| 1.1.2 Récepteur à retard optique.....                                                                                             | 80 |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....                                                                                           | 81 |
| <b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....                                                                                               | 86 |

# Liste Des Tableaux

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1.1</b> : Comparaison entre VLC, RF et Acoustique .....                                                                        | 4  |
| <b>Tableau 1.2</b> : Comparaison des LED et des DL pour les liaisons sans fil.....                                                        | 12 |
| <b>Tableau 2.1</b> : Les valeurs des coefficients d'absorption, de diffusion et d'extinction sous-marins pour différent types d'eau ..... | 32 |
| <b>Tableau 3.1</b> : Avantages et Applications du logiciel OptiSystem. ....                                                               | 45 |
| <b>Tableau 3.2</b> : Paramètre utilisé pour la comparaison.....                                                                           | 48 |
| <b>Tableau 3.3</b> : Paramètres utilisés pour l'étude des performances.....                                                               | 53 |
| <b>Tableau 3.4</b> : Comparaison entre MSK_IPS et d'autre type de modulation. ....                                                        | 71 |

# Liste Des Figures

|                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1.1</b> : Spectre de fréquence VLC .                                                                                                                                    | 5  |
| <b>Figure 1.2</b> : Technologie LiFi .                                                                                                                                            | 7  |
| <b>Figure 1.3</b> : Applications VLC en communication intérieur.                                                                                                                  | 8  |
| <b>Figure 1.4</b> : VLC pour les réseaux véhiculaires                                                                                                                             | 9  |
| <b>Figure 1.5</b> : VLC pour les systèmes de communication sous-marine                                                                                                            | 10 |
| <b>Figure 1.6</b> : Schéma fonctionnel d'un système UVLC .                                                                                                                        | 10 |
| <b>Figure 1.7</b> : Techniques de modulation de l'UVLC .                                                                                                                          | 15 |
| <b>Figure 1.8</b> : (a) OOK-NRZ et (b) OOK-RZ avec $\gamma = 0,5$                                                                                                                 | 16 |
| <b>Figure 1.9</b> : Modulation PAM                                                                                                                                                | 16 |
| <b>Figure 1.10</b> : Modulation PPM avec $M = 4$ .                                                                                                                                | 17 |
| <b>Figure 1.11</b> : Schéma de multiplexage OFDM .                                                                                                                                | 18 |
| <b>Figure 1.12</b> : Constellations CSK fournies par la norme IEEE802.15.7 : (a) 4-CSK ; (b) 8-CSK ; (c) 16-CSK                                                                   | 19 |
| <b>Figure 2.1</b> : Interaction entre particules d'eau et photons.                                                                                                                | 23 |
| <b>Figure 2.2</b> : Modèle géométrique des propriétés optiques inhérentes.                                                                                                        | 24 |
| <b>Figure 2.3</b> : Coefficient d'absorption de la lumière dans l'eau (a). Transmission (b), en fonction de la distance de transmission pour Lumières de 405, 550, 650 et 800 nm. | 26 |
| <b>Figure 2.4</b> : Classification des environnements sous-marins.                                                                                                                | 33 |
| <b>Figure 2.5</b> : Schéma d'une liaison en visibilité directe (LOS).                                                                                                             | 36 |
| <b>Figure 2.6</b> : Schéma d'une liaison LOS assistée par rétro-réflecteur.                                                                                                       | 38 |
| <b>Figure 2.7</b> : Schéma d'une liaison NLOS                                                                                                                                     | 39 |
| <b>Figure 3.1</b> : Interprétation du diagramme de l'œil                                                                                                                          | 46 |
| <b>Figure 3.2</b> : Variation du facteur Q en fonction de la distance horizontale.                                                                                                | 48 |
| <b>Figure 3.3</b> : Liens UVLC horizontaux                                                                                                                                        | 49 |
| <b>Figure 3.4</b> : Architecture du système UVLC avec modulateur MSK_IPS.                                                                                                         | 50 |

|                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 3.5</b> : Architecture du système UVLC avec modulateur MSK_IPS sous OptiSystem .                                                                                                                                     | 51 |
| <b>Figure 3.6</b> : Canal sous-marin NLOS sous OptiSystem.                                                                                                                                                                     | 52 |
| <b>Figure 3.7</b> : Signal binaire d'origine.                                                                                                                                                                                  | 54 |
| <b>Figure 3.8</b> : Porteuse optique modulé par le signal sinusoïdal.                                                                                                                                                          | 54 |
| <b>Figure 3.9</b> : Signal optique à la sortie du modulateur MSK_IPS.                                                                                                                                                          | 55 |
| <b>Figure 3.10</b> : Spectre de la porteuse optique modulée par le signal sinusoïdal.                                                                                                                                          | 55 |
| <b>Figure 3.11</b> : Spectre de la porteuse optique à la sortie du modulateur MSK_IPS.                                                                                                                                         | 55 |
| <b>Figure 3.12</b> : Signaux MSK-IPS à la sortie du canal NLOS pour (a) Pure Sea, (b) Clear Ocean et (c) Coastal Ocean.                                                                                                        | 56 |
| <b>Figure 3.13</b> : Signaux démodulés avant le filtrage pour (a) Pure Sea, (b) Clear Ocean et (c) Coastal Ocean.                                                                                                              | 57 |
| <b>Figure 3.14</b> : Signaux démodulés après le filtrage pour (a) Pure Sea, (b) Clear Ocean et (c) Coastal Ocean.                                                                                                              | 57 |
| <b>Figure 3.15</b> : Diagrammes de l'œil et facteur Q pour (a) Pure Sea, (b) Clear Ocean et (c) Coastal Ocean.                                                                                                                 | 57 |
| <b>Figure 3.16</b> : Variation de la puissance reçue en fonction de la puissance transmise.                                                                                                                                    | 58 |
| <b>Figure 3.17</b> : (a) variation de la puissance du signal reçue en fonction de la distance, (b) variation du facteur Q en fonction de la puissance émise.                                                                   | 59 |
| <b>Figure 3.18</b> : (a) variation de la puissance (b) et facteur Q en fonction de la profondeur de l'émetteur/récepteur.                                                                                                      | 61 |
| <b>Figure 3.19</b> : Variation de la puissance du signal reçue en fonction des diamètres d'ouvertures du récepteur.                                                                                                            | 62 |
| <b>Figure 3.20</b> : variation de la puissance du signal reçue en fonction de l'angle intérieur (a), (b) de l'angle extérieur.                                                                                                 | 63 |
| <b>Figure 3.21</b> : Variation du facteur Q en fonction de la turbulence (paramètre de l'indice de réfraction de la structure) pour différents débit binaire (a) 100 Mbits/s, (b) 1 Gbits/s, (c) 10 Gbits/s et (d) 40 Gbits/s. | 64 |
| <b>Figure 3.22</b> : Variation du facteur Q en fonction de la distance sous faible à moyenne turbulence et pour différents débit binaire (a) 100 Mbits/s, (b) 1 Gbits/s, (c) 10 Gbits/s et (d) 40 Gbits/s.                     | 66 |

|                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 3.23</b> : Variation du facteur $Q$ en fonction de la distance sous forte turbulence et pour différents débit binaire (a) 100 Mbits/s, (b) 1 Gbits/s, (c) 10 Gbits/s et (d) 40 Gbits/s..... | 67 |
| <b>Figure 3.24</b> : Variation du SNR en fonction de la distance. ....                                                                                                                                | 68 |
| <b>Figure 3.25</b> : Variation du BER en fonction du SNR pour Coastal Ocean.....                                                                                                                      | 69 |
| <b>Figure 3.26</b> : Variation du facteur $Q$ en fonction du débit pour faible et forte turbulence. ....                                                                                              | 70 |
| <b>Figure a.1</b> : Architecture d'un modulateur DPS MSK . ....                                                                                                                                       | 77 |
| <b>Figure a.2</b> : Architecture d'un modulateur SPS MSK . ....                                                                                                                                       | 78 |
| <b>Figure a.3</b> : Architecture d'un modulateur IPS MSK . ....                                                                                                                                       | 79 |
| <b>Figure a.4</b> : Architecture d'un récepteur à retard optique . ....                                                                                                                               | 80 |

# *Introduction Générale*

### **Introduction générale**

La communication sous-marine est au cœur de nombreuses applications modernes, telles que l'exploitation des océans, la surveillance de l'environnement marin, la navigation autonome et les interventions en milieu aquatique. Traditionnellement, les systèmes acoustiques ont été privilégiés pour ces communications en raison de leur capacité à couvrir de grandes distances. Cependant, ces systèmes présentent des limitations notables, notamment des débits de données faibles, une latence élevée, une sensibilité au bruit ambiant et une consommation énergétique importante. Face à ces défis, la communication optique sans fil sous-marine, ou Underwater Visible Light Communication (UVLC), émerge comme une alternative prometteuse [1]. En exploitant la lumière visible, ces systèmes offrent des débits de données élevés, une faible latence, une consommation énergétique réduite et une sécurité accrue.

Cela dit, l'UVLC offre des perspectives intéressantes pour diverses applications sous-marines. Elle permet la communication entre véhicules sous-marins autonomes (AUVs) pour la coordination des missions. Elle facilite la transmission de données haute définition lors de l'inspection de pipelines, de câbles sous-marins ou de structures offshore. Elle permet la collecte et la transmission de données scientifiques à partir de capteurs déployés à différentes profondeurs. Elle offre une communication en temps réel pour le suivi de la qualité de l'eau, de la biodiversité marine et des conditions climatiques sous-marines.

Toutefois, l'UVLC présente également des défis techniques. La réalisation des liaisons UVLC réside dans le choix du système de communication approprié, qui doit prendre en compte les spécificités de l'environnement sous-marin et les exigences de transmission de données. La lumière visible est fortement atténuée par l'absorption et la diffusion dans l'eau, ce qui limite la portée de la communication. Les systèmes UVLC nécessitent un alignement précis entre le transmetteur et le récepteur en raison de la divergence étroite des faisceaux lumineux, ce qui peut être difficile dans des environnements sous-marins turbulents. Les conditions sous-marines, telles que la turbidité de l'eau, la salinité et la température, peuvent affecter les performances du système UVLC. La présence de plancton ou d'autres organismes marins peut provoquer des interférences, affectant la qualité du signal lumineux [2].

En conséquence, les chercheurs se sont concentrés sur l'amélioration de la portée de propagation, du débit de transmission de données et de la fiabilité du système dans la technologie UOWC afin de garantir des performances optimales. Dans ce contexte, le choix de la technologie de modulation est crucial pour optimiser les performances du système UVLC. Des techniques de modulation avancées, telles que la modulation d'amplitude (OOK), la modulation par impulsions

(PPM), la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) et la modulation par déplacement de phase (PSK), ainsi que la combinaison de plusieurs techniques de modulation, sont déjà proposées et étudiés [3]. Dans ce mémoire, la modulation à phase continue optique CPM (Continuous Phase Modulation) particulièrement, la modulation optique par déplacement minimum notamment MSK-IPS (Independent Pulse Shaping) a été sélectionné pour sa capacité à offrir une efficacité spectrale élevée tout en réduisant les interférences inter-symboles (ISI). Cette modulation permet d'obtenir une transmission fiable même dans des conditions de canal sous-marin difficiles, caractérisées par une forte atténuation et des turbulences.

Ce mémoire a pour objectif d'étudier et d'évaluer les performances d'une nouvelle architecture de systèmes optiques sous-marins UVLC employant la modulation optique MSK-IPS pour relever les défis liés à la réalisation simultanée des objectifs de communication sous-marine longue distance, haut débit, faible taux d'erreur binaire et grande capacité. Le système proposé est évalué dans des environnements sous-marins sans visibilité directe (NLOS : non line of sight), car il s'agit d'une approche plus réaliste pour la conception de systèmes pratiques. En effet, les liaisons LOS (ligne of sight) ne sont pas toujours possibles en raison des obstacles causés par les créatures marines, les bulles, les grosses particules en suspension et les caractéristiques des fonds marins, en particulier dans les environnements côtiers et les eaux troubles.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente les principes fondamentaux de l'UVLC, en détaillant les composants du système, les avantages par rapport aux autres technologies de communication sous-marine, et les défis associés à son déploiement.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du canal de communication d'un système UVLC est essentielle pour comprendre les phénomènes d'atténuation et de dispersion de la lumière sous l'eau. Ce chapitre explore les modèles de propagation de la lumière, en tenant compte des facteurs tels que l'absorption, la diffusion, la turbulence océanique, et les caractéristiques spécifiques de l'environnement sous-marin.

Le troisième chapitre se concentre sur l'étude de l'effet des caractéristiques du milieu aquatique sur les performances du système NLOS UWOC proposé à l'aide d'OptiSystem, en termes de facteur de qualité (Q), de diagramme de l'œil, de taux d'erreur binaire (BER), de portée, de type d'eau, et de turbulence. Les résultats obtenus sont analysés pour identifier les paramètres influençant la performance du système et proposer des pistes d'amélioration.

Enfin, le mémoire est clôturé par une conclusion générale. Des perspectives de développement sont également envisagées.

### **Motivation**

La motivation de ce travail réside dans la nécessité d'améliorer les systèmes de communication sous-marine pour répondre aux exigences croissantes des applications modernes. Les limitations des technologies acoustiques actuelles, notamment en termes de bande passante et de résistance aux interférences, soulignent l'importance de développer des solutions alternatives. L'UVLC, en tant que technologie émergente, offre un potentiel significatif pour surmonter ces obstacles.

De plus, l'étude de l'UVLC permet d'explorer de nouveaux paradigmes de communication, en intégrant des aspects tels que la modélisation avancée des canaux optiques sous-marins, l'optimisation des techniques de modulation, et l'évaluation des performances dans des environnements complexes. Cette recherche contribue non seulement à l'avancement scientifique, mais aussi à l'innovation technologique dans le domaine des communications sous-marines.

La technologie UVLC peut être ajustée en fonction des exigences des clients pour réaliser efficacement des missions spécifiques, comme l'évaluation d'oléoducs pour le secteur pétrolier et gazier, l'exploration ainsi que les applications d'imagerie thermique dans des régions ardues et trop dangereuses pour un plongeur. Il serait aussi possible d'utiliser des véhicules autonomes spécifiques pour réaliser des missions particulières de réparation et de préservation de l'intégrité des réseaux de pipelines sous-marins, entre autres.

L'UVLC est un domaine encore en pleine maturité, et divers aspects des travaux et recherches qui y sont menés se sont concentrés sur la compréhension du canal afin de comprendre et de développer des systèmes UVLC.

### **Contribution**

L'une des contributions principales de ce travail réside dans l'utilisation de la modulation MSK-IPS dans un système de communication optique sous-marin basé sur la lumière visible (UVLC). À notre connaissance, cette modulation n'avait encore jamais été appliquée dans ce type de système, ce qui confère à notre étude un caractère original. Le choix du MSK-IPS s'est imposé à la suite d'une analyse comparative des techniques de modulation, en raison de ses avantages en termes de bande passante réduite, de spectre bien maîtrisé et de résilience aux distorsions du canal sous-marin. Ces propriétés en font une solution particulièrement adaptée aux conditions spécifiques de propagation en milieu aquatique.

Les résultats obtenus montrent que cette modulation permet d'assurer une transmission efficace tout en maintenant une bonne qualité de signal, ce qui ouvre la voie à de nouvelles perspectives pour les systèmes UVLC.

---

# **Chapitre 1**

**Les systèmes de communication sous-marine par lumière visible (UVLC)**

---

### 1.1 Introduction

Les ondes radio fréquence RF et les ondes acoustiques ont été largement utilisées dans les communications sans fils et ont jusqu'à présent répondu aux différents besoins, malgré les limitations de leurs bandes de fréquence respectives. Cependant face à la croissance exponentielle de la demande en connexion haut débit et au nombre d'utilisateurs ces dernières années, le volume de données à transmettre ne cesse d'augmenter. En conséquence, les ressources de ces technologies risquent d'être rapidement saturées. Il est donc essentiel de se tourner vers d'autres technologies à large bande, capables d'offrir des débits élevés, voire très élevés. Dans ce contexte, les communications optiques sans fil (OWC pour optical wireless communication), notamment par lumière visible (VLC pour visible light communication) représentent une alternative très prometteuse, grâce à leurs nombreux avantages : large bande passante, débits importants, faible latence.... Elles s'avèrent optimales aussi bien en milieu aquatique (sous-marin) qu'en milieu aérien. Une comparaison entre les caractéristiques de ces trois techniques de communication sans fil est donnée par le tableau 1.1.

| Caractéristiques              | OWC                                     | RF                                            | Acoustique                                                                      |
|-------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Transmission</b>           | Lumière visible                         | Ondes radio                                   | Ondes sonores, audibles ou ultrasons                                            |
| <b>Bande de fréquence</b>     | $10^{12} - 10^{14}$ Hz                  | 30 – 300 MHz                                  | 10 – 15 KHz                                                                     |
| <b>Débit</b>                  | Très élevé (<10 Gbps)                   | Modéré (<0.1 Gbps)                            | Faible (<10 Kbps)                                                               |
| <b>Vitesse</b>                | $2.255 \times 10^8$ m/s                 | $2.255 \times 10^8$ m/s                       | 1500 m/s                                                                        |
| <b>Atténuation</b>            | ~ 0,39 dB/m (océan) ~ 11 dB/m (turbide) | Fréquence et conductivité ~ (3,5 – 5) dB/m    | Dépend de la distance et de la fréquence ~ (0,1 – 4) dB/km                      |
| <b>Distance</b>               | Courte (quelques mètres)                | Elevées                                       | Longue (centaine de mètres)                                                     |
| <b>Coût</b>                   | Faible                                  | Coûteux et encombrant                         | Les dispositifs émetteur-récepteur sont Coûteux, encombrants et très puissants. |
| <b>Consommation d'énergie</b> | Faible (Tx. Power $\approx 10$ W)       | Consomme beaucoup (Tx. power $\approx 100$ W) | Consomme beaucoup (Tx. power $\approx 10$ W)                                    |
| <b>Latence</b>                | Faible                                  | Modérée                                       | Elevée                                                                          |

Tableau 1.1 : Comparaison entre VLC, RF et Acoustique [4-8].

Dans ce chapitre, nous abordons d'abord les notions fondamentales de la communication par lumière visible VLC, en expliquant son fonctionnement et ses principales applications. Ensuite, nous nous focalisons sur les spécificités d'un système VLC sous-marin (UVLC pour Underwater VLC), en détaillant son architecture, ses composants clés, ainsi que les techniques de modulation et de multiplexage employées. Nous décrivons également le fonctionnement de ces techniques, tout en mettant en lumière les travaux de recherche et les avancées significatives réalisés dans ce domaine.

### 1.2 Communication par lumière visible (VLC)

Dans le monde en pleine expansion des communications optiques sans fil (OWC) qui sont une technologie utilisant le spectre lumineux (UV, spectre visible, IR) du spectre électromagnétique pour transmettre des données, la communication par lumière visible (VLC) se démarque comme une option captivante en raison des restrictions sur le spectre des radiofréquences (RF) existant, qui limite sa capacité à atteindre les vitesses de données désirées.

Cette technologie qui utilise particulièrement la lumière visible (380-780 nm) permet des communications efficaces et à haut débit. Elle ne se contente pas uniquement de fournir des services de communication, mais elle fonctionne aussi comme source d'éclairage, ce qui en fait une solution économique, à grande vitesse, peu consommatrice d'énergie, non nocive pour les yeux et optimale pour les espaces intérieurs où l'éclairage est permanent [9].

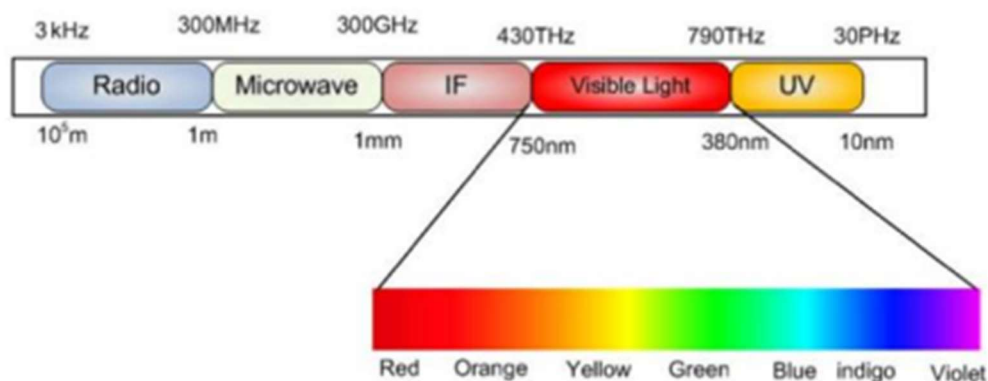


Figure 1.1 : Spectre de fréquence VLC [5].

#### 1.2.1 Evolution/Historique

Dans les temps anciens, la lumière était utilisée pour communiquer des messages via des techniques comme le feu et la fumée. Les Romains employaient des plaques métalliques lisses et réfléchissantes pour émettre des signaux sur de longues distances.

Vers les années 1800 l'armée américaine a mis au point l'héliographe, un dispositif de télécommunication sans fil utilisant la lumière du soleil et fonctionnait grâce à des éclats de lumière codés en Morse par réflexion sur un miroir. Les éclairs étaient créés soit en interrompant le faisceau à l'aide d'un obturateur, soit par un mouvement temporaire du miroir [10].

Puis en 1880 Alexander Graham Bell présenta son photophone (dispositif de transmission vocale sans fil), qui employait la lumière solaire réfléchiée modulée pour transmettre la parole sans fil. L'apparition des sources lumineuses à semi-conducteurs ont permis aux chercheurs, tels que ceux des laboratoires Nakagawa de l'université Keio au début du 21<sup>e</sup> siècle, de prouver que ces sources lumineuses à semi-conducteurs pourraient être employées pour des applications secondaires comme la transmission de données et la localisation [11].

L'emploi de la technologie LED pour le transfert de données sans fil est appelé communication par lumière visible (VLC) et son utilisation pour le réseautage sans fil, désignée sous le nom de LiFi a été présentée pour la première fois en 2011.

Des progrès notables ont été accomplis dans ce domaine. Les vitesses de transmission des données ont connu une croissance exponentielle, passant de 10 Mbps en 2006 à 10 Gbps en 2016. De plus, en 2011, l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) a publié la première norme dédiée aux applications VLC à courte portée [12].

### **1.2.2 Fonctionnement de la VLC**

La communication par la lumière visible (VLC) utilise l'infrastructure d'éclairage à diodes électroluminescentes (LED) déjà en place. Grâce à la capacité des LED à agir comme sources de lumière et émetteurs de données, la VLC supprime la nécessité d'une infrastructure de communication distincte [13].

La LED est alimentée par un signal modulé ajouté à une tension continue, faisant de ce dernier l'émetteur. La LED émet de la lumière tout en transmettant simultanément des informations par le biais du canal. Le récepteur est composé d'un photo-détecteur (PD) et d'un démodulateur. La lumière est détectée par le photo-détecteur qui génère un signal électrique contenant à la fois le message et le bruit. On utilise principalement deux sortes de photo-détecteurs : la photodiode et le phototransistor.

Dans les systèmes VLC, l'émetteur combine la source de données, le module de modulation et la LED en une seule unité. Un émetteur VLC nécessite absolument ces deux derniers composants. Les systèmes VLC utilisent deux sortes de LED : la LED monochrome et la LED multicolore dans lequel sont regroupées plusieurs LED monochromes. La LED multicolore la plus

utilisée est la LED RGB (rouge-vert-bleu). Dans les dispositifs à multi-porteuses, chaque LED de couleur intégrée au boîtier symbolise une antenne associée à une fréquence spécifique. Le nombre de canaux est identique au nombre de LED dans le système. Ainsi, un certain nombre de couleurs de LED correspondra à une quantité identique de canaux distincts. C'est pourquoi, le dispositif LED RVB est perçu comme un émetteur multicanal dédié facilitant l'application de méthodes de modulation multi-porteuses. Par exemple, en utilisant une LED RVB unique, on peut appliquer une méthode d'entrées et de sorties multiples trois par trois sur le canal VLC [14].

### 1.2.3 Applications

La VLC est une technologie polyvalente avec une multitude d'application dans plusieurs domaines. Parmi ces applications on a :

#### 1.2.3.1. LiFi (Light Fidelity)

Le LiFi est un système de communication basé sur la technologie des ondes nm, utilisant la VLC pour fournir un réseau sans fil permettant une interaction bidirectionnelle avec plusieurs utilisateurs et une connexion point à multipoint. LiFi présente de nombreux avantages en comparaison avec les réseaux RF. De plus, il est capable de fournir des services Internet à haut débit via des diodes électroluminescentes (DEL) pouvant atteindre jusqu'à 10 Gbit/s. Et grâce à la VLC il pourrait être employé avec efficacité dans les milieux où la transmission RF peut s'avérer risquée, tels que les cabines d'avions et hôpitaux [15].

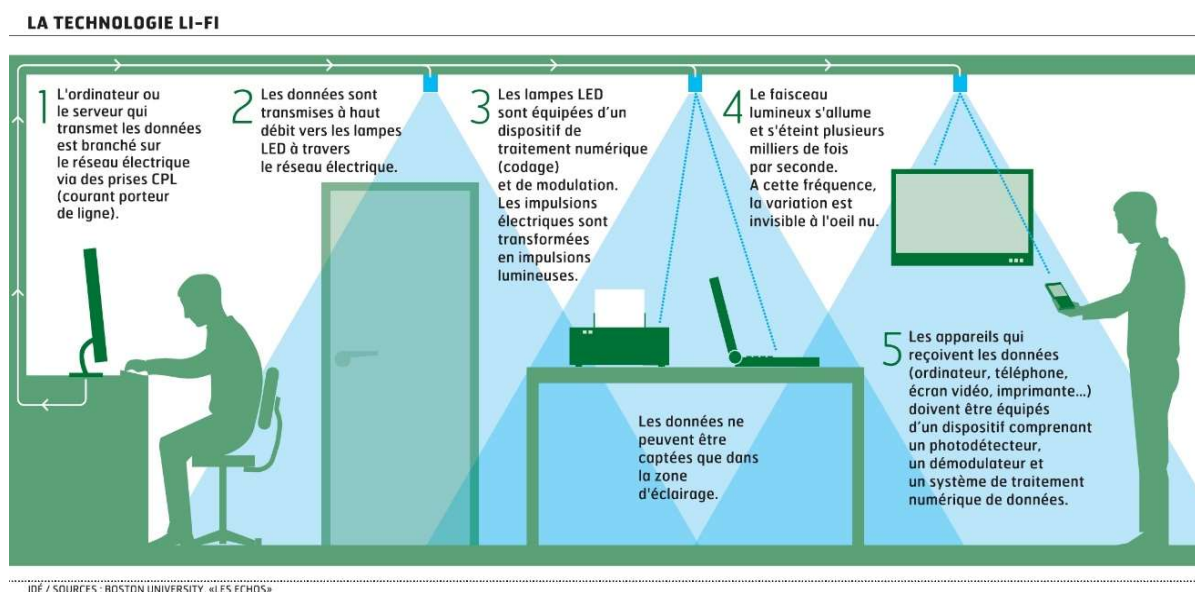


Figure 1.2 : Technologie LiFi [16].

### 1.2.3.2. Communications intérieures (Indoor Positioning)

La VLC est utilisée comme alternative au GPS pour la localisation intérieure dans les endroits tels que : les aéroports, les centres commerciaux, les métros, les hôpitaux, les musées etc...

L'imprécision des systèmes de positionnement intérieur RF est principalement due à l'atténuation causée par les trajets multiples et la pénétration du signal. La grande précision, le fonctionnement sans besoin de licence, l'absence d'interférence électromagnétique et son coût relativement bas, entre autres, ont suscité un grand intérêt pour le positionnement par LED [17].

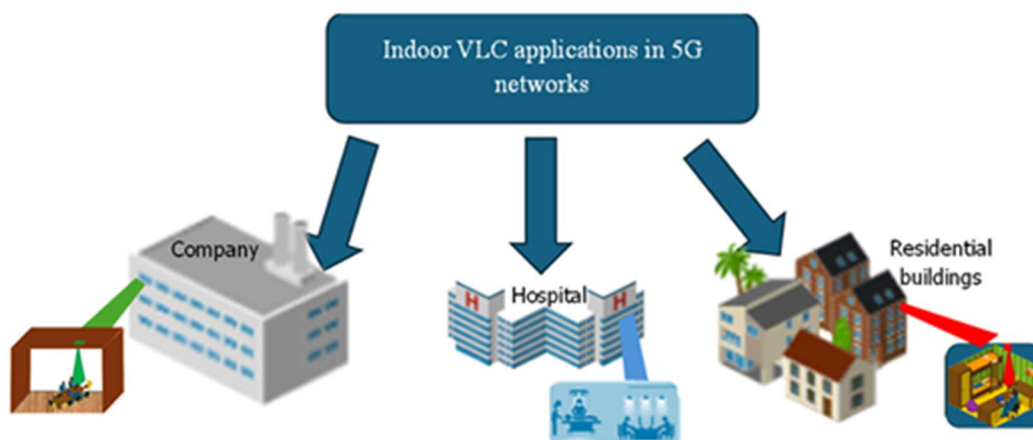


Figure 1.3 : Applications VLC en communication intérieur [9].

### 1.2.3.3. Véhicules intelligents et transports

La VLC peut être utilisé pour la communication véhiculaire en raison de la présence des feux du véhicule et de l'infrastructure de feux de circulation existants. Le projet de communication pour la sécurité des véhicules mentionne que les demandes jugées d'une importance capitale incluent l'avertissement de collision avant coopérative, la détection de pré collision, les feux de freinage électroniques d'urgence, l'avertissement de changement de voie, l'assistant de mouvement de Panneau d'arrêt, aide au virage à gauche, alerte en cas de franchissement de feu rouge et l'avertissement de vitesse dans les courbes.

Une accessibilité fiable et une latence minimisée sont indispensables pour toutes ces applications de haute priorité. Du fait de la faible latence autorisée dans la communication sécurisée du véhicule, on peut utiliser à un système de communication par lumière visible à grande vitesse (Figure 1. 3) [5].

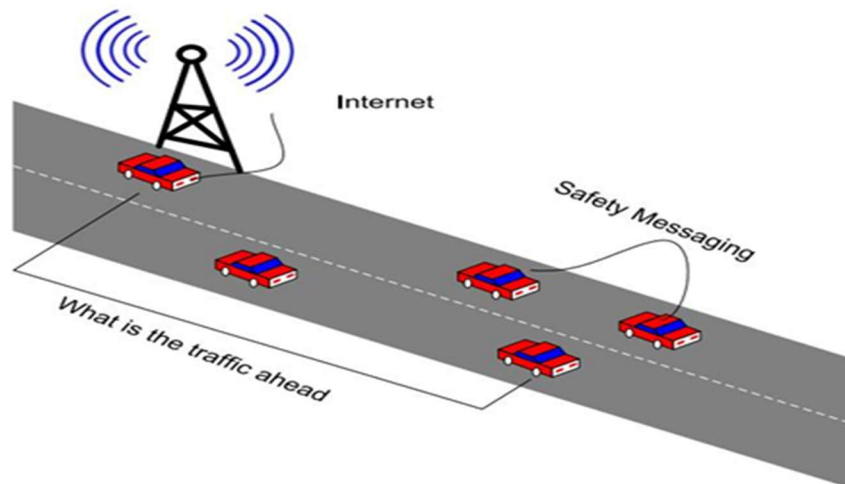


Figure 1.4 : VLC pour les réseaux véhiculaires [10].

### 1.2.3.4. Panneaux publicitaires

Les panneaux sont équipés de LED modulées émettant des variations d'intensité lumineuse pouvant être captées par des capteurs optiques tels que les caméras de téléphones pour transmettre des données via lumière. Ainsi en orientant leur smartphone vers le panneau publicitaire les utilisateurs peuvent recevoir les données (annonces, coupons de réduction, etc...) qu'il transmet.

### 1.2.3.5. Communications sous-marines

La communication par lumière visible (VLC) et notamment les systèmes UVLC (Underwater Visible Light Communication) offrent une solution prometteuse pour la transmission de données à haut débit dans des environnements aquatiques, se positionnant comme une alternative aux communications acoustiques. Ces systèmes permettent une communication haut débit, rapide et sécurisée dans cet environnement.

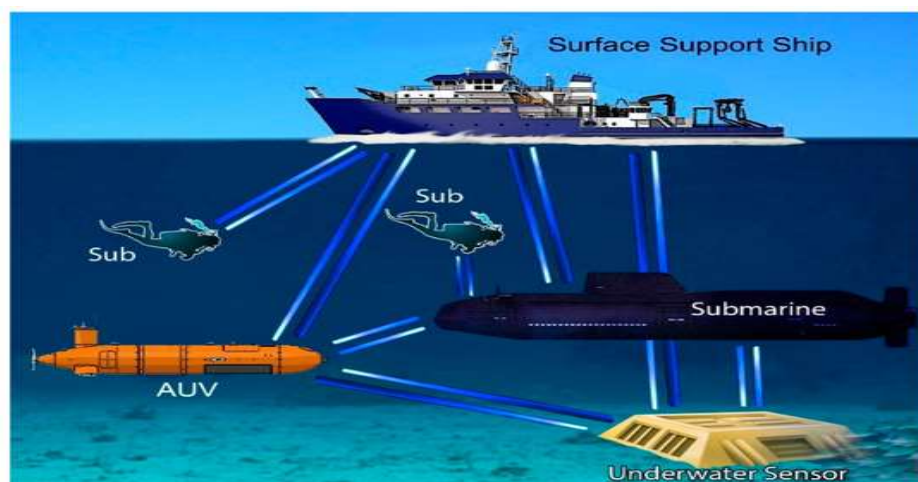


Figure 1.5: VLC pour les systèmes de communication sous-marine

### 1.2.3.6. Systèmes de communication sous-marine UVLC

Les systèmes de communication sous-marine (Underwater VLC) UVLC, avec ses performances exceptionnelles, est devenu un domaine d'étude fascinant pour de nombreux chercheurs, grâce à l'intérêt croissant pour des domaines tels que l'exploration marine, la biologie des océans, l'océanographie, la défense et les télécommunications. Toutefois, l'environnement sous-marin est complexe et confronté à des enjeux tels que : l'absorption, la dispersion, la turbidité de l'eau, le désalignement, et l'existence d'espèces marines.

### 1.2.4 Architecture et technologie associées

L'architecture d'un système de communication optique sans fil sous-marin est présentée dans la Figure 1.6. Ce système se compose de trois éléments clés : l'émetteur optique, le canal de transmission et le récepteur. Dans ce contexte, la sélection de chaque élément est cruciale car ils influencent considérablement le système de transmission.

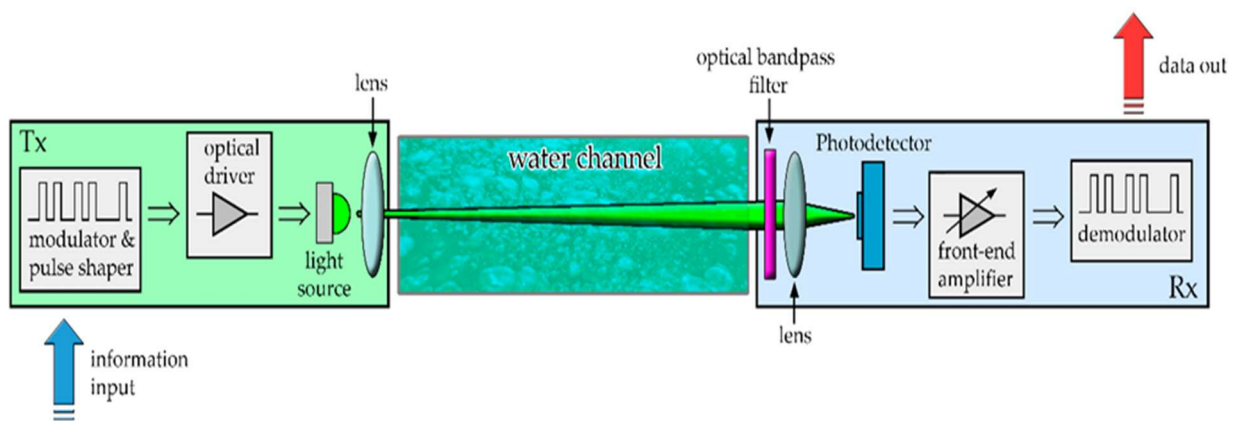


Figure 1.6 : Schéma fonctionnel d'un système UVLC [18].

#### 1.2.4.1 Emetteur optique

L'émetteur comprend quatre éléments essentiels : un modulateur, un dispositif de commande transformant le signal électrique en signal optique pour la transmission, ainsi qu'une lentille pour mettre en place la connexion optique, comme démontré à la Figure 1.6.

Le rôle de la source optique consiste à convertir un signal électrique d'entrée en un signal optique correspondant. Dans les dispositifs optiques, on distingue deux formes de sources lumineuses : les diodes électroluminescentes (LED : Light Emitting Diode) et les diodes lasers (LD : Laser Diode) [18, 19].

### **a. Diodes lasers (LD)**

Les diodes laser (DL) représentent une technologie plus moderne dérivée des techniques fondamentales de production des LED. Les systèmes laser sont adaptés aux environnements opérant dans des eaux profondes et claires. L'emploi de lasers répond aux besoins des communications en milieu marin, grâce à leur portée étendue, leur puissance considérable, leur efficacité supérieure, leurs vitesses de transmission élevées et leurs latences minimales. Les turbulences et la diffusion sous-marine compromettent rapidement la qualité élevée du faisceau laser cohérent. Le système UOWC qui utilise la technologie laser est capable d'établir une liaison à une distance de 100 m en milieu aquatique clair et de 30 à 50 m dans l'eau trouble.

La LD propose une puissance de sortie élevée, des propriétés de collimation optimisées, une bande spectrale plus restreinte ainsi que des vitesses de commutation nettement supérieures aux LED. Toutefois, cela implique un coût supérieur, une longévité réduite et une sensibilité thermique diminuée. De ce fait, les LD conviennent mieux à une utilisation dans des applications UOWC à grande vitesse qui imposent des règles d'alignement rigoureuses. En outre, grâce à leur bande passante étendue ( $> 1$  GHz), ils peuvent gérer des débits de données élevés, contrairement aux LED qui ont une bande passante inférieure à 200 MHz [20][21].

### **b. Diodes électroluminescentes (LEDs)**

Le terme couramment utilisé, LED, fait référence à un matériau semi-conducteur dopé avec des impuretés pour former une jonction P-N. Tout comme pour les diodes traditionnelles, le courant passe aisément par le côté N, ou cathode, mais il est impossible qu'il s'oriente dans l'autre sens [25]. Pour les systèmes de bouées opérant en eaux peu profondes, on privilégie généralement l'utilisation de LED bleu-vert. Dans la zone bleu-vert, la puissance de sortie d'un laser ou d'une diode électroluminescente peut aller de 10 mW à 10 W.

Les dispositifs à LED présentent une plus grande résistance aux effets sous-marins comparativement aux lasers, en raison de leurs larges angles de vision. On évalue les performances des systèmes LED en se basant sur des effets géométriques tels que la divergence du faisceau lumineux, l'angle de vision du récepteur et l'étendue dynamique [21].

Les LED sont simples, bon marché, plus fiables, moins dépendant de la température et moins sensible aux effets sous-marins en raison de leurs grands angles de vision ; Cependant, leur portée de liaison est très limitée en raison de leur couverture omnidirectionnelle et leur faisceau optique incohérent [4]. On peut accroître la portée de communication soit en employant une LED

performante (fonctionnant en watts), soit en adaptant la dispersion dans toutes les directions avec un système directionnel grâce à la focalisation optique [21].

Une comparaison entre les caractéristiques de ces deux émetteurs optiques est donnée par le tableau 1.2.

| Caractéristiques                                           | LED                                       | DL                                        |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Longueur d'onde de fonctionnement                          | 450-570 nm (bleu-vert)                    | 450-570 nm (bleu-vert)                    |
| Bande passante de modulation                               | Des dizaines de KHz à des dizaines de MHz | Des dizaines de KHz à des dizaines de GHz |
| Intensité de puissance de sortie (puissance optique reçue) | Faible                                    | Elevée                                    |
| Divergence des faisceaux                                   | Etalement                                 | Etroit                                    |
| Portée                                                     | Courte                                    | Longue                                    |
| Durée de vie                                               | Longue                                    | Moyenne                                   |
| Sécurité oculaire                                          | Considéré comme sûr pour les yeux         | Doit être sécurisé pour les yeux          |
| Fiabilité                                                  | Elevée                                    | Modérée                                   |
| Coût                                                       | Faible                                    | Modéré à élevé                            |
| Dépendance à la température                                | Moins dépendant                           | Fortement dépendante à la température     |

**Tableau 1.1** : Comparaison des LED et des DL pour les liaisons sans fil [20, 21].

### 1.2.4.2 Canal de transmission

D'après [23], on constate que l'eau présente une transparence avec le spectre de lumière bleu-vert plutôt qu'avec d'autres longueurs d'onde du spectre lumineux. En outre, l'eau de mer présente une atténuation réduite pour la lumière bleue, tandis que la lumière verte est atténuée par les eaux côtières. L'affaiblissement du signal optique est déterminé par les propriétés optiques inhérentes (POI) et les propriétés optiques apparentes (POA) de l'environnement aquatique. En outre, les propriétés physico-chimiques du canal aquatique contribuent à l'atténuation résultant de

l'absorption, de la dispersion optique et de la réflexion dues à la turbidité, à la pression, à la température et aux particules en suspension présentes dans le milieu aquatique.

### **1.2.4.3 Récepteur**

Le rôle d'un récepteur optique consiste à convertir le signal optique en un format électrique et à recueillir les informations véhiculées par le système de lumières [19].

Les dispositifs de collecte de signaux optiques transmis dans un milieu sont appelés des récepteurs optiques. Autrement dit, les récepteurs se caractérisent par le processus d'assimilation des signaux optiques par le photodétecteur et la détection des photons à sa surface afin de produire un signal électrique. L'effet photoélectrique est le procédé par lequel l'énergie des photons est transformée en signal électrique. En d'autres termes, les photons qui atteignent les diodes semi-conductrices provoquent la libération soit d'un électron, soit d'un trou. Une lentille collecte les éléments optiques propagés pour leur détection et démodulation du côté récepteur [23].

Les caractéristiques clés du récepteur incluent un large champ de vision, un gain important, une réponse rapide, un coût modeste, une dimension réduite, une fiabilité élevée, une sensibilité et une réactivité accrues à la longueur d'onde opérationnelle, ainsi qu'un rapport signal/bruit supérieur. Les dispositifs OWC les plus performants emploient une **photodiode PIN** ou une **photodiode à avalanche (APD)** en tant que récepteur [21].

#### **a. Photodiode PIN**

On utilise souvent les récepteurs PIN grâce à leur prix abordable, leur capacité à atténuer les importantes variations de température et leur aptitude à fonctionner avec une alimentation basse tension économique. Toutefois, les récepteurs PIN présentent une sensibilité inférieure par rapport aux récepteurs APD. On peut diminuer la sensibilité de ces capteurs en accroissant la puissance transmise et en optant pour une lentille réceptrice de plus grand diamètre [20].

#### **b. Photodiode à avalanche (APD)**

Dans le cas des APD, la marge de puissance accrue assure une liaison de communication plus robuste que celle des récepteurs PIN. Cela permet de réduire davantage la puissance de l'émetteur et d'augmenter le rapport signal/bruit (SNR) grâce au gain interne des APD. Cependant, les récepteurs APD sont coûteux et nécessitent des tensions de fonctionnement élevées, ce qui limite leur utilisation pratique [20]. Les photodiodes APD se distinguent par leur gain interne élevé et leur rendement quantique exceptionnel (70 à 90 %). La distinction majeure entre ces deux

appareils se trouve dans leur rendement en termes de bruit. Dans les photodiodes PIN, le bruit thermique est la forme de bruit la plus fréquemment rencontrée [21].

### **1.2.5 Techniques de modulation dans l'UVLC**

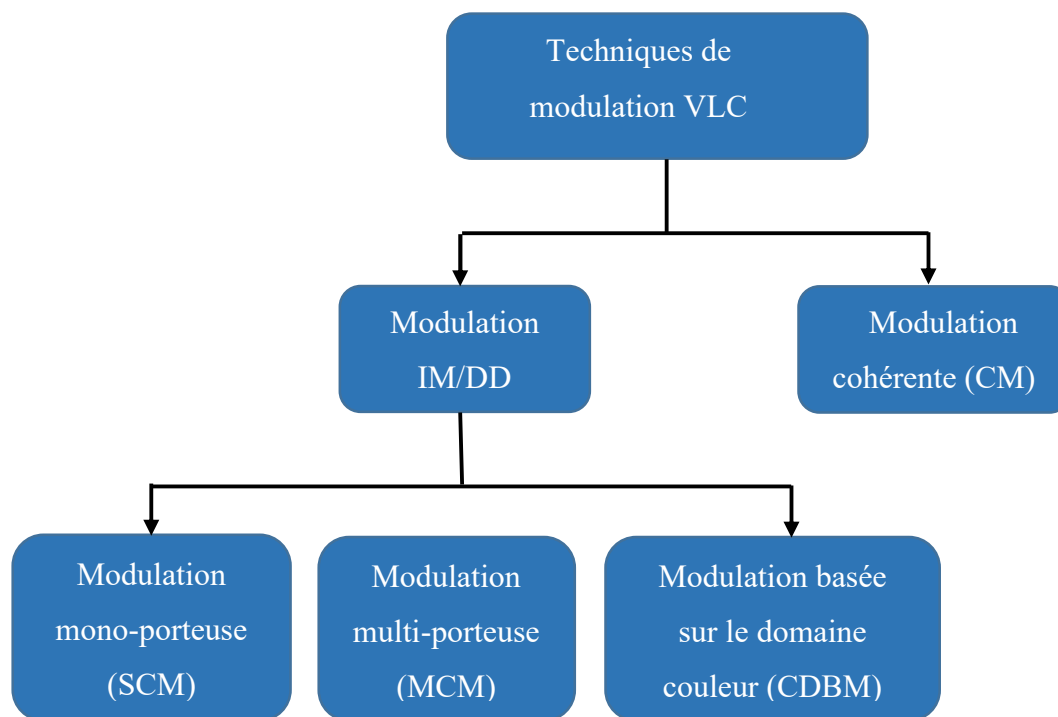
Il est possible de moduler le signal en fonction de la fréquence, de la phase ou de l'amplitude. Sélectionner la modulation la plus appropriée peut renforcer la fiabilité du dispositif et maximiser le débit de données. Dans l'élaboration d'un système de communication, la sélection de la méthode de modulation figure parmi les choix les plus cruciaux. La modulation directe et la modulation par un modulateur externe représentent deux techniques appropriées pour réaliser la modulation.

Habituellement, les méthodes de modulation VLC sont mises en œuvre selon un modèle qui repose sur la modulation cohérente (CM) et la modulation IM/DD, cette dernière étant aussi catégorisée en modulation à porteuse unique (SCM), modulation multi-porteuse (MCM) et modulation reposant sur le domaine couleur (CDBM). Dans la majorité des recherches, la détection directe par modulation d'intensité (IM/DD) est employée dans l'UVLC, où la modulation s'effectue principalement en modifiant l'intensité de la sortie.

Le modèle IM/DD est largement reconnu et simple à mettre en place, et représente une méthode de diffusion du signal à moindres coûts. Dans ce modèle, les signaux doivent être transmis directement par la source ou à travers un modulateur externe. Du point de vue du récepteur, l'information contenue dans le signal est extraite par détection directe ; c'est pour cette raison que l'ensemble du dispositif est désigné comme modulation d'intensité et détection directe.

Il convient de souligner que les schémas de modulation IM/DD ne sont pas idéaux pour les applications nécessitant un haut débit. C'est pourquoi le modulateur Mach-Zehnder (MZM), qui sert à moduler l'intensité des ondes optiques continues, représente une option alternative largement employée pour la diffusion des faisceaux laser.

Le modèle cohérent exploite des signaux de phase et d'amplitude pour moduler les informations associées. Le schéma de modulation cohérente assure une haute efficacité spectrale et une forte résistance au bruit de fond, cependant, il présente une complexité accrue en matière de canal. Même si le modèle CM présente plus de bénéfices que les systèmes IM/DD en ce qui concerne l'efficacité de détection et la diminution du bruit ambiant, il propose une sensibilité accrue du récepteur, un coût réduit et une mise en place plus complexe [7][23].



**Figure 1.7 :** Techniques de modulation de l’UVLC [23].

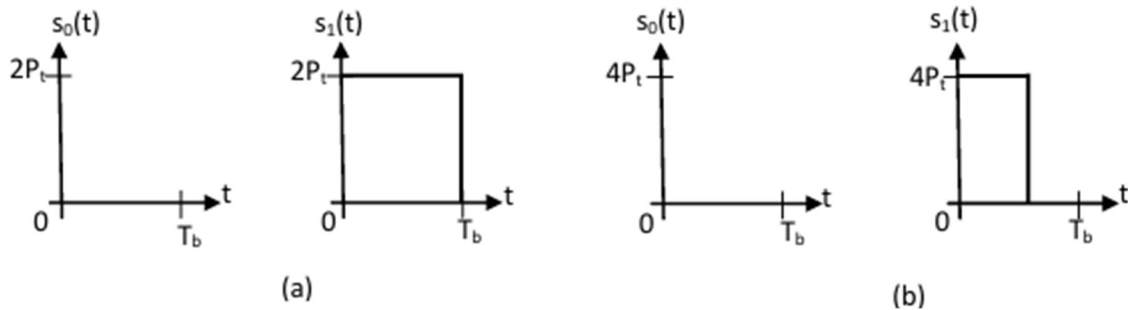
#### **1.2.5.1 Modulation mono-porteuse (SCM : Single Carrier Modulation)**

La SCM exploite une fréquence porteuse unique pour véhiculer toutes les informations, maximisant ainsi l'utilisation de la bande passante existante pour diffuser le signal. Pour généralement élaborer des modèles de systèmes traditionnels, on utilise fréquemment les schémas de modulation par porteuse unique du signal (SCM). Dans le domaine de la SCM-IM/DD, diverses méthodes de modulation sont analysées, comme l'OOK, la PAM, et la modulation de position d'impulsion (PPM), entre autres [7][23].

##### **a. Modulation OOK (On-Off Keying)**

Le schéma OOK régle un processus courant de modulation du signal optique par la lumière et son intensité. L'activation et la désactivation de l'éclairage des LED se font en fonction du signal binaire, représenté par les chiffres « 0 » et « 1 ». En position OFF, la LED n'est pas totalement éteinte, mais sa luminosité est diminuée. Le format OOK se subdivise en deux variantes : la variante à impulsion avec retour à zéro (RZ) et la variante sans retour à zéro (NRZ). En général, le format NRZ contient les bits numériques « 1 », tandis que le format RZ utilise les portions restantes des bits symbolisées par « 0 » [23, 24]. La durée de l'impulsion optique peut varier en

fonction du rapport cyclique ( $\gamma$ ), qui représente le quotient entre la durée de l'impulsion et la durée du bit (symbole). Le OOK-NRZ (non-retour-à-zéro) possède un rapport cyclique d'un, tandis que le schéma RZ (retour à zéro) a un rapport cyclique  $\gamma$  inférieur à 1 [22].

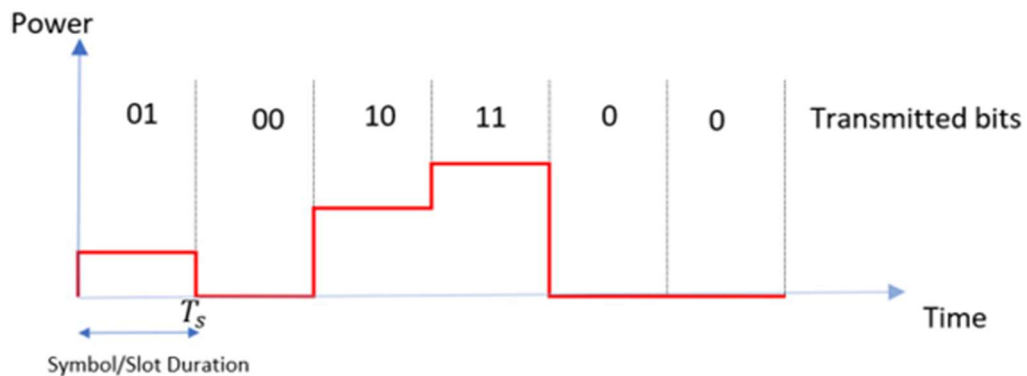


**Figure 1.8 :** (a) OOK-NRZ et (b) OOK-RZ avec  $\gamma = 0,5$  [22].

### b. Modulation PAM (Pulse Amplitude Modulation)

La modulation d'amplitude par impulsion (PAM) présente une plus grande tolérance face aux effets du canal à multi-trajets. Le processus de modulation PAM consiste à encoder le message en fonction de l'amplitude de l'impulsion optique.

La modulation PAM est une méthode de modulation où l'amplitude du signal varie proportionnellement à celui du signal analogique, tandis que la largeur et la localisation de l'impulsion demeurent constantes. Le PAM module les symboles en  $M$  niveaux d'intensité. OOK est un modèle PAM où  $M = 2$  [7][23][25].



**Figure 1.9 :** Modulation PAM [7].

### c. Modulation PPM (Pulse position modulation) :

On utilise diverses techniques de modulation d'impulsions dans le cadre de l'UVLC. Dans la modulation par impulsions (PPM), les informations sont modulées en modifiant la position des impulsions transmises sur une période définie. Chaque impulsion correspond à une valeur

numérique ou à un symbole précis. L'emplacement de l'impulsion dans l'intervalle de temps est employé pour transmettre les données numériques. Par exemple, dans un PPM à quatre niveaux, la synchronisation de l'impulsion peut être déplacée vers quatre emplacements distincts dans la période pour symboliser quatre signaux différents [7].

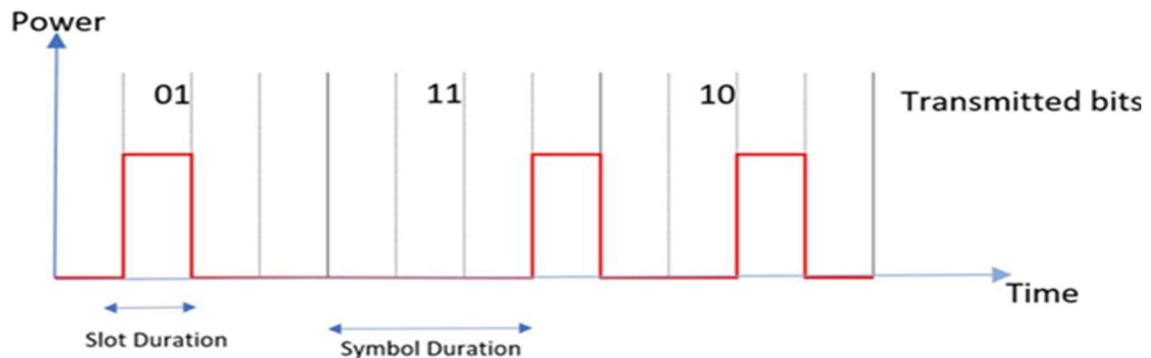


Figure 1.10 : Modulation PPM avec  $M = 4$  [7].

### 1.2.5.2 Modulation multi-porteuse (MCM : Multi-Carrier Modulation)

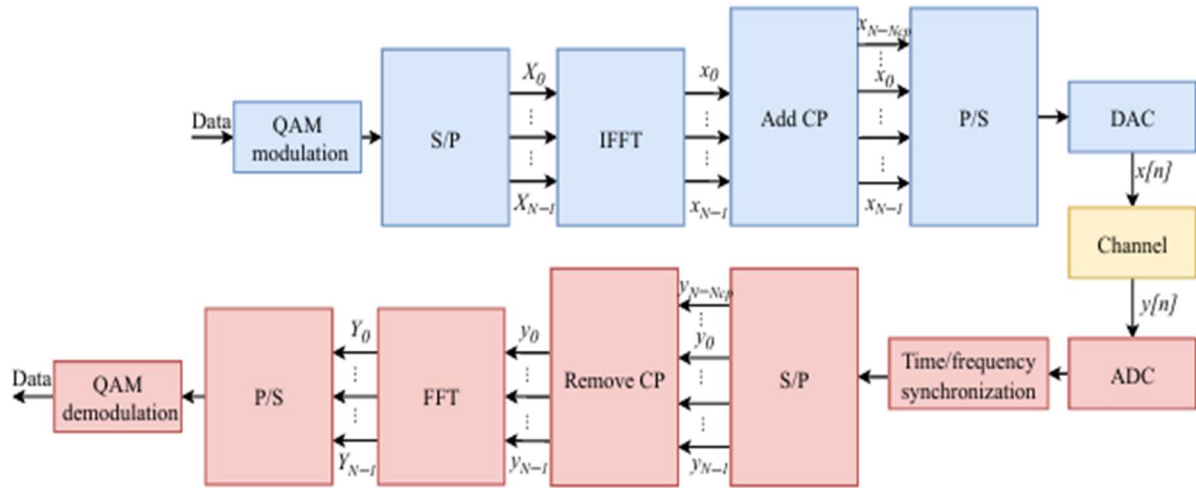
En ce qui concerne la MCM, il s'agit d'une méthode de modulation où les données sont découpées et diffusées simultanément sur plusieurs fréquences porteuses. L'OFDM est une méthode MCM courante qui segmente la bande passante disponible en divers sous-canaux. Chaque sous-canal transporte une portion des informations, et ces sous-canaux sont élaborés pour être orthogonaux entre eux afin de prévenir les interférences. Tout comme l'OFDM, le MCM présente le bénéfice d'exploiter de manière efficace la bande passante disponible en la segmentant en sous-canaux plus réduits. Cela offre des débits de données plus importants et une efficacité spectrale (SE) optimisée comparée au SCM [7].

#### a. Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM : Orthogonal frequency division multiplexing) :

Le flux numérique à haut débit est décomposé en flux parallèles du côté de l'émetteur par le biais d'une conversion série-parallèle (S/P). Le système de modulation (QAM, PSK, QPSK, DPSK, etc.) lie chaque flux à un flux symbolique. Pour effectuer la transition du domaine fréquentiel au domaine temporel pour le signal OFDM, les symboles sont modulés à l'aide de l'IFFT sur la sous-porteuse. Suite à l'IFFT, pour prévenir la superposition des porteuses de sous-bandes, un préfixe cyclique est ajouté. Par la suite, le signal OFDM est transformé en signal analogique grâce à un convertisseur numérique-analogique. Puis, suite à une conversion de type parallèle-série (P/S), le signal est transmis par le biais d'un oscillateur local sur le canal.

Du côté récepteur, le signal capté est transformé en format numérique de manière parallèle grâce à un convertisseur analogique-numérique en vue d'éliminer le préfixe cyclique. Le signal est par la suite démodulé à l'aide de la FFT et démodulé en fonction des décisions relatives aux symboles de données QAM, PSK ou DPSK. Les données sont transformées en série afin d'obtenir les données initiales [19].

Un signal OFDM se compose d'un groupe de sous-porteuses orthogonales de type sinusoïdal dans le domaine des fréquences, avec un espacement minimal entre les sous-porteuses de  $1/T_s$ ,  $T_s$  représentant la période du symbole de la sous-porteuse. Pour commencer, le signal de données complexe, noté  $X = [X_0 X_1 X_2 \dots X_{N-1}]$ , est produit sous une longueur  $N$ , où  $N$  correspond à la dimension de la transformée inverse rapide de Fourier (IFFT) et  $X_k$  représente un nombre complexe lié à un point spécifique du diagramme de constellation QAM. Il est important de noter qu'au sein d'un symbole OFDM, chaque  $X_k$  correspond aux informations à transmettre sur la  $k$ -ième sous-porteuse.



**Figure 1.11** : Schéma de multiplexage OFDM [26].

Voici comment on procède au calcul de la transformée de Fourier discrète inverse (IDFT) [26]:

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right), \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (1.1)$$

Suite à la transmission par le biais du canal sans fil, on élimine le CP et on réalise une transformation de Fourier discrète (TFD). Ainsi, le signal fréquentiel reçu est illustré de la manière suivante [26]:

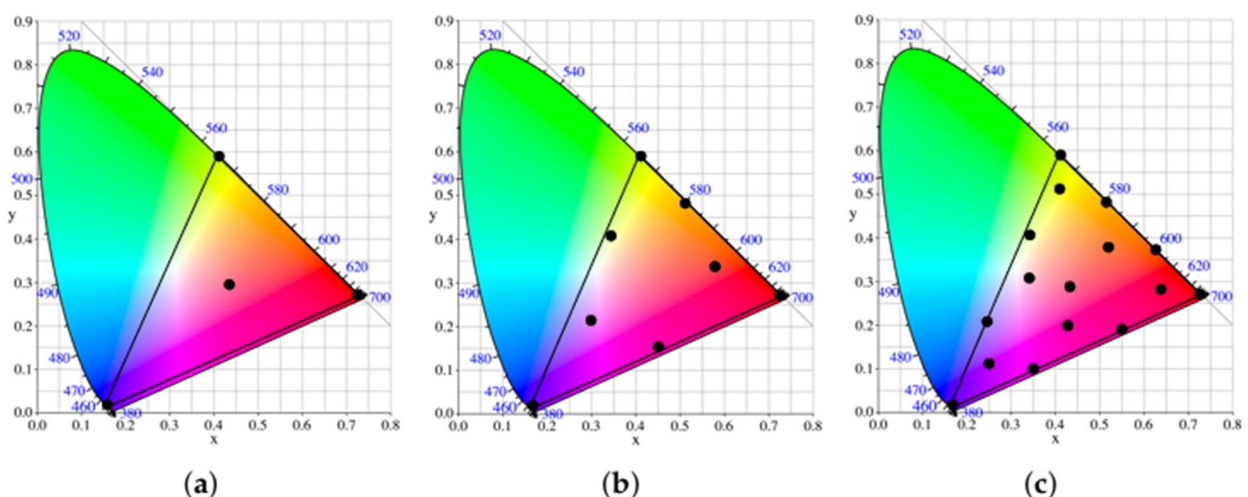
$$Y_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} y[n] \exp\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right), \quad 0 \leq k \leq N-1, \quad (1.2)$$

Où  $Y = [Y_0 Y_1 Y_2 \dots Y_{N-1}]$  est le signal fréquentiel reçu et  $y[n]$  est le signal temporel reçu.

### b. Modulation basée sur le couleur (CDBM : Color Domain-Based Modulation/CSK : Color Shift Keying)

La technologie LED multicolore s'appuie sur la modulation par déplacement de couleur (CSK), avec l'application du faisceau VLC en utilisant les modèles de modulation 4-CSK, 8-CSK et 16-CSK. CSK est un modèle de modulation de communication qui associe des symboles à des couleurs. Dans CSK, des LED RVB sont employées pour relier le message au canal. La couleur associée à un symbole est générée en mélangeant les trois lumières diffusées par les trois LED intégrées dans l'enceinte. Le récepteur CSK est un dispositif de détection de couleur. Ce dernier est constitué de divers capteurs réactifs à des longueurs d'onde particulières et traduites la chromaticité et l'intensité lumineuse en signaux [23][27].

Les informations sont envoyées par le biais de changements de couleur produits par des émetteurs VLC RVB. Le système CSK se sert de l'espace colorimétrique 1931 de la Commission Internationale de L'Éclairage (CIE), qui représente graphiquement toutes les teintes perceptibles par l'œil humain. Elle est décrite par deux coordonnées chromatiques :  $x$  et  $y$ , comme montré à la Figure 1.12. Les illustrations (a), (b) et (c) montrent un exemple de constellations 4CSK, 8CSK et 16CSK, conformément aux spécifications de la norme IEEE 802.15.7. Chaque symbole illustre une combinaison distincte des trois couleurs, produisant différentes coordonnées CIE 1931. Cette méthode produit une couleur blanche en fusionnant les trois couleurs, qui est conforme à la teinte désirée pour l'éclairage intérieur et extérieur.



**Figure 1.12 :** Constellations CSK fournies par la norme IEEE802.15.7 : (a) 4-CSK ; (b) 8-CSK ; (c) 16-CSK [26].

L'atout majeur de la modulation CSK réside dans sa capacité à gérer la gradation et à contrôler le scintillement. Tout d'abord, en modifiant simplement le courant d'alimentation de l'émetteur, on peut ajuster la luminosité de la lumière blanche produite, tout en maintenant la puissance transmise constante. Ainsi, il n'y a pas de variation d'intensité lumineuse qui pourrait engendrer des complications sanitaires potentielles, comme les nausées ou l'épilepsie. Il est à souligner que diverses méthodes utilisant quatre LED (bleue, cyan, jaune et rouge) ont commencé à faire leur apparition, distinctes des trois émetteurs employés dans la CSK traditionnelle. Ainsi, il a été possible de générer des constellations carrées qui sont identiques à la QAM [26].

### **1.2.6 Applications**

#### **1.2.6.1 L'exploration et l'exploitation des ressources marines (explorations offshore)**

L'utilisation de l'UVLC pour l'exploration pétrolière est une innovation récente qui facilite la transmission de données à haut débit entre les équipements d'exploration sous-marine (ROVs et AUVs) plongés dans les milieux offshore, utilisés pour le balayage des fonds marins, l'inspection des pipelines et la cartographie des réserves. Cependant, la turbidité de l'eau dans les champs pétrolifères peut avoir un impact sur la portée et la précision de ces technologies [28].

#### **1.2.6.2 Surveillance environnementale**

Les océans représentent des masses d'eau extrêmement complexes et non régulées, dont 95 % restent à découvrir par la science. Ainsi, la navigation sous-marine est plus compliquée que la navigation terrestre. Les UWSN sont appropriés et représentent la méthode technologique la plus adaptée pour naviguer dans de grands environnements aquatiques. La plupart des applications de suivi environnemental sous-marin sont directement associées à la surveillance des actions humaines et anthropiques dans l'écosystème océanique. L'implémentation des UWSN offre la possibilité de contrôler la pollution aquatique, les flux d'eau et l'existence humaine. Par ailleurs, on surveille le déplacement des plaques tectoniques, les orages marins, les séismes et la création de nouvelles terres à la suite d'éruptions volcaniques (la lave contribuant significativement à la formation d'une partie de l'île, etc.). L'observation et la collecte de données concernant la géométrie 3D des océans et des terrains sont facilitées par l'utilisation de nœuds flottants à diverses profondeurs. L'exploration des milieux sous-marins a toujours été une préoccupation essentielle pour l'humanité [23].

### **1.2.6.3 Sécurité des frontières et des côtes**

Les applications de sécurité aux frontières et sur les côtes ont pour principal objectif de surveiller les actions indésirables dans les régions côtières, notamment en ce qui concerne la protection des points d'entrée, des frontières terrestres et maritimes. En tenant compte de ces défis, les USWN représentent une méthode en pleine émergence pour diverses manœuvres militaires et sont employés pour la communication militaire. Ces signaux de réseau intégrés sont cruciaux pour la fourniture d'équipements militaires, comme ceux utilisés pour la surveillance, le renseignement, la localisation, le ciblage des positions et le suivi des armes nucléaires, biologiques et chimiques [23].

### **1.2.6.4 Archéologie marine**

L'archéologie sous-marine est une discipline scientifique qui se consacre à l'étude des reliques humaines retrouvées sous l'eau, comme les épaves de navires, les ports d'antan, les habitats submergés et les objets anciens immergés. L'UVLC faciliterait donc le transfert de données et d'images issues de sites archéologiques subaquatiques.

### **1.2.7 Travaux récents dans le domaine des UVLC**

De nos jours l'UVLC est un domaine de recherche très actif. Nombreux sont les travaux déjà accomplis et en cours sur ce domaine, dans cette section nous nous contenterons d'en citer juste quelques uns.

Dans [29], les auteurs ont mis en place un système de communication optique sans fil sous-marin (UOWC) en laboratoire capable de transmettre à 500 Mbps sur 100 m d'eau. L'expérience réalisée dans une cuve de 10 m de long remplie d'eau du robinet, avec des miroirs réfléchissants permettant d'allonger le chemin optique à 100 m leur ont permis d'atteindre des portées théoriques de 146 m à 500 Mbps et 174 m à 100 Mbps ; avec une diode laser de 520 nm et la modulation NRZ-OOK. Les auteurs de [30], ont fait aussi une étude tout aussi similaire en mais ont pu avoir une portée de 34.5 m avec 2.70 Gbps.

Une expérience démontrant la faisabilité d'une communication optique bidirectionnelle à haut débit à travers une interface air-eau, atteignant 5.5 Gbps sur 26 m (5 air + 21 m eau) avec des performances fiables grâce à l'utilisation d'une diode laser verte (520 nm) modulé OFDM-32QAM a été menée dans la référence [31].

Un système de communication optique marine à haute vitesse a été élaboré par les chercheurs, utilisant une diode laser bleue (450 nm) modulée directement par un signal 16-QAM OFDM.

Simulation de distance jusqu'à 10,2 mètres grâce à des miroirs. Résultats en matière d'eau douce  
Débit maximal : 12,4 Gbps sur une longueur de 1,7 mètre [32].

Les auteurs ont simulé sous OptiSystem un système de transmission hybride combinant communication optique sans fil sous-marine, fibre optique monomode (**SMF** : Single-Mode Fiber) et communication optique en espace libre (**FSO** : Free Space Optics), destiné à un réseau de capteurs sous-marins à haut débit [33]. Ils ont utilisé la modulation NRZ-OOK à un débit de  $8 \times 1 \text{ Gbit/s}$  allant jusqu'à 5 km pour différent type d'eau et de météo avec le modèle Gamma-Gamma.

En [34], les auteurs ont établi un système de communication optique sans fil sous-marine (UWOC) expérimental basé sur le multiplexage par moment angulaire orbital (**OAM** : Orbital Angular Momentum), afin d'améliorer la capacité de transmission. L'expérience a été réalisée sur une longueur de 2,96 m dans l'eau. Les données indiquant qu'une vitesse totale de 3 Gbit/s a été obtenue (1,5 Gbit/s par canal) avec un taux d'erreur binaire moyen de  $2,073 \times 10^{-4}$ , largement inférieur au seuil de correction d'erreur (**FEC**).

### **1.3 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons mis la lumière sur des aspects importants sur la communication sous-marine par lumière visible UVLC à savoir : ses avantages, ses limitations et son importance. On a abordé également l'architecture et les divers éléments liée à la technologie UVLC, tels que les émetteurs et les récepteurs, ainsi les techniques de modulations utilisées et les domaines d'application.

---

---

# **Chapitre 2**

## **Modélisation du canal UVLC**

---

---

## 2.1 Introduction

Dans un milieu sous-marin, la propagation d'un faisceau lumineux engendre des interactions entre les photons et diverses particules d'eau sous forme d'absorption ou de diffusion, provoquant ainsi l'atténuation du signal [35].

Pour élaborer des méthodes de transmission performantes pour la technologie UVLC, il est essentiel d'avoir une caractérisation et un modèle exact du canal optique. Cela nécessite de saisir les divers phénomènes physiques influençant la diffusion de la lumière dans l'eau, comme l'absorption et la diffusion. Une modélisation précise du canal optique offre la possibilité d'affiner les méthodes de transmission et d'améliorer les performances globales du système. L'élaboration de modèles pour les canaux sous-marins est une mission ardue et exigeante, du fait du caractère dynamique et incertain des milieux sous-marins [7].

Ce chapitre décrit les propriétés du canal sous-marin, ses différentes configurations et les modèles et méthodes de calcul du canal.

## 2.2 Système de transmission UVLC/UOWC

Le dispositif UOWC est généralement constitué de trois composants essentiels : l'émetteur, le canal et le récepteur. Le schéma fonctionnel du système UOWC est illustré dans la Figure 2.1.

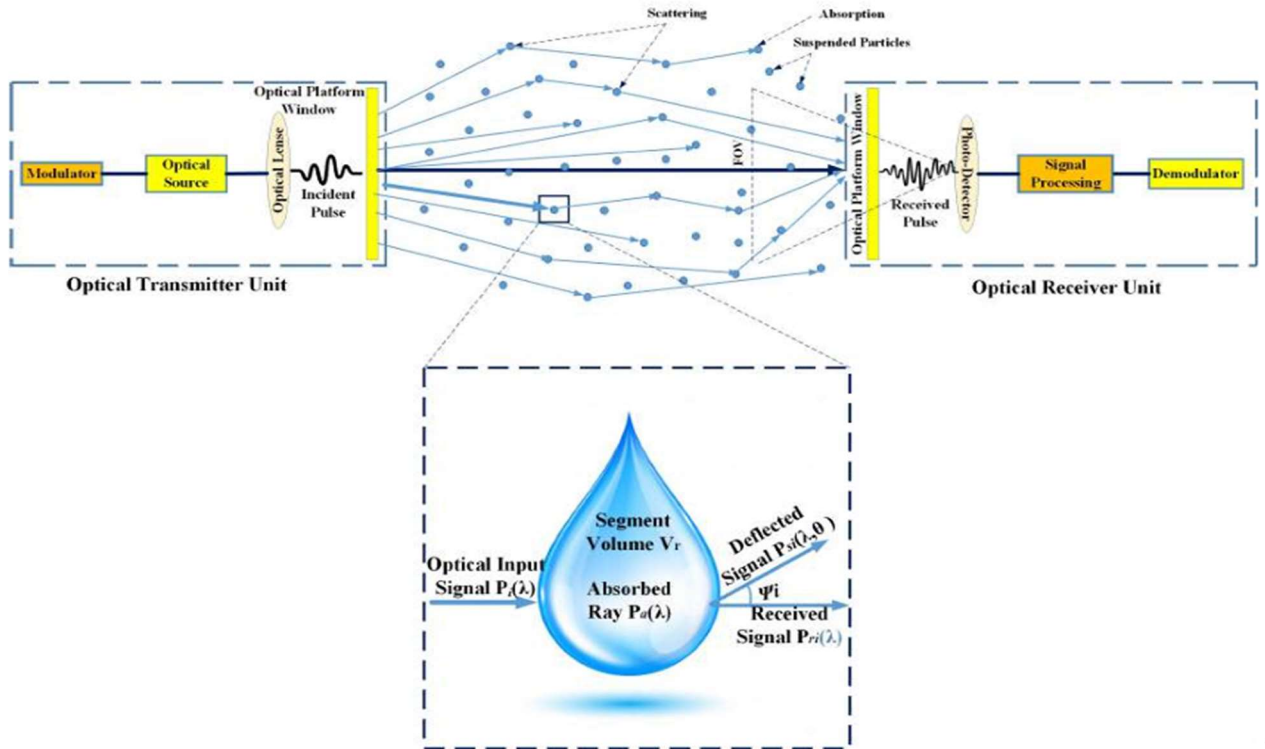


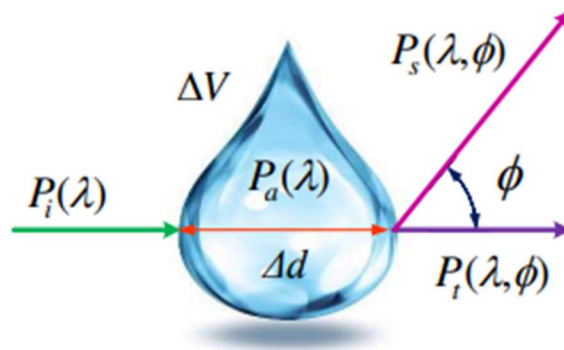
Figure 2.1 : Interaction entre particules d'eau et photons [23].

Un modulateur situé dans la section émettrice (Tx) module le signal optique. Un laser ou une LED peut servir de source lumineuse. Plusieurs éléments, tels que la turbulence optique (bulles d'air, gradient de salinité et gradient de température), la dispersion, l'absorption et le bruit ambiant, provoquent la déformation du signal dans le milieu aquatique. Le rayonnement traverse la fenêtre du récepteur suite à son atténuation. Un détecteur de lumière (Photodiode), localisé du côté récepteur, capte le faisceau optique transmis par la lentille du récepteur et le transforme en un signal électrique [21].

### 2.3 Caractéristiques de propagations des canaux de communication sous-marins

Les caractéristiques de propagation des canaux de communication sous-marins peuvent varier considérablement en fonction des lieux (types d'eau) et des profondeurs, étant donné qu'elles dépendent de la composition physico-chimique des océans [8].

On peut catégoriser ces propriétés en deux classes distinctes : les propriétés optiques inhérentes et les propriétés optiques apparentes. Les propriétés optiques inhérentes (l'absorption, la diffusion et l'atténuation) sont celles qui sont déterminées uniquement par la composition chimique du milieu et ne sont pas influencées par la géométrie de la lumière ambiante. Les deux caractéristiques optiques essentielles inhérentes sont le coefficient d'absorption et la fonction de diffusion volumique. En ce qui concerne les propriétés optiques apparentes, elles comprennent des caractéristiques qui sont influencées à la fois par le milieu et la configuration géométrique du faisceau lumineux, comme la diffusion et la collimation [1][8].



**Figure 2.2** : Modèle géométrique des propriétés optiques inhérentes [8].

#### 2.3.1 Atténuation

Deux processus principaux influent sur la propagation des photons dans les milieux sous-marins : l'absorption et la dispersion. Ces deux mécanismes sont liés à la longueur d'onde  $\lambda$  et

influencent négativement les performances des systèmes de communication sous-marins sans fil. L'absorption est un procédé de transmission d'énergie où les photons cèdent leur énergie et la transforment en d'autres formes, comme la chaleur et les substances chimiques (photosynthèse). La diffusion, pour sa part, désigne le phénomène par lequel la lumière dévie de sa trajectoire initiale, empêchant de nombreux photons d'atteindre le récepteur. Dans l'eau, des écarts peuvent survenir en raison de particules dont la taille est comparable à celle de la longueur d'onde (diffraction), ou dues aux particules ayant un indice de réfraction distinct de celui de l'eau (réfraction).

Le coefficient d'absorption  $\alpha(\lambda)$  caractérise l'absorption, représentant la quantité d'énergie absorbée à une longueur d'onde  $\lambda$  par unité de distance et par unité de puissance incidente. La fonction de diffusion volumique caractérise la diffusion  $\beta(\lambda)$ , et c'est à partir de cette dernière que l'on peut obtenir le coefficient de diffusion (Equation 2.1) [1][20][35].

Le coefficient d'extinction  $c(\lambda)$  correspondant à la perte la d'énergie totale (l'atténuation) due à l'absorption et à la diffusion est [35] :

$$c(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda) \quad (2.1)$$

Où  $\alpha(\lambda)$  et  $\beta(\lambda)$  représentent respectivement les coefficients d'absorption et de diffusion, et  $\lambda$  est la longueur d'onde de l'onde lumineuse [35].

### 2.3.1.1 L'absorption

L'absorption est le principal facteur qui diminue la puissance du signal optique en milieu aquatique, elle est quantifiée par le coefficient d'absorption spectrale ( $\alpha(\lambda)$ ), qui indique la variation de l'absorption de la lumière par mètre de distance parcourue. L'absorbance totale est une somme linéaire de l'absorption de l'eau de mer pure, de la longueur d'onde et de la concentration en chlorophylle, ainsi que des composés colorés solubles. L'absorption ( $\alpha(\lambda)$ ) est définie comme suit [19] :

$$\alpha(\lambda) = \alpha_w(\lambda) + \alpha_{cl}(\lambda) + \alpha_f(\lambda) + \alpha_h(\lambda) \quad (2.2)$$

Où  $\alpha_w(\lambda)$  représente le coefficient d'absorption de l'eau,  $\alpha_{cl}(\lambda)$  désigne le coefficient d'absorption de l'acide chlorophyllien,  $\alpha_f(\lambda)$  fait référence au coefficient d'absorption de l'acide fulvique et  $\alpha_h(\lambda)$  symbolise le coefficient d'absorption de l'acide humique ; tous ces termes variant en fonction de la longueur d'onde [19].

Le calcul des coefficients d'absorption par types d'eau  $\alpha_w(\lambda)$ , de l'acide chlorophyllien  $\alpha_{cl}(\lambda)$ , de l'acide fulvique  $\alpha_f(\lambda)$  et de l'acide humique  $\alpha_h(\lambda)$  à 532nm se fait comme suit [36] :

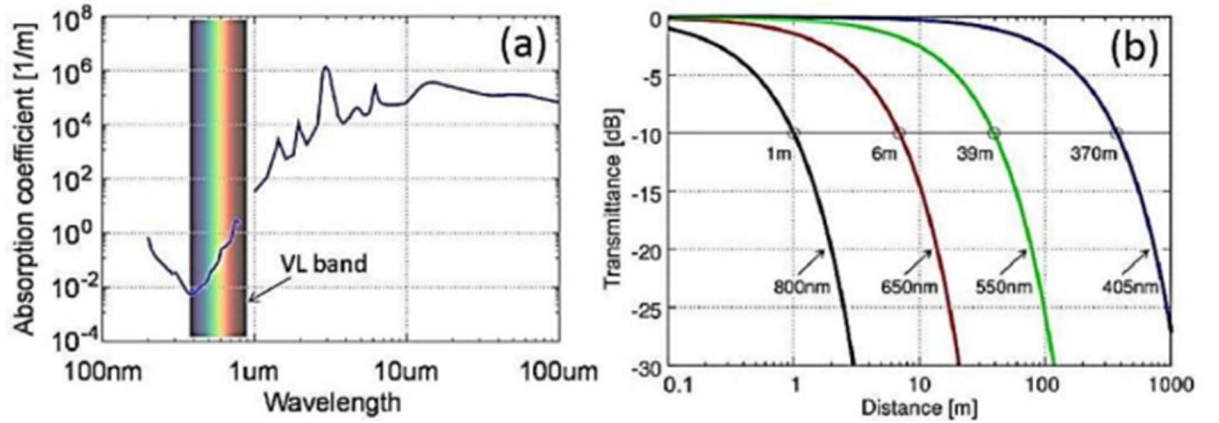
$$\alpha_w(\lambda) = 0.0445 \text{ m}^{-1} \quad (2.3)$$

$$\alpha_{cl}(\lambda) = 0.0127 \left( \frac{C_c}{C_c^0} \right)^{0.62} \quad (2.4)$$

$$\alpha_f(\lambda) = 62.604 C_c \exp\left(\frac{C_c}{C_c^0}\right) \exp(-0.0189\lambda) \quad (2.5)$$

$$\alpha_h(\lambda) = 3.6402 C_c \exp\left(\frac{C_c}{C_c^0}\right) \exp(-0.01105\lambda) \quad (2.6)$$

Avec  $C_c$  la concentration de chlorophylle dans l'eau et  $C_c^0 = 1\text{mg/m}^3$  la concentration de référence de la chlorophylle [23].



**Figure 2.3** : Coefficient d'absorption de la lumière dans l'eau (a). Transmission (b) en fonction de la distance de transmission pour Lumières de 405, 550, 650 et 800 nm [1].

La figure 2.3 (a) indique que les longueurs d'onde bleu et vert présentent un coefficient d'absorption relativement faible comparé aux autres longueurs d'onde du spectre visible. Quant à la figure (b) (qui montre la transmittance des lumières de 405, 550, 650 et 800 nm en fonction de la distance de transmission, selon la loi de Beer [1]), ce sont ces deux longueurs d'onde qui parcourent la plus grande distance. Ces deux propriétés font qu'elles sont les seules employées pour les VLC.

### 2.3.1.2 La diffusion

Le coefficient de diffusion  $\beta(\lambda)$  caractérise la diminution globale du signal à cause de la déviation des photons. Toutefois, la diffusion totale correspond à l'addition des coefficients de diffusion de l'eau  $\beta_w(\lambda)$  et des particules fines  $\beta_s(\lambda)$  et grosses  $\beta_l(\lambda)$ . La diffusion est fonction de la longueur d'onde et de la concentration. Donc, on peut déterminer la diffusion totale de la manière suivante [23]:

$$\beta(\lambda) = \beta_w(\lambda) + \beta_s(\lambda)C_s + \beta_l(\lambda)C_l \quad (2.7)$$

Où les concentrations à petite  $C_s$  et grande échelle  $C_l$  sont exprimées en  $\text{g/m}^3$  et sont calculées comme suit :

$$C_s = 0.01739C_c \exp \left[ 0.11631 \left( \frac{C_c}{C_c^0} \right) \right] \text{ g/m}^3 \quad (2.8)$$

$$C_l = 0.76284C_c \exp \left[ 0.03092 \left( \frac{C_c}{C_c^0} \right) \right] \text{ g/m}^3 \quad (2.9)$$

Ou encore :

$$\beta(\lambda) = 2\pi \int_0^\pi \beta(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (2.10)$$

Où :

$\beta(\theta)$  : est la fonction de diffusion volumique (**VSF** : volume scattering function) et définie comme la fraction d'intensité lumineuse qui s'écarte du faisceau en raison de la diffusion dans l'angle solide centré autour de l'angle de diffusion  $\theta$ .

$\beta(\lambda)$  : Coefficient de diffusion.

$\theta$  : Angle de diffusion [37].

Ces coefficients sont grandement influencés par la nature de l'eau et sa profondeur [8].

### 2.3.2 La turbulence océanique

La turbulence océanique se caractérise par les changements rapides de l'indice de réfraction, provoquées par les variations des paramètres de l'environnement aquatique tels que la pression, la densité, la salinité, la température, etc... Ce phénomène entraîne une réception d'intensité lumineuse variable, appelée scintillation, qui provoque une détérioration des performances [8]. Selon les conditions de turbulence, plusieurs types de modèles de turbulence sous-marine peuvent être utilisés, y compris les modèles log-normal et Gamma-Gamma [38].

On peut classer la turbulence sous-marine en trois catégories : faible (eau claire), moyenne et forte (eau trouble) en fonction de l'indice de scintillation du faisceau lumineux, qui est défini comme la variance normalisée de l'intensité lumineuse. C'est un indicateur de l'intensité de la turbulence (un indice de scintillation élevé indique un canal fortement turbulent, tandis qu'un indice de scintillation faible décrit un canal faiblement turbulent). En termes mathématiques, l'indice de scintillation est défini par [19] :

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad (2.11)$$

Où :

$I$  : Intensité du signal reçue ;

$\langle I \rangle$  : Valeur moyenne de l'intensité  $I$ .

La distribution log-normale est employée pour représenter les variations provoquées par une turbulence faible, caractérisée par  $\sigma_I^2 < 1$ . Dans ce contexte, le coefficient d'évanouissement du canal  $h_F = \exp(2X)$  a la fonction de densité de probabilité (PDF) suivante [35] :

$$f_{h_F}(h_F) = \frac{1}{2h_F \sqrt{2\pi\sigma_X^2}} \exp\left(-\frac{[\ln(h_F) - 2\mu_X]^2}{8\sigma_X^2}\right), \quad (2.12)$$

Avec  $X = (1/2) \ln(h_F)$  désigne l'amplitude logarithmique de l'évanouissement qui a une distribution gaussienne avec une moyenne  $\mu_X$  et une variance  $\sigma_X^2$ .

La distribution Gamma-Gamma (GG) est employée pour caractériser les conditions de turbulence de modérée à forte intensité. La fonction de densité de probabilité de la distribution GG est définie par [7]:

$$f_{\Gamma\Gamma}(I_{\alpha\Gamma\Gamma}) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_{\alpha\Gamma\Gamma}^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} \times K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I_{\alpha\Gamma\Gamma}}), \quad I_{\alpha\Gamma\Gamma} > 0, \quad (2.13)$$

Où :

$\alpha$  : paramètre de grande échelle dépendant de l'échelle de turbulence externe (liée aux grands tourbillons atmosphériques) ;

$\beta$  : paramètre de petite échelle dépendant de l'échelle de turbulence interne (liée aux petits tourbillons) ;

$\Gamma$  : est la fonction Gamma ;

$K_{\alpha-\beta}$  : est la fonction de Bessel modifiée de seconde espèce.

Les expressions de  $\alpha$  et  $\beta$  sont formulées comme suit :

$$\alpha = \left[ \exp\left(\frac{0.49\sigma_I^2}{(1+1.11\sigma_I^{12/5})^{7/6}}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (2.14)$$

$$\beta = \left[ \exp\left(\frac{0.51\sigma_I^2}{(1+0.69\sigma_I^{12/5})^{5/6}}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (2.15)$$

Où  $\sigma_I^2$  est la variance de Rytov qui représente l'indice de scintillation [7].

### 2.3.3 Erreur de pointage et Alignement

L'alignement et le pointage sont des opérations essentielles pour assurer une connexion stable et fiable entre les émetteurs-récepteurs optiques. Les erreurs de pointage et les désalignements sont habituellement perçus comme des conséquences d'effets de la ligne de visée et de gigue. La ligne de visée est caractérisée comme un déplacement constant entre la trajectoire de l'émetteur (à savoir, le centre du faisceau) et le cœur de l'ouverture du récepteur, qui peut résulter d'informations de localisation erronées du récepteur. Par ailleurs, la gigue fait référence à un déplacement aléatoire entre le faisceau lumineux et le centre de l'ouverture causé par la turbulence océanique, les variations en rapport avec la profondeur, les courants sous-marins ainsi que les mouvements imprévisibles de la surface de l'eau. Bien que la précision de la visée puisse être améliorée grâce à des données de localisation détaillées et des systèmes PAT performants, la gigue demeure un enjeu majeur étant donné que l'aspect imprévisible de l'environnement océanique échappe à tout contrôle [8].

En négligeant les erreurs de pointage causées par la gigue, le désalignement est représenté par la fonction d'étalement du faisceau (BSF : Beam Spread Function) ci-après [8] :

$$BSF(\lambda, d, r) = P_r(\lambda, d)E(d, r) + \int_0^\infty P_r(\lambda, d)E(d, r) \times \left[ \exp\left(\int_0^d b(\lambda)\tilde{\vartheta}(x(d-y))dy\right) - 1 \right] J_0(yr)ydy, \quad (2.16)$$

Où  $E(d, r)$  et  $E(d, x)$  représentent les répartitions d'irradiance de la source laser en coordonnées spatiales et dans le domaine des fréquences spatiales, respectivement ;

$d$  : représente l'écart entre les dispositifs émetteurs-récepteurs ;

$r$  : désigne la distance séparant les points centraux de l'ouverture et le faisceau lumineux capté ;

$\tilde{\vartheta}$  : correspond à la fonction de phase de diffusion (SPF : Scattering Phase function).

En prenant en compte le modèle de faisceau gaussien pour le phénomène de gigue, si le faisceau lumineux se déplace sur la distance  $z$  qui sépare la source de la destination, et que le faisceau est recueilli à l'extrémité du détecteur avec un rayon  $a$ , alors la puissance reçue au niveau du récepteur (coefficient d'affaiblissement dû à l'erreur de pointage) est donnée par [23][39]:

$$h_p(R; z) \approx A_p \exp\left(-\frac{2R^2}{\Omega_{zeq}^2}\right) \quad (2.17)$$

$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$  : désigne le déplacement radial aléatoire au niveau du récepteur ;

$A_p = [\text{erf}(v)^2]$  : Fraction de la puissance collectée à  $R = 0$ .

$v = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left( \frac{D_R}{2w_z} \right)$  : Rapport entre le rayon d'ouverture et la largeur du faisceau  $w_z$  ;

$\Omega_{zeq}^2 = w_z \sqrt{\frac{\sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}}$  : Largeur du faisceau équivalente ;

$w_z \approx w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2}$  : Largeur du faisceau à la distance  $z$  ;

$w_0$  : Taille du spot de l'onde gaussienne.

### 2.3.4 Interférence et dispersion par trajets multiples

Du fait des phénomènes de diffusion et de réflexion, certaines sections du faisceau lumineux émis peuvent emprunter diverses trajectoires avec différentes longueurs de parcours, atteignant le récepteur à des moments distincts. Cela entraîne une dispersion temporelle (c'est-à-dire, propagation du retard) et une interférence entre les symboles (ISI), réduisant ainsi le taux de transmission des données (débit de transmission) [4][8].

L'ampleur des interférences causées par les trajets multiples est fonction des caractéristiques du système et des conditions de propagation. Dans les eaux peu profondes, plusieurs signaux sont générés au niveau du détecteur lorsque les ondes optiques se réfléchissent sur la surface ou le fond. On peut négliger ces réflexions à la surface et au fond dans les eaux profondes. On utilise des techniques sophistiquées de traitement du signal, comme l'égalisation des canaux et l'optique adaptative, afin de réduire les interférences au niveau du récepteur [19].

Pour un nœud émetteur optique générique  $i$  et un nœud récepteur  $j$ , le facteur de perte de propagation on peut définir la perte de propagation selon la loi de Beer-Lambert de la manière suivante [8][23]:

$$h_{ij}^{pl}(\lambda, d_{ij}) = \exp\{-c(\lambda)d_{ij}\}, \quad (2.18)$$

$i$  et  $j$  : désignent les nœuds émetteur et récepteur ;

$d_{ij}$  : est la distance euclidienne entre les émetteurs-récepteurs ;

$c(\lambda)$  : est le coefficient d'extinction.

### 2.3.5 Obstacles physiques

Des organismes vivants comme les créatures marines et les bancs de poissons induisent des interruptions temporaires du signal sur le détecteur, du fait de l'extrême finesse du rayon lumineux. Pour assurer la transmission des informations en cas de défaut, on doit utiliser des méthodes de

redondance, de traitement du signal et de correction d'erreurs. En ce qui concerne la correction des erreurs sous-marines, la technique la plus utilisée est la correction d'erreur directe (FEC) [4].

### 2.3.6 Types d'eau

Étant donné que la composition des milieux sous-marins et la qualité de l'eau diffèrent selon les régions, il est possible de catégoriser ces environnements en se basant sur la concentration en chlorophylle et sur la profondeur, cette dernière étant associée à l'infiltration de la lumière solaire.

#### 2.3.6.1 Classification selon la concentration en chlorophylle

Le principal facteur déterminant des coefficients d'absorption et de diffusion, dont la somme constitue le coefficient d'extinction, est la concentration en chlorophylle.

En fonction de la concentration en chlorophylle, nous distinguons quatre types : les eaux marines pures, les eaux océaniques claires, les eaux océaniques côtières et enfin, les eaux troubles des ports et des estuaires. [4][14][23][40].

- **Eaux de mer pures :** L'absorption représente le facteur limitant principal, les signaux optiques étant absorbés à cause de leur composition chimique, et cette absorption s'intensifie avec l'augmentation de la longueur d'onde. La faible valeur de  $b$  favorise une diffusion quasi-linéaire du faisceau.
- **Eaux océaniques claires :** Dans l'eau océanique claire, la diffusion est particulièrement forte en raison de sa densité accumulée en particules comme les éléments minéraux, les sels dissous, le CDOM et d'autres, par rapport à l'eau de mer pure.
- **Eaux océaniques côtières :** Ces dernières présentent une concentration nettement plus importante de matières planctoniques, de débris et de composants minéraux qui influencent l'absorption et la diffusion.
- **Eaux troubles des ports et des estuaires :** Cette catégorie d'eau restreint la diffusion des rayons en raison d'une forte absorption et diffusion, car elle possède la plus grande densité de particules en suspension et dissoutes

Un haut coefficient d'extinction est associé à l'eau turbide, alors qu'un faible est attribué à l'eau non turbide. En se basant sur les niveaux habituels de chlorophylle, l'eau pure des mers et des océans clairs est généralement reconnue comme non turbide, alors que les eaux côtières et portuaires sont souvent perçues comme turbides [14].

Le Tableau 2.1 présente les valeurs habituelles des coefficients d'absorption, de diffusion et d'atténuation.

| Types d'eau   | $\alpha(\lambda)[m^{-1}]$ | $\beta(\lambda)[m^{-1}]$ | $c(\lambda)[m^{-1}]$ |
|---------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| Eau pure      | 0.053                     | 0.003                    | 0.056                |
| Eau claire    | 0.114                     | 0.037                    | 0.151                |
| Eau côtière   | 0.178                     | 0.220                    | 0.398                |
| Eau des ports | 0.295                     | 1.875                    | 2.170                |

**Tableau 2.1** : Les valeurs des coefficients d'absorption, de diffusion et d'extinction sous-marins pour différent types d'eau [37].

### 2.3.6.2 Classification selon la profondeur

Selon la profondeur, on a [4][14][23]:

- **La zone euphotique ou zone de surface (0 m - 200 m)** : c'est la zone la plus élevée (zone d'ensoleillement), proche de la surface, s'étend jusqu'à une profondeur de 200 m ; une quantité adéquate de lumière solaire traverse cette région. Les algues vertes peuvent subsister en utilisant la source majeure de lumière solaire, et elles réalisent la photosynthèse. Dans cette région, le thermomètre varie entre approximativement 28 °C et 20 °C, au seuil de la congélation.
- **La zone dysphotique ou zone de transition (200 m - 1000 m)** : Elle est désignée comme la zone crépusculaire, qui se situe en dessous de la zone euphotique. En général, la profondeur prévue de cette région s'étend de 200 m à 1 km dans l'océan. À ce stade, la lumière est à peine perceptible et les algues y habitent rarement. La lumière est insuffisante pour favoriser le processus de photosynthèse dans la zone dysphotique.
- **La zone aphotique ou zone profonde (1 000 m à 11 000 m)** : Une vaste portion de l'océan est incluse dans cette strate, connue sous le nom de zone de minuit. Près de 90 % des eaux océaniques se situent dans la région de l'obscurité. Elle est totalement obscure ; aucune lumière ne pénètre cette immense étendue d'eau non éclairée. La pression de l'eau est très faible et en dessous du seuil de congélation. La zone de minuit présente une profondeur allant de plus de 1000 mètres jusqu'à 11 kilomètres, où la lumière est absente. L'écart de température s'étend bien au-delà d'une température glaciale, allant de 40 °C à 150 °C ou même moins. On peut trouver dans cette région des organismes et des êtres vivants plus spécifiques ou plus rares.

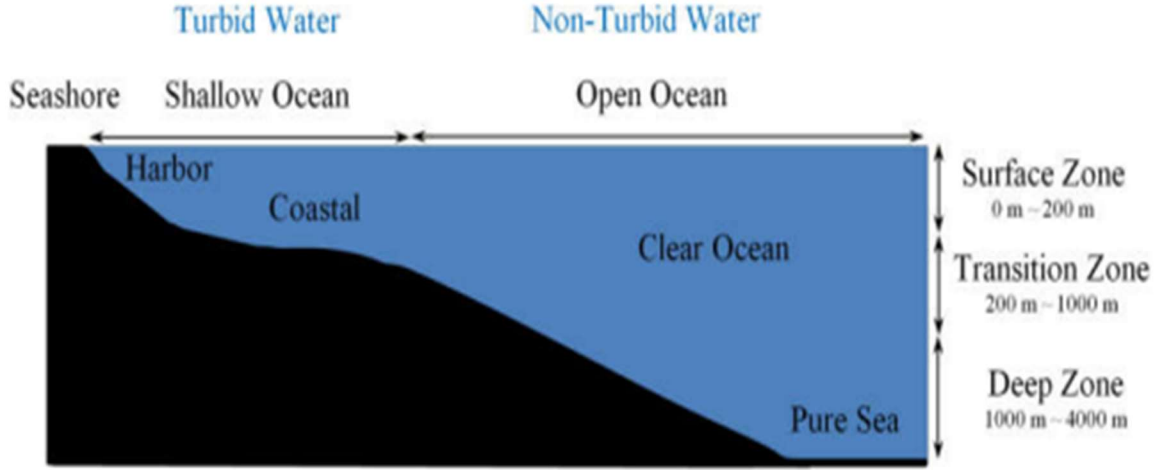


Figure 2.4 : Classification des environnements sous-marins [14].

### 2.3.7 Sources de bruits

Il existe plusieurs sources de bruit dans le milieu sous-marin à savoir :

#### a. Bruit de fond

Le bruit de fond comprend le rayonnement du corps noir et la lumière ambiante sous-marine, dont la source principale est la lumière solaire réfractée. L'expression suivante définit la puissance totale du bruit de fond dans la transmission du signal optique [19][23]:

$$P_{BG} = P_{BG_{sol}} + P_{BG_{black-body}} \quad (2.19)$$

Où  $P_{BG_{sol}}$  est la puissance du bruit de fond solaire et  $P_{BG_{black-bod}}$  est la puissance du bruit de fond du corps noir.

Sa variance est :

$$\sigma_{BG}^2 = 2q\Re P_{BG}B \quad (2.20)$$

#### b. Bruit optique excessif

Du fait de l'inexactitude du bruit provenant des émetteurs-récepteurs, des interférences surviennent et perturbent les signaux reçus, qualifié de bruit optique excessif. C'est pour cette raison que le système de communication devrait être plus exact et plus sûr pour la transmission des informations [23].

$$\sigma_{iph}^2 = 2qIB \quad (2.21)$$

I est le courant moyen.

**c. Bruit thermique**

On peut le définir comme le bruit électronique généré par l'excitation thermique des porteurs de charge, qui sont généralement les électrons, dans un conducteur électrique.

On peut déterminer la variance du bruit thermique comme suit [19][23][22]:

$$\sigma_{TH}^2 = \frac{4kT_eFB}{R_l}, \quad (2.22)$$

Avec  $k$  la constante de Boltzmann,  $T_e$  la température absolue du système,  $R_l$  la résistance équivalente du circuit,  $B$  la bande passante du signal et  $F$  est le facteur de bruit.

**d. Bruit de grenaille**

En électronique, le bruit de grenaille est issu du caractère discret de la charge électrique. On observe également ce phénomène lors du dénombrement de photons dans les appareils optiques, où il est relié à la nature particulaire de la lumière. Ce bruit se manifeste lors de l'affichage du signal capté. On peut exprimer la variance du bruit de grenaille comme suit [19][23][21]:

$$\sigma_{ss}^2 = 2q\Re P_s B \quad (2.23)$$

Où  $P_s$  est la puissance du signal,  $\Re$  est la réactivité et  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C la charge de l'électron.

**e. Bruit de courant d'obscurité du photodétecteur**

Le bruit de courant d'obscurité fait référence au bruit généré dans le détecteur en l'absence de lumière, c'est-à-dire lorsque le photodétecteur ne reçoit aucun signal lumineux. Cela fait également référence à l'intensité lumineuse minimale que la photodiode est capable de détecter et qui entraîne un photo-courant produit par le rayonnement de fond. La variance du bruit de courant en l'absence de lumière est [21]:

$$\sigma_{DC}^2 = 2qI_{DC}B \quad (2.24)$$

Où  $I_{DC} = 1,226 \times 10^{-9}$  ampère.

**2.3.8 Turbulence due au paramètre de structure de l'indice de réfraction**

Des variations aléatoires de l'indice de réfraction de l'eau influencent la diffusion d'un faisceau lumineux dans le milieu aquatique.

Ces variations ou discontinuités engendrent une turbulence optique, autrement dit des modifications de la vitesse de progression du front d'onde. Le paramètre de structure de l'indice de réfraction ( $C_n^2$ ) quantifie la turbulence optique.

Il est observé généralement que  $C_n^2$  se varie entre  $10^{-12}$  et  $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$  [41], pour forte et faible turbulence, respectivement.

## 2.4 Configuration des liaisons dans l'UVLC

On distingue trois sortes de configurations pour les liaisons optiques sous-marines : les liaisons en visibilité directe (LOS : ligne of sight), les liaisons LOS assistée par rétro-rélecteur et les liaisons hors ligne de vue (NLOS : non ligne of sight)),) [23].

### 2.4.1 Liaison en visibilité directe LOS

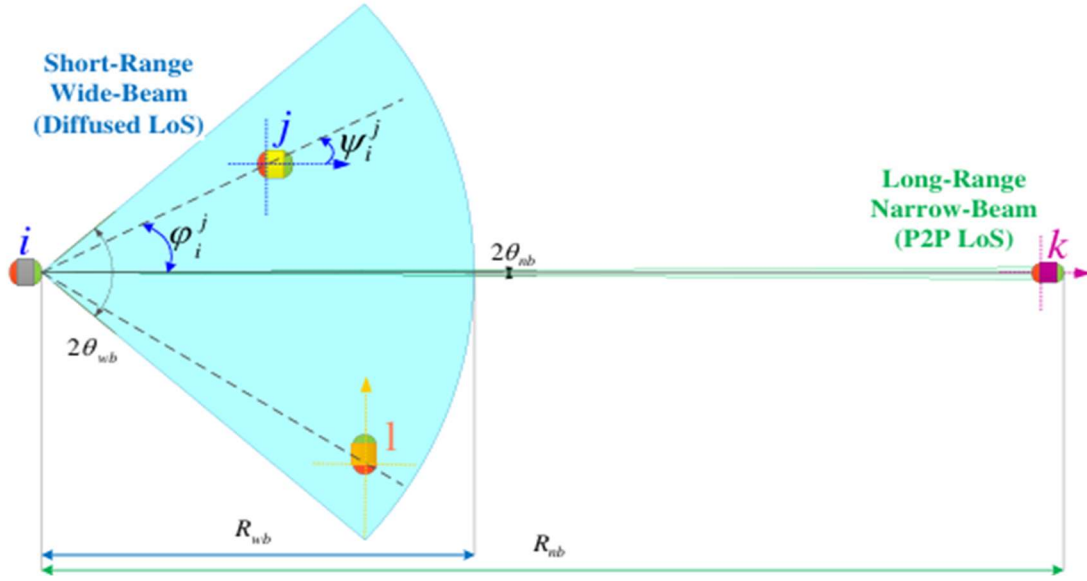
La communication LOS représente un lien optique simple et couramment utilisé. Son inconvénient réside dans le fait qu'il exige un alignement précis entre l'émetteur et le récepteur. L'établissement d'un alignement précis entre l'émetteur et le récepteur rend la mise en place du LOS exigeante en termes de positionnement, d'acquisition et de suivi (**PAT**), restreignant la portée du faisceau émis par le récepteur à la zone ciblée de réception. Les liaisons LOS qui emploient des sources de lumière à faible angle de divergence, telles que les diodes laser, permettent un transfert de données pouvant atteindre 10 Gbit/s, voire plus, en utilisant des récepteurs de dénombrement de photons prévus pour fonctionner avec un codage par correction d'erreurs [1][4][7].

Une liaison LOS peut être soit une liaison **LOS point-to-point** soit une liaison **LOS diffuse**.

Établir une configuration point à point avec visibilité directe est l'option la plus simple. Dans ce contexte, l'émetteur repère le faisceau lumineux émis vers lui par le récepteur. Les systèmes point à point, qui utilisent généralement des sources de lumière à faible divergence angulaire (telles que les lasers), requièrent un alignement exact entre l'émetteur et le récepteur.

Quant à la liaison LOS diffuse, elle fait appel à des sources lumineuses diffusées ayant un large angle de divergence (comme les diodes électroluminescentes (DEL) de haute puissance). Ce paramétrage facilite la diffusion de données d'un nœud vers plusieurs autres nœuds. Dans ce scénario, le besoin d'exigence point à point est moins strict qu'avec une configuration point à point. Toutefois, dans cette situation, la communication à lumière diffusée connaît une atténuation plus importante du fait de l'élargissement de la zone d'interaction [42].

Cependant, préserver l'alignement dans des milieux sous-marins troubles ou en présence de nœuds mobiles comme des véhicules sous-marins représente un problème. En dépit de ces obstacles, les scénarios LOS garantissent des performances solides en fournissant des débits de données élevés, une meilleure performance BER et une efficacité système accrue [7].



**Figure 2.5** : Schéma d'une liaison en visibilité directe (LOS) [8].

Du point de vue du récepteur, la puissance reçue ( $P_r^j$ ) représente le produit de l'efficacité de la transmission de puissance, du gain du canal, de la perte lors de la propagation et de la perte géométrique de la configuration [8][23] :

$$P_r^j = P_t^i \eta_t^i \eta_j^r G_{ij}^{LOS} X(\psi_i^j) h_{ij}^{pl} \left( c(\lambda), \frac{d_{ij}}{\cos(\phi_i^j)} \right) \quad (2.25)$$

Où  $P_t^i$ ,  $P_r^j$ ,  $\eta_t^i$ ,  $\eta_j^r$ ,  $X(\psi_i^j)$  et  $\psi_i^j$  désignent respectivement les puissances des signaux d'émission et de réception, les rendements des émetteurs-récepteurs, le gain du concentrateur et l'angle d'incidence par rapport à l'axe du récepteur.

Le gain géométrique dans un modèle LOS optique ( $G_{ij}^{LOS}$ ) peut être formulée de la manière suivante [8][23]:

$$\begin{cases} G_{ij}^{LOS} = \frac{A_j \cos(\phi_i^j)}{2\pi(1-\cos(\theta_i))d_{ij}^2}, & -\pi/2 \leq \phi_i^j \leq \pi/2 \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases} \quad (2.26)$$

$A_j$  : est la surface d'ouverture du récepteur du nœud  $j$  ;

$\phi_i^j$  : est l'angle entre le plan du récepteur et la trajectoire de l'émetteur

$\theta_i$  : est l'angle de divergence du faisceau du nœud émetteur  $i$ .

Les conditions du canal, qui représentent la combinaison de l'atténuation de propagation et des pertes géométriques, sont définies de la manière suivante [23] :

$$h_{ij} = h_{ij}^{pl} + G_{ij}^{LOS} \quad (2.27)$$

En remplaçant (2.26) dans (2.27) on obtient :

$$h_{ij} = \frac{2\pi(1 - \cos(\theta_i)d_{ij}^2)e^{\{-c(\lambda)d_{ij}\}} + A_i \cos(\phi_{ij})}{2\pi(1 - \cos(\theta_i)d_{ij}^2)}, \quad (2.28)$$

La réponse impulsionnelle et la réponse fréquentielle d'un canal de communication LOS sont données respectivement par les équations (2.29) et (2.30) comme suit [22]:

$$\begin{cases} h_{LOS}(t) = \frac{A_{phy}(m+1)}{2\pi D^2} \cos^m(\varphi) \cos(\psi) \delta\left(t - \frac{D}{c}\right) & 0 \leq \psi \leq FOV \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.29)$$

$$H_{LOS}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_{LOS}(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.30)$$

Où :

$\varphi$  : angle d'irradiance (angle entre l'axe de la source et la direction du faisceau),

$\psi$  : angle d'incidence du rayon optique,

$\delta(.)$  : Fonction Dirac,

FOV (field of view) : champ de vision,

D : distance entre émetteur et récepteur,

c : vitesse de la lumière,

$A_{phy}$  : Aire physique du récepteur (surface sensible),

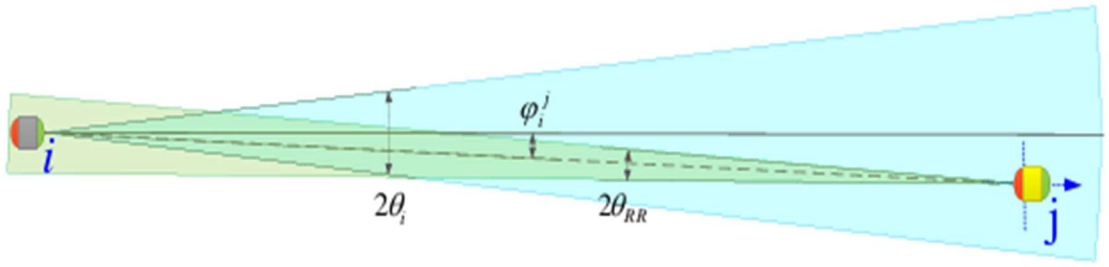
m : indice d'ordre de Lambert (caractérise la directivité de la source).

#### 2.4.2 Liaison LOS assistée par rétro-réflecteur

Les liaisons de type rétro-réflecteur optique reposent sur le principe du phénomène de rétrodiffusion, comprenant une source lumineuse et un réflecteur. Bien que la source de lumière puisse être un système complexe à haute puissance émissive, le réflecteur agit comme un interrogateur, ne pouvant pas remplir les rôles d'émetteur et de récepteur du fait de sa structure simpliste et de son énergie limitée. Ainsi, le faisceau lumineux constant produit par la source est modulé et renvoyé vers le récepteur. Une des contraintes de cette configuration est que la diffusion du signal optique transmis peut interférer avec le signal réfléchi, ce qui nuit au rapport signal/bruit et au taux d'erreur binaire du système. Comme les signaux optiques feront deux traversées du canal sous-marin, une atténuation supplémentaire affectera le signal reçu.

On peut diviser la communication assistée par rétro-réflecteur en deux catégories : le rétro-réflecteur à limitation de photons et le rétro-réflecteur à limitation de contraste. Dans le

premier scénario, l'absorption est dominant, ce qui diminue le nombre de photons captés par le réflecteur. On la trouve dans les eaux peu profondes comme les lacs, les deltas et les rivières, ainsi que dans les eaux limpides de mer. Dans le deuxième scénario, la diffusion est l'élément prépondérant qui définit essentiellement la portée et la faculté de la liaison rétro-réfléchissante. Dans le contexte des applications d'imagerie sous-marine, la gestion du contraste est primordiale. En effet, une diminution du nombre de photons entraîne directement une baisse du contraste de l'image. Le réflecteur a la capacité d'intensifier le signal modulé ou le faisceau lumineux pour optimiser les performances du système dans les deux situations, en tant que rétro-réflecteurs restreints en photons et en contraste [8][23][42].



**Figure 2.6** : Schéma d'une liaison LOS assistée par rétro-réflecteur [8].

Le faisceau lumineux réfléchi reçu par le nœud source i est donnée comme suit [8]:

$$P_r^j = P_t^i \eta_t^i \eta_r^i \eta_j^{RR} G_{ij}^{RR} X(\psi_i^j) h_{ij}^{pl} \left( c(\lambda), \frac{2d_{ij}}{\cos(\phi_i^j)} \right), \quad (2.31)$$

$\eta_j^{RR}$  : représentent l'efficacité optique du rétro-réflecteur, l'efficacité du récepteur et l'efficacité du rétro-réflecteur.

Selon le gain géométrique des liaisons LOS, le gain pour les liaisons rétro-réfléchissantes est [8] :

$$G_{ij}^{RR} = \begin{cases} \frac{A_j}{d_{ij}^2} \frac{\cos(\phi_i^j)}{2\pi[1-\cos(\theta_i)]} \frac{A_{RR} \cos(\phi_i^j)}{\pi[d_{ij} \tan(\theta_{RR})]^2}, & -\pi/2 \leq \phi_i^j \leq \pi/2 \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases} \quad (2.32)$$

La réponse impulsionnelle est donnée par :

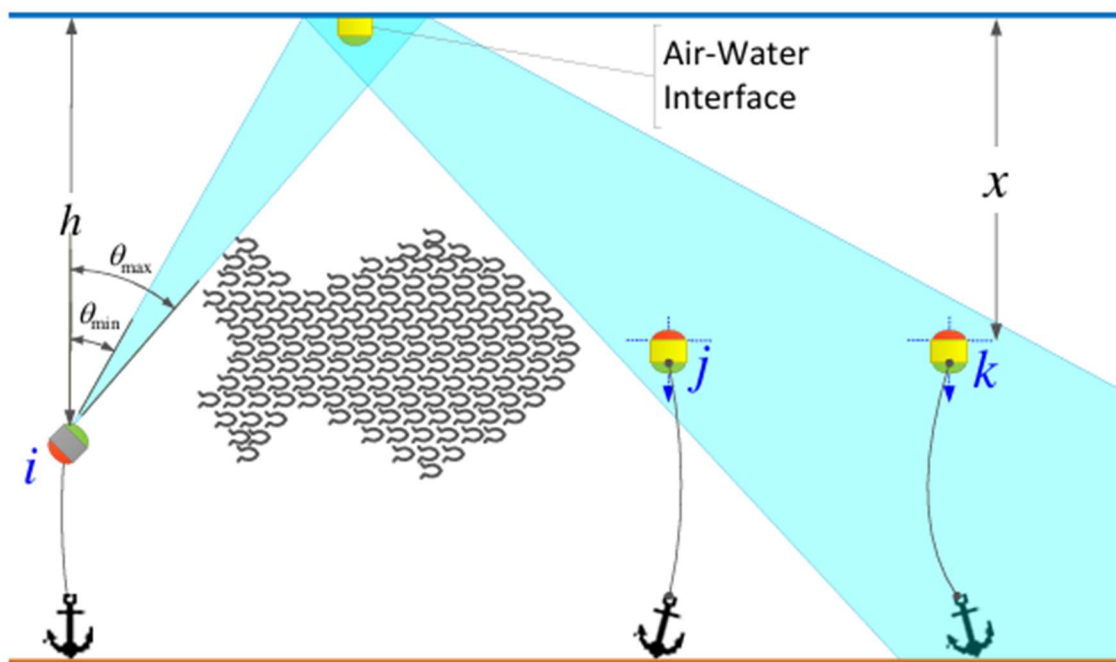
$$\begin{cases} h_{LOS-RR}(t) = \frac{A_{phy}(m+1)}{2\pi D^2} \cos^m(\varphi) \cos(\psi) R_{RR} \delta\left(t - \frac{2D}{c}\right) & 0 \leq \psi \leq FOV \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.33)$$

$R_{RR}$  : Coefficient de réflexion du rétro-réflecteur (entre 0 et 1).

### 2.4.3 Configuration NLOS

La liaison NLOS en communication optique sous-marine est un lien optique indirect qui s'appuie sur la rétro-réflexion à l'interface eau-air ou la diffusion de la lumière par les molécules et particules d'eau pour établir une communication entre l'émetteur et le récepteur. Cette méthode est bénéfique dans les contextes où des barrières ou des milieux sous-marins compliqués empêchent les connexions optiques directes, facilitant la communication même en conditions NLOS [7].

La communication NLOS donne un canal dynamique puisque le signal émis est soumis à de nombreuses réflexions, diffractions et diffusions dans l'environnement avant d'arriver au récepteur. Le canal NLOS, avec son comportement dynamique, réduit les exigences de positionnement, d'acquisition et de suivi (PAT), le rendant ainsi une option pratique pour les applications réelles demandant une communication fiable et performante dans des environnements complexes et difficiles [1][7].



**Figure 2.7 :** Schéma d'une liaison NLOS [8].

Dans le cas NLOS, le faisceau lumineux est diffusé par la source avec des angles intérieur et extérieur,  $\theta_{\min}$  et  $\theta_{\max}$ , vers le haut. Ce faisceau lumineux montant touche la surface aquatique avec une zone annulaire Ann, c'est-à-dire qu'il y a une réflexion du rayonnement lumineux sur la surface marine qui parvient ensuite aux nœuds désirés. Toutefois, si les dispositifs d'émission et

de réception sont orientés verticalement vers le haut, le faisceau qui se propage est en partie réfracté et en partie réfléchi par la surface de l'eau. Comme le montre la Figure 2.7, le faisceau lumineux qui provient de la profondeur  $h$  est en partie réfléchi par la surface marine et éclaire une zone (surface) annulaire  $A_{ann}$  à la profondeur  $x$  avec une densité de puissance identique. On peut exprimer  $A_{ann}$  qui détermine une région annulaire issue d'une sphère ayant un rayon  $h + x$  de la manière suivante [8][23]:

$$A_{ann} = 2\pi(h + x)^2[\cos(\theta_{min}) - \cos(\theta_{max})], \quad (2.34)$$

Dans le scénario NLOS, la puissance reçue à l'emplacement indiqué est donnée par [23] :

$$P_r^j = P_t^i \eta_t^i \eta_r^j G_{ij}^{NLOS} X(\psi_i^j) h_{ij}^{pl} \left( c(\lambda), \frac{h+x}{\cos(\phi_i^j)} \right), \quad (2.35)$$

Le gain est donné par [8] :

$$G_{ij}^{NLOS} = \begin{cases} \frac{A_j \cos(\phi_i^j)}{2A_{ann}} \left( \left[ \frac{\tan(\theta_t - \phi_i^j)}{\tan(\theta_t + \phi_i^j)} \right]^2 \left[ \frac{\sin(\theta_t - \phi_i^j)}{\sin(\theta_t + \phi_i^j)} \right]^2 \right), & \theta_{min} \leq \phi_i^j \leq \theta_c \\ \frac{A_j \cos(\phi_i^j)}{2A_{ann}}, & \theta_c \leq \phi_i^j \leq \theta_{max} \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases} \quad (2.36)$$

Où  $\theta_t$  est l'angle de transmission,  $\theta_c \triangleq \sin^{-1}\left(\frac{n_A}{n_w}\right)$  est l'angle critique (c'est-à-dire l'angle d'incidence au-dessus duquel se produit la réflexion interne totale),  $n_A$  est l'indice de réfraction de l'air et  $n_w$  est l'indice de réfraction de l'eau.

En générale, la réponse impulsionnelle d'une liaison NLOS s'exprime par la somme des contributions des multiples trajets réfléchis :

$$h_{NLOS}(t) = \sum_{k=1}^N \frac{A_{phy}(m+1)}{2\pi d_k^2} \rho_k \cos^m(\varphi_k) \cos(\alpha_k) \cos(\beta_k) \delta\left(t - \frac{d_k}{c}\right) \quad (2.37)$$

$N$  : nombre de chemins réfléchis considérés,

$d_k$  : distance totale parcourue par le chemin réfléchi  $k$ ,

$\varphi_k$  : angle d'irradiance à l'émetteur pour le chemin  $k$ ,

$\rho_k$  : Coefficient de réflexion de la surface réfléchissante pour le chemin  $k$ ,

$\alpha_k$  : angle d'incidence sur la surface réfléchissante,

$\beta_k$  : angle de réception sur le détecteur.

## 2.5 Modèles et Méthodes de calcul de canal UVLC

Dans le contexte de la modélisation des canaux UVLC, plusieurs techniques sont fréquemment utilisées, telles que la loi de Beer-Lambert, le modèle RTE et les simulations de lancer de rayons basés sur Monte Carlo (MCRT) [7].

### 2.5.1 Loi de Beer-Lambert

Un modèle de simulation fréquemment employée, particulièrement dans le domaine de la signalisation optique en milieu aqueux, est la loi de Beer-Lambert. Cette loi explique diminution de l'intensité du signal optique provoquée par la présence de particules en suspension dans l'eau. Ce genre de modèle de canal est mis en œuvre pour la communication optique concernant toute forme de disponibilité d'eau, notamment pour l'atténuation due à la perte de trajet. Ci-dessous figure l'expression mathématique de la loi de Beer-Lambert [23] :

$$P_r(\lambda, d) = P_t \exp(-c(\lambda)d) \quad (2.38)$$

Où  $P_r$  et  $P_t$  sont l'intensité du signal optique reçu et émis respectivement aux extrémités du récepteur et de l'émetteur [23].

Même si la loi de Beer-Lambert fournit un moyen simple et intuitif d'évaluer l'affaiblissement de la lumière, elle néglige les interactions complexes entre la lumière et les molécules d'eau, ce qui peut nuire à sa précision dans tous les contextes sous-marins. Elle se base sur l'hypothèse peu réaliste que tous les photons dispersés sont perdus. Dans les faits, après de nombreuses diffusions, quelques photons parviennent toujours à atteindre le récepteur. Cela implique que la loi de Beer-Lambert peut entraîner une baisse de la puissance reçue, surtout dans les situations où domine la diffusion [7].

### 2.5.2 Techniques de simulations de Monte-Carlo

En UWOC, cette technique permet de mesurer le nombre de photons émis par une source optique dans un environnement sous-marin. Pour une description plus précise, les techniques de simulation Monte-Carlo sont employées afin de fournir les détails spécifiques concernant la géométrie des photons en propagation [23].

La simulation MC implique la traçabilité des parcours des photons de l'émetteur jusqu'au récepteur, en considérant différents facteurs comme le type d'eau, la longueur de liaison, l'expansion du faisceau émis et la dimension de l'ouverture du récepteur. Par rapport aux solutions analytiques RTE, la méthode Monte Carlo offre une flexibilité accrue pour gérer diverses

géométries sans restrictions sur les angles de diffusion, ce qui la rend plus appropriée pour les milieux sous-marins complexes [7].

### 2.5.3 Equation de transfert radiatif (RTE)

Le RTE décrit essentiellement la conservation de l'énergie d'une onde lumineuse se propageant à travers un milieu diffusant ; il modélise la diffusion de la lumière dans l'eau [1] :

$$\vec{n} \cdot \nabla I(\lambda, \vec{r}, \vec{n}) = -cI(\lambda, \vec{r}, \vec{n}) + b \int_{2\pi} \tilde{\beta}(\theta) I(\lambda, \vec{r}, \vec{n}) d\vec{n}' + S(\lambda, \vec{r}, \vec{n}) \quad (2.39)$$

où  $\vec{n}$  est le vecteur directeur,  $I(\lambda, \vec{r}, \vec{n})$  est la luminance lumineuse,  $\nabla$  est l'opérateur de divergence,  $c$  est la vitesse de la lumière dans l'eau,  $\tilde{\beta}$  est la fonction de phase de diffusion (SPF) et  $S(\lambda, \vec{r}, \vec{n})$  est la luminance de la source, et  $\theta$  est l'angle de diffusion plan entre les directions  $\vec{n}$  et  $\vec{n}'$ , qui est compris entre  $(0, 2\pi)$  [1].

L'équation RTE est une équation intégral-différentielle complexe qui prend en compte le temps et l'espace, rendant ainsi complexes l'obtention de solutions analytiques exactes. Même si des méthodes analytiques approximatives ont été suggérées auparavant, elles se basent grandement sur des hypothèses simplifiées. Cependant, il demeure très complexe d'obtenir une solution analytique précise pour un grand nombre d'applications pratiques de l'UVLC. Les modèles analytiques RTE peuvent offrir des résultats plus exacts que la loi de Beer-Lambert.

Les modèles analytiques RTE servent d'équations mathématiques pour expliquer comment la lumière interagit avec les molécules d'eau. Ces modèles intègrent des caractéristiques comme les coefficients d'absorption et de diffusion afin de reproduire le comportement de la lumière dans différents milieux sous-marins. De ce fait, on privilégie généralement les méthodes numériques par rapport aux solutions analytiques pour résoudre le RTE. Les deux approches numériques que les chercheurs préfèrent généralement sont les méthodes numériques et les méthodes MC [7].

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre explique les principaux aspects de la propagation de la lumière dans les milieux sous-marins et les défis associés à la communication optique sans-fil sous-marine (UVLC). Les interactions entre les photons et les particules d'eau, telles que l'absorption et la diffusion, jouent un rôle crucial dans l'atténuation du signal, nécessitant une modélisation précise du canal optique pour optimiser les performances des systèmes de communication.

Les performances varient selon le type d'eau (eaux pures, océaniques, claires ou troubles), influençant ainsi les coefficients d'absorption, de diffusion et d'extinction. Ces paramètres sont essentiels pour concevoir des systèmes UVLC adaptés à différents environnements sous-marins.

Les liaisons en visibilité directe (LOS), les liaisons LOS assistées par rétro-réflecteur et les liaisons hors ligne de vue (NLOS) sont les trois principales configurations dans les UVLC, chacune offrant des avantages et des limitations, en termes d'alignement, de débit et de robustesse dans des conditions dynamiques.

Enfin, quant aux méthodes de modélisation du canal, bien que la loi de Beer-Lambert soit simple, elle néglige certaines complexités, alors que les méthodes numériques et Monte-Carlo offrent une meilleure précision pour des environnements sous-marins complexes.

---

# **Chapitre 3**

**Simulation et discussion des résultats**

---

### **3.1 Introduction**

Ce chapitre est dédié à l'étude (l'implémentation et la simulation) d'un système NLOS UVLC avec la modulation MSK en particulier MSK-IPS à l'aide du logiciel OptiSystem. Dans cette perspective nous allons tout d'abord faire une brève présentation du logiciel suivi par bref description des critères d'évaluations, puis nous parlerons des caractéristiques des différents types de modulation MSK proposées dans la littérature. Ensuite, l'accent sera mis sur l'étude de l'impact des différents paramètres sur les performances du système NLOS UVLC proposé et sur la capacité de la modulation MSK-IPS à s'adapter à cet environnement spécifique. L'étude se termine par une comparaison détaillée entre le système utilisant la modulation MSK par rapport à d'autres types de modulation.

### **3.2 Le logiciel OptiSystem [43]**

OptiSystem est un logiciel de conception avant-gardiste, efficace et toujours en progression. Il offre la capacité de planifier, tester et simuler presque toutes les liaisons optiques de la couche de transmission pour une variété de réseaux optiques, y compris les réseaux LAN, SAN, MAN et ultra-longue distance. Il facilite l'élaboration et l'organisation de systèmes optiques, du niveau du composant à celui du système, tout en présentant graphiquement les analyses et les scénarios.

L'interface OptiSystem se divise en plusieurs parties principales dont :

- Une Bibliothèque des composants :

La bibliothèque des composants OptiSystem dispose de centaines d'éléments qui permettent d'extraire des paramètres quantifiables à partir d'équipements réels. Elle se combine avec les équipements de mesure et d'essai de divers fournisseurs et supporte une vaste variété de systèmes de communication optique. Les utilisateurs ont la possibilité d'ajouter de nouveaux éléments basés sur des sous-systèmes et des bibliothèques sur mesure, ou d'avoir recours à la co-simulation avec un outil externe comme MATLAB ou SPICE.

- Un Navigateur du projet : Listant tous les composants utilisés dans le projet en cours.
- Un Editeur layout : Où des composants sont placés, connectés (liés entre eux) et configurés pour construire le schéma du système.
- Et la description du projet : Contenant la description du projet ou d'un composant.

|            | Avantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Applications                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| OptiSystem | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Offre une vue d'ensemble des performances du système.</li> <li>• Évalue la sensibilité des paramètres qui facilitent les spécifications de tolérance de conception.</li> <li>• Fournit un accès facile à d'importants ensembles de données pour caractériser le système.</li> <li>• Propose un balayage et une optimisation des paramètres de manière automatique.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concepts des systèmes de communication optique (OTDM, anneaux SONET/SDH, CWDM, DWDM, PON, câble et OCDMA).</li> <li>• Transmission filaire et sans fil.</li> <li>• Traitement du signal (électrique, numérique, entièrement optique).</li> <li>• Élaboration du sous-système d'émission et de réception (direct/cohérent).</li> <li>• Modulations (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64).</li> <li>• Évaluation des performances du système (schéma de l'œil/facteur Q/BER, états de polarisation, diagrammes de constellation...)</li> </ul> |

Tableau 3.1 : Avantages et Applications du logiciel OptiSystem.

### 3.3 Critère d'évaluations du système de transmission

Les trois principaux critères d'évaluation d'un système de transmission optique sont :

#### 3.3.1 Le taux d'erreur binaire TEB

Le taux d'erreur binaire (BER : Bit Error Rate) mesure la probabilité d'apparition d'erreurs lors de la transmission des bits. On le détermine en mettant en faisant le rapport entre les bits qui ont été reçus et ceux qui ont été transmis :

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}}$$

### 3.3.2 Le diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil est une illustration graphique qui superpose les formes d'onde des symboles reçus dans un signal numérique. Il offre la possibilité d'évaluer visuellement la qualité du signal : plus l'ouverture est grande, meilleure est la qualité, car cela traduit une moindre distorsion et un bruit réduit.

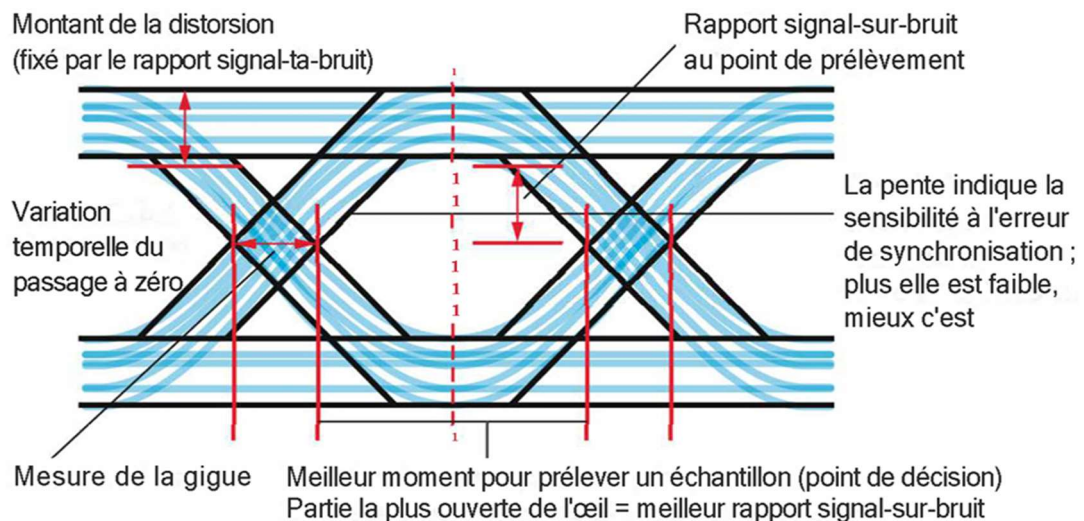


Figure 3.1 : Interprétation du diagramme de l'œil [44].

### 3.3.3 Le facteur de qualité

Le facteur qualité (Q) est une mesure quantitative dérivée du diagramme de l'œil. Il est déterminé sur la base des moyennes de niveaux des signaux et de leurs écarts-types. Un facteur Q élevé signifie un diagramme de l'œil bien ouvert et une qualité de signal optimale. En général, un facteur Q au-delà de 6 est nécessaire pour assurer un taux d'erreur binaire (BER) extrêmement bas.

Le facteur Q est donné par [44] :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (3.1)$$

Avec :

$\mu_0$  et  $\mu_1$  : niveaux moyens du signal utile dans le diagramme de l'œil ;

$\sigma_0$  et  $\sigma_1$  : écart-types.

### **3.4 Choix de type de la modulation**

Dans un système UVLC, le choix de type de la modulation est crucial et s'appuie sur plusieurs critères liés aux caractéristiques du signal modulé et aux contraintes du canal de transmission. La modulation doit permettre d'adapter le signal à la bande passante et aux conditions du canal pour réduire les pertes et les erreurs. Elle doit aussi pouvoir générer un signal résistant aux perturbations, pour assurer une meilleure qualité de réception et un faible taux d'erreur.

La modulation CPM en particulier le MSK est souvent privilégiée comme alternative à la modulation binaire classique en raison de son spectre compact, de sa résistance aux interférences inter-symboles (ISI) grâce à un filtrage optique étroit, de sa phase continue, ainsi que de la suppression de ses lobes latéraux [45]. (La modulation MSK a été bien détaillée dans l'annexe).

Par ailleurs, l'efficacité spectrale, la simplicité de mise en œuvre, le coût, la consommation énergétique et la facilité de mise en place dans les systèmes sont des facteurs déterminants dans ce choix.

Pour ce type de modulation, on a : Modulateur MSK à mise en forme directe des impulsions (DPS), Modulateur MSK à mise en forme séparé des impulsions (SPS) et Modulateur MSK à mise en forme indépendante des impulsions (IPS) [46]. Bien que le MSK-DPS soit appréciée pour sa simplicité, les émetteurs utilisant ce type de modulateur nécessitent un traitement supplémentaire du signal. En comparaison, le MSK-SPS, dont les émetteurs fonctionnent à un débit de transmission fixe à cause de la ligne de retard intégrée au modulateur pouvant entraîner des distorsions importantes des performances MSK (tolérance à la non-linéarité) offrent une meilleure optimisation du spectre et une réduction plus efficace d'ISI grâce à la mise en forme des impulsions distinctes. Enfin le modulateur MSK-IPS se distingue par une flexibilité optimale et une réduction maximale de l'ISI, bien que cela soit au prix d'une complexité accrue et d'un coût élevé.

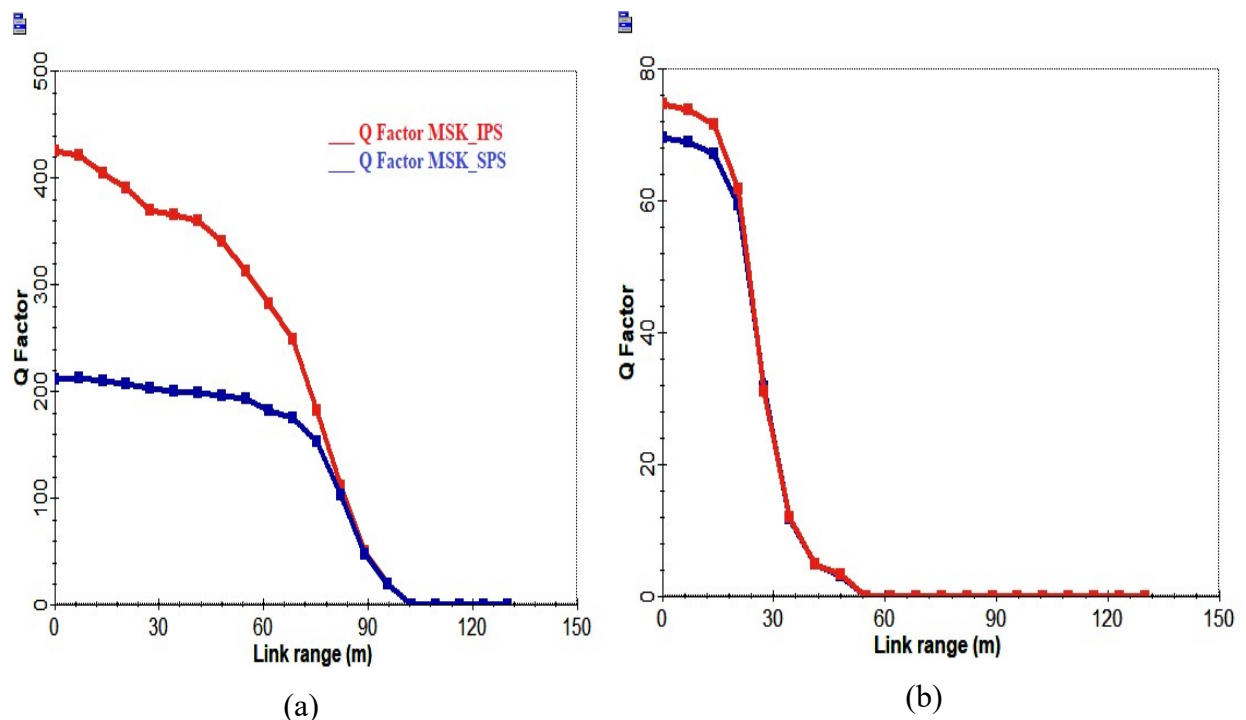
#### **3.4.1 Confirmation du choix du modulateur**

Étant donné que le modulateur MSK\_DPS est limité en débit [47], dans cette section nous avons fait une étude de la performance d'une liaison UVLC pour deux modulateurs (MSK-SPS et MSK-IPS), dans des conditions aquatiques différentes : l'eau clair de l'océan et l'eau côtière, en incluant les paramètres associés.

|                                     |             |
|-------------------------------------|-------------|
| Débit binaire                       | 100 Mbits/s |
| Puissance optique                   | 30 W        |
| Température                         | 10°C        |
| Salinité                            | 3.5%        |
| Longueur d'onde                     | 450 nm      |
| Distance horizontale                | 0-120 m     |
| Profondeur de l'émetteur/ récepteur | 20 m        |
| Angle intérieur $\theta_{min}$      | 0°          |
| Angle extérieur $\theta_{max}$      | 68°         |
| Diamètre d'ouverture de l'émetteur  | 5 cm        |
| Diamètre d'ouverture de récepteur   | 20 cm       |

**Tableau 3.1** : Paramètres utilisés pour la comparaison entre MSK-SPS et MSK-IPS

La Figure 3.2 montre la variation du facteur Q en fonction de la distance de transmission pour des systèmes NLOS UVLC utilisant les deux modulateurs MSK\_IPS et MSK\_SPS dans des environnements aquatiques différentes ; océanique clair et côtière.



**Figure 3.2** : Variation du facteur Q en fonction de la distance horizontale dans l'eau claire (a) et l'eau côtière (b)

Les résultats de la figure 3.2 montre clairement que la modulation MSK\_IPS démontre une performance supérieure à MSK\_SPS dans les différents environnements étudiés notamment pour l'eau claire. Dans l'eau côtier, les deux modulations présentent des performances similaires pour des distances supérieures à 30 m, avec une dégradation rapide due aux fortes perturbations caractérisant ce type d'eau. Ces résultats indiquent que la modulation MSK\_IPS est le mieux adaptée pour les communications sous-marine par lumière visible NLOS UVLC.

Ainsi la modulation MSK-IPS est choisie dans la suite de ce chapitre.

### 3.5 Architecture générale du système NLOS UVLC utilisant la modulation MSK\_IPS

Dans ce chapitre, nous utiliserons uniquement des liens horizontaux comme illustré dans la Figure 3.3 avec un canal NLOS pour évaluer les performances du système UVLC proposé. En NLOS, le scénario de communication implique une obstruction sur le trajet direct entre l'émetteur et le récepteur. Cette obstruction peut provenir d'interactions entre les ondes lumineuses et les particules ou impuretés présentes dans l'eau, telles que les minéraux, le phytoplancton, les débris et les bulles.

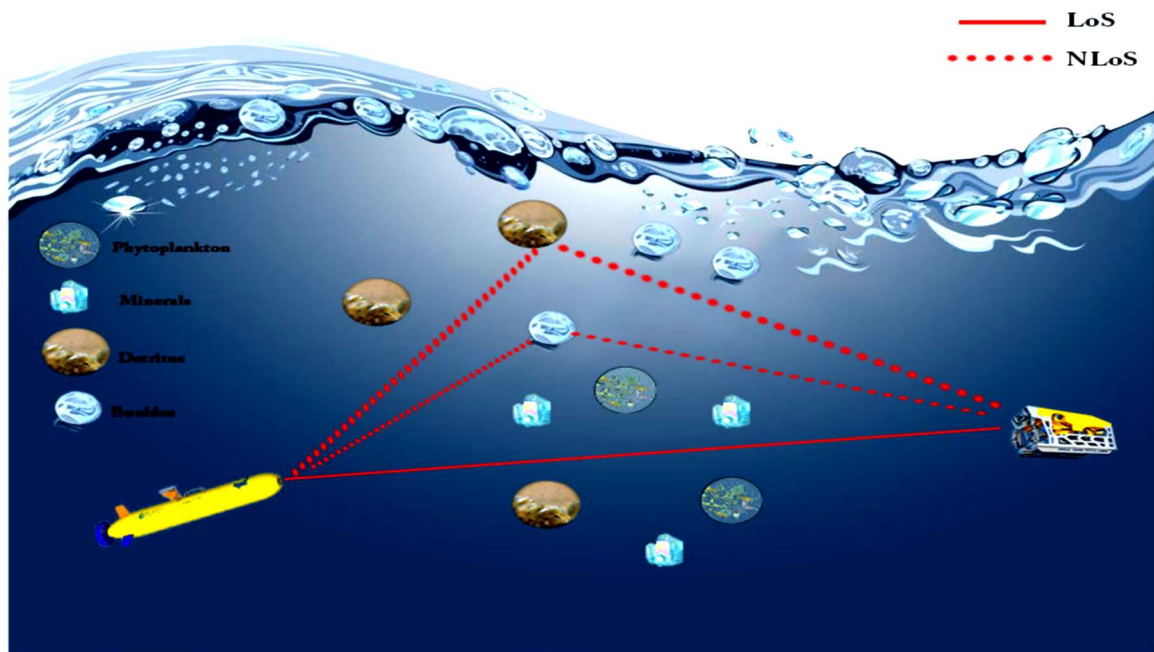
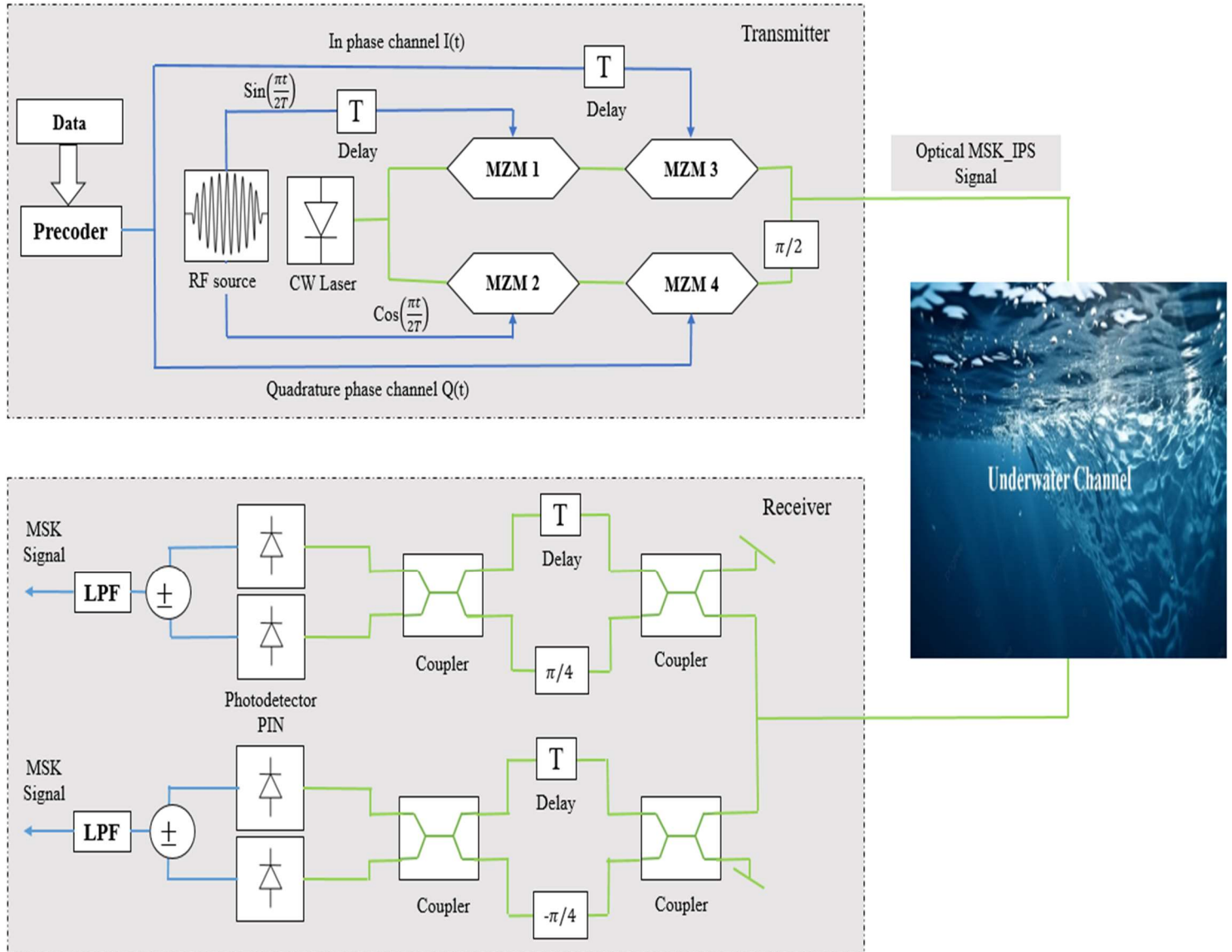


Figure 3.3 : Liens NLOS horizontaux [7].

Le système proposé NLOS UVLC avec modulateur MSK\_IPS est composé de trois parties essentielles montrées sur la Figure 3.4 à savoir l'émetteur, le canal sous-marin (NLOS) et le

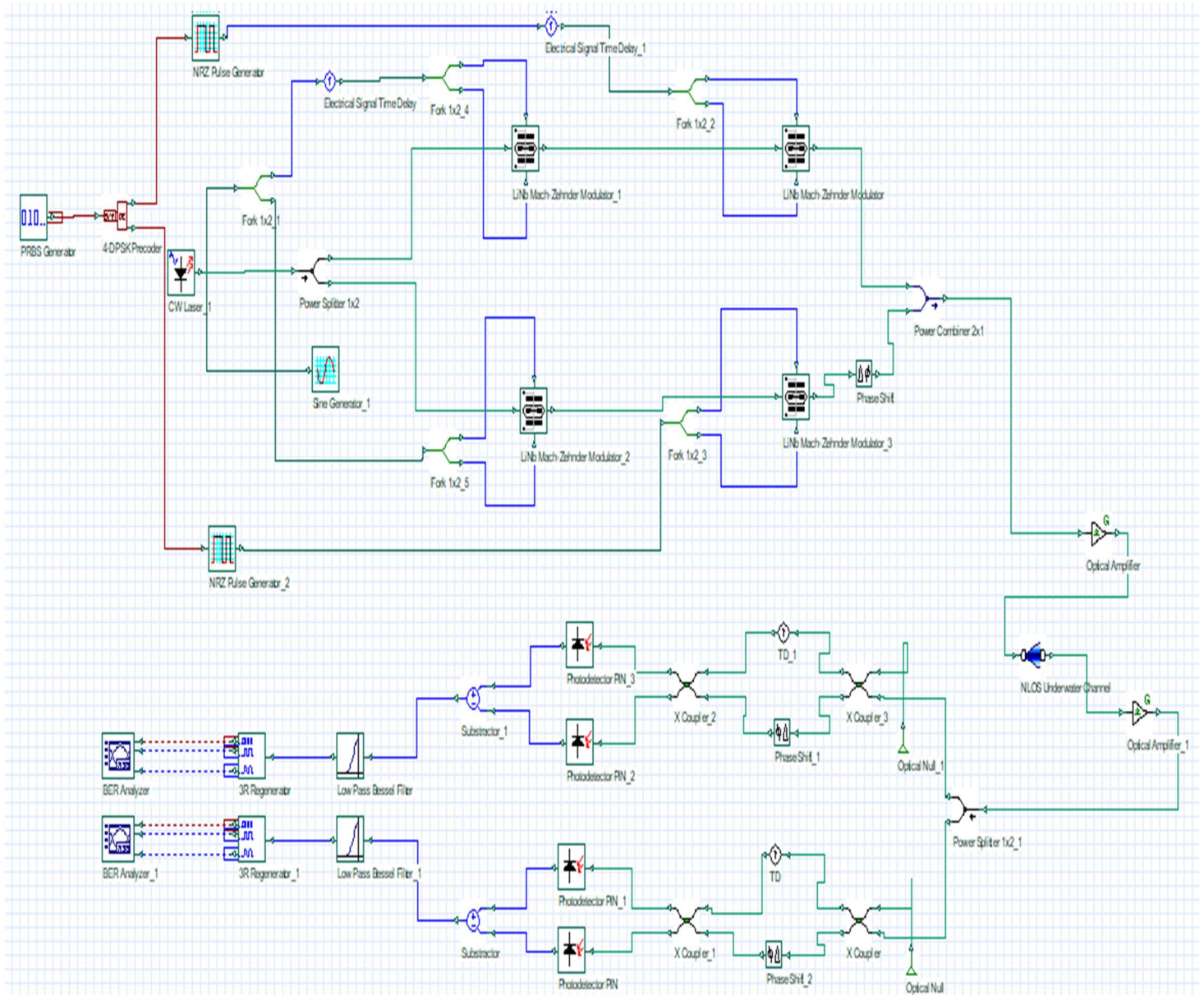
récepteur, qui utilisent divers composants tels que le laser continue (**CW laser**) utilisée comme source lumineuse, des MZM pour la mise en forme des impulsions et la modulation, des splitters, combineur de signaux, des coupleurs, des photo-détecteurs PIN etc...



**Figure 3.4 :** Architecture du système NLOS UVLC avec modulateur MSK\_IPS.

### 3.6 Présentation de la liaison NLOS UVLC avec modulateur MSK\_IPS sous OptiSystem

Pour évaluer les performances du système proposé, nous l'avons conçu et simulé à l'aide du logiciel OptiSystem comme illustré à la Figure 3.5. Dans cette section nous présentons de manière plus détaillée les différentes composantes susmentionnées.



**Figure 3.5 :** Architecture du système NLOS UVLC avec modulateur MSK\_IPS sous OptiSystem.

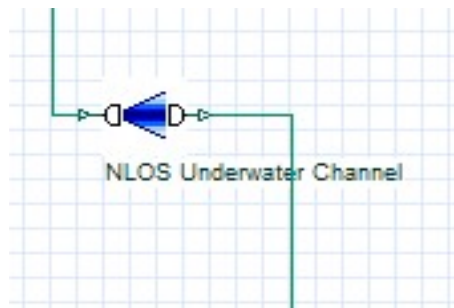
### 3.6.1 L'émetteur optique

Du côté de l'émetteur la séquence de bits générée par le PRBS Generator (Pseudo-Random Bit Sequence Generator) est directement appliquée à l'entrée d'un pré-codeur (4-DQPSK Precoder) pour générer deux séquences de symboles parallèles I et Q, qui à partir du codage NRZ (Non-Return-to-Zero) sont convertis en signaux électriques adaptés à la modulation. Les signaux en phase I et en quadrature Q sont transmis au modulateur MSK\_IPS constitué de 4 modulateurs Mach-Zehnder à niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>) (MZM1, MZM2, MZM3 et MZM4). Un signal sinusoïdal (source RF) de fréquence  $f = \text{débit binaire}/4 \text{ Hz}$  et de déphasage de  $-90^\circ$  est utilisé dans

un premier temps pour moduler simultanément la porteuse optique délivré par une diode laser à une longueur d'onde 450 nm, à travers les modulateurs MZM1 et MZM2. Un délai électrique  $T$  ( $2/\text{bit rate}$ ) est introduit entre les différents chemins pour assurer la synchronisation. Les signaux à la sortie de ces deux MZM sont ensuite modulés avec les signaux électriques à travers les modulateurs MZM3 et MZM4 ; puis un déphasage de  $90^\circ$  est induit sur l'un des chemins avant d'être combiné, amplifié et transmis à travers le canal NLOS.

### 3.6.2 Le canal sous-marin NLOS

Le signal émis par l'émetteur se propage à travers le canal sous-marins NLOS, au cours de cette propagation le signal se trouve dégrader à cause des propriétés du milieu aquatique. La Figure 3.6 illustre un canal sous- marin NLOS sous OptiSystem.



**Figure 3.6 :** Canal sous-marin NLOS sous OptiSystem.

### 3.6.3 Le récepteur

À la sortie du canal NLOS, le signal optique est d'abord amplifié, puis dupliqué pour être traité par deux interféromètres à retard de Mach-Zehnder (MZDI), dans le but d'extraire les composantes I (In-phase) et Q (Quadrature) du signal.

Chaque interféromètre est constitué de deux coupleurs X, d'un bloc de retard temporel égal à  $T = 2/\text{bit rate}$ , et d'un déphaseur de  $\pm 45^\circ$ , selon la branche considérée. Le premier coupleur divise le signal optique en deux voies, où l'une est retardée et l'autre subit un déphasage. Un signal local de référence de valeur nulle (généralisé par le composant Optical Null) est utilisé pour permettre la référence de phase dans l'interférence. Ces signaux, désormais déphasés et désynchronisés, sont recombinaés à l'aide du second coupleur, créant une interférence entre le symbole actuel et le symbole précédent. Cela permet de transformer l'information de phase différentielle en intensité optique. Chaque sortie est ensuite envoyée vers un bloc de détection équilibrée, composé de deux photo-détecteurs PIN ayant une sensibilité de  $1 \text{ A/W}$ . Ces photo-détecteurs convertissent les

signaux optiques en signaux électrique, qui sont ensuite soustraits pour améliorer le rapport signal/bruit et extraire les données utiles.

Les signaux résultants passent par des filtres passe-bas de type Bessel, dont le rôle est de supprimer les composantes de fréquence indésirable, assurant ainsi une meilleure qualité du signal. Enfin, des blocs de visualisation (BER Analyzer) et de régénération 3R sont utilisés pour restaurer le signal reçu et évaluer sa qualité.

### 3.7 Résultats de la simulation et discussions

Dans cette partie, un système UOWC utilisant la modulation MSK-IPS est simulé et analysé à l'aide du logiciel commercial OptiSystem. Ses performances sont évaluées à différentes distances, dans différents types d'eau, et différentes valeurs de débits. Le tableau suivant récapitule tous les paramètres utilisés pour la simulation.

|                                                  |                                                                                 |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Débit binaire</b>                             | 100 Mbits/s, 1 Gbits/s, 10 Gbits/s, 40 Gbits/s                                  |
| <b>Puissance</b>                                 | 1m W - 30 W                                                                     |
| <b>Température</b>                               | 10°C                                                                            |
| <b>Salinité</b>                                  | 3.5%                                                                            |
| <b>Type d'atténuation (c)</b>                    | Mer Pure (Pure Sea), Océan Clair (Clear Ocean) et Océan Côtier (Coastal Ocean). |
| <b>Longueur d'onde</b>                           | 450 nm                                                                          |
| <b>Distance horizontale</b>                      | 1-120 m                                                                         |
| <b>Profondeur de l'émetteur/ récepteur</b>       | 20 à 100 m                                                                      |
| <b>Angle intérieur <math>\theta_{min}</math></b> | 0°                                                                              |
| <b>Angle extérieur <math>\theta_{max}</math></b> | 68°                                                                             |
| <b>Pertes supplémentaires</b>                    | 0 dB                                                                            |
| <b>Diamètre d'ouverture de l'émetteur</b>        | 5 cm                                                                            |
| <b>Gain de l'émetteur</b>                        | 10 dB                                                                           |
| <b>Efficacité optique de l'émetteur</b>          | 0.9                                                                             |
| <b>Diamètre d'ouverture de récepteur</b>         | 20 cm                                                                           |
| <b>Gain du récepteur</b>                         | 10 dB                                                                           |
| <b>Efficacité optique du récepteur</b>           | 0.9                                                                             |

**Tableau 3.1** : Paramètres utilisés pour l'étude des performances du système

Dans un premier, la séquence binaire générée à 100 Mbits/s par le générateur de séquence binaire pseudo-aléatoire est divisé en deux séquences parallèles en quadrature (I et Q) puis sont codées NRZ comme illustré dans la Figure 3.7, avant d'être modulé avec la porteuse optique par les MZM3 et MZM4 puis combiné ensemble pour obtenir un signal MSK\_IPS sinusoïdal comme on peut le voir sur la Figure 3.8.

On peut voir également que le signal MSK\_IPS à la sortie du modulateur (Figure 3.9) a une phase continue, une enveloppe constante et un spectre propre (spectre avec des lobes secondaires réduits) illustré sur la Figure 3.11 comme mentionné dans la référence [39].

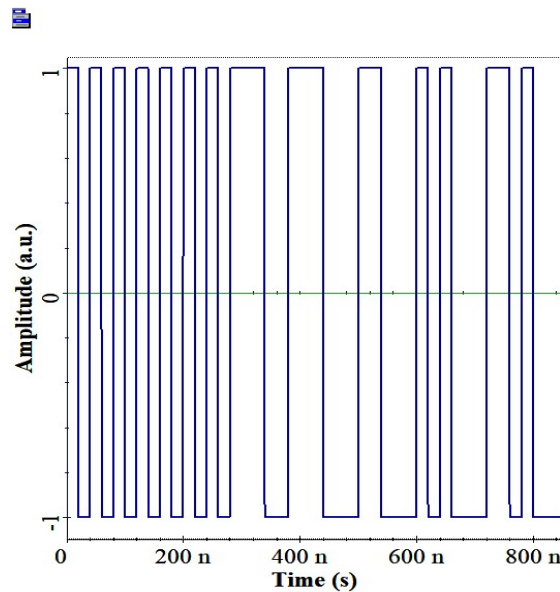


Figure 3.7 : Signal binaire d'origine.

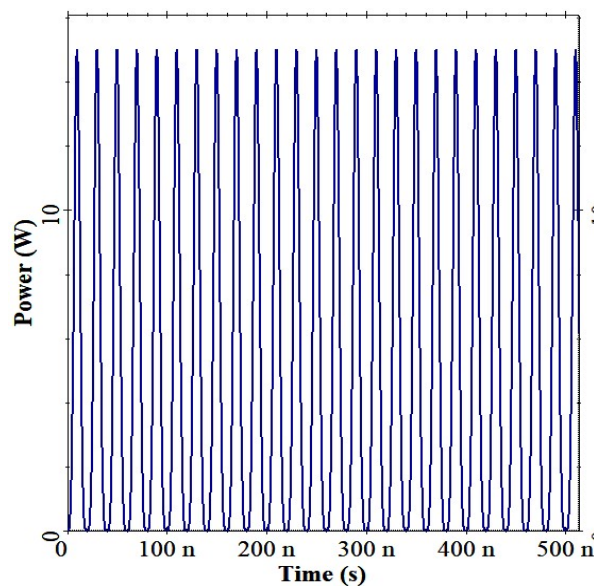


Figure 3.8 : Porteuse optique modulé par le signal sinusoïdal.

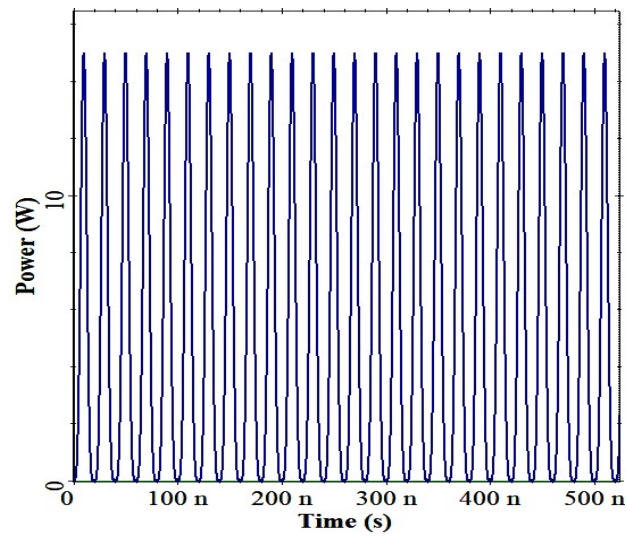


Figure 3.9 : Signal optique à la sortie du modulateur MSK\_IPS.

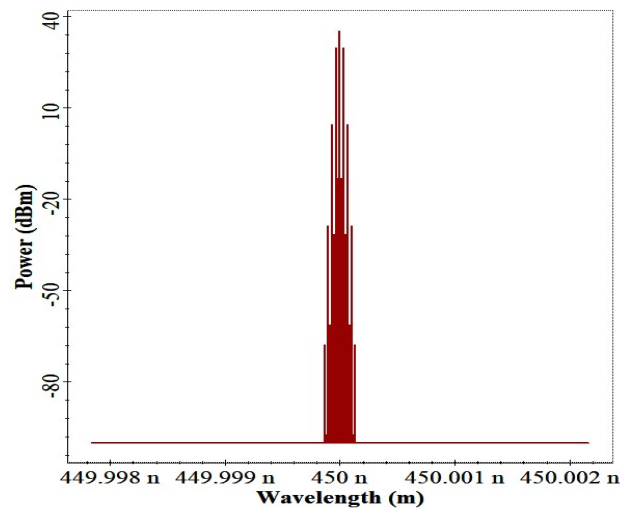


Figure 3.10: Spectre de la porteuse optique continue modulée par le signal sinusoïdal.

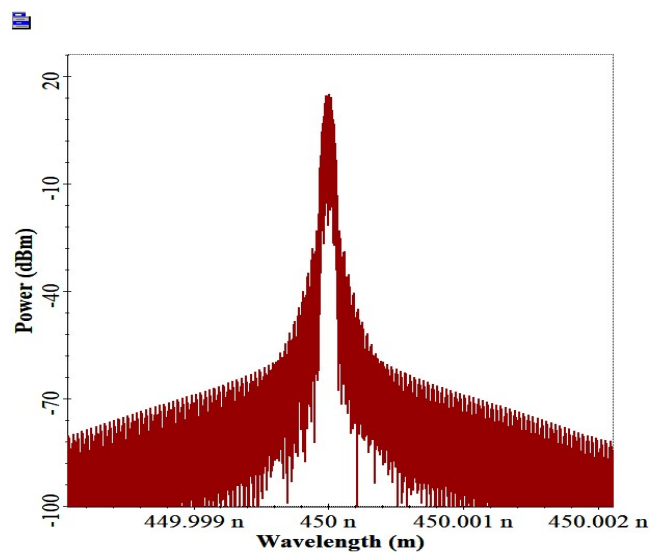


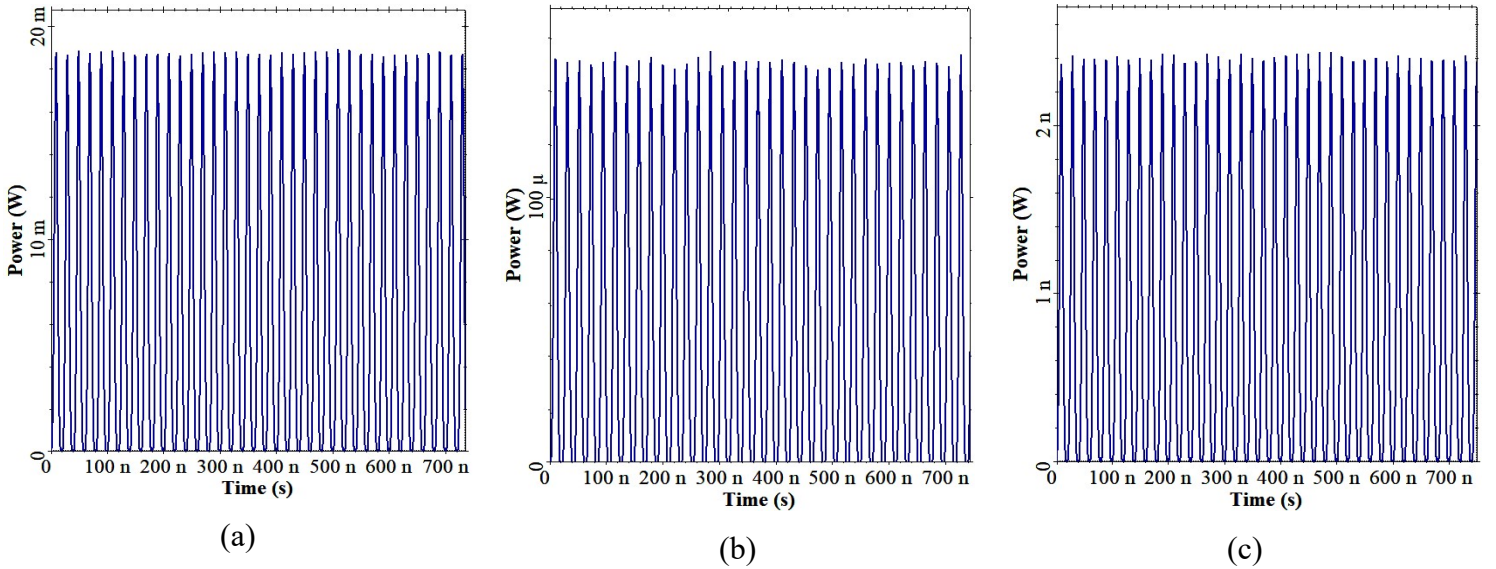
Figure 3.11 : Spectre de signal à la sortie du modulateur MSK\_IPS.

La porteuse optique est d'abord modulée par un signal sinusoïdal de fréquence égal  $\frac{1}{4}$  du débit binaire et a une phase égale à  $-90^\circ$  au niveau des MZM1 et MZM2.

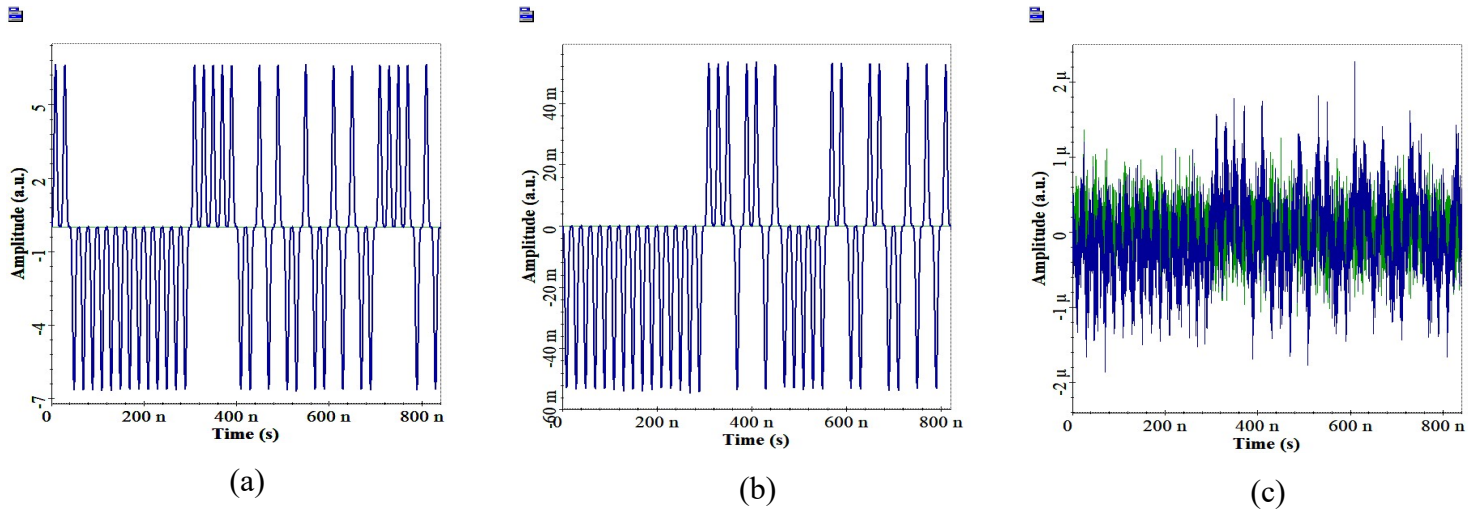
Sur les Figure 3.10 et Figure 3.11 on peut observer les spectres de la porteuse optique continue modulée par le signal sinusoïdal et celui de la porteuse optique sinusoïdale modulée en phase à la sortie du modulateur MSK\_IPS.

Les Figures 3.12, 13 et 14 illustrent les résultats de transmission du signal par le système proposé dans différents types d'eau Mer Pure (Pure Sea), Océan Clair (Clear Ocean) et Océan Côtier (Coastal Ocean) pour une distance sous-marine de 20 m. Figure 3.12 montre que les signaux sont bien captés par le récepteur mais avec des niveaux de puissance différents due à la différence entre les atténuations pour chaque type d'eau. Ces signaux sont d'abord démodulés (Figures 3.13) puis filtrés pour réduire le bruit associé notamment dans l'environnement côtier (Coastal Ocean) (Figures 3.14).

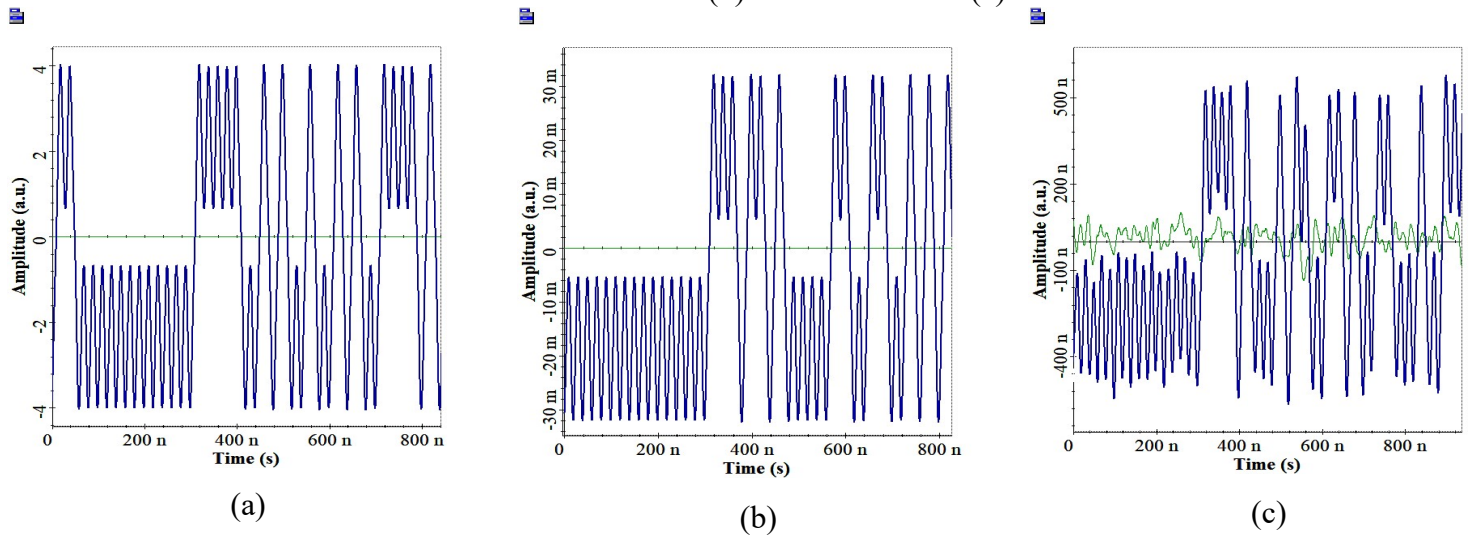
De plus, les diagrammes de l'œil pour les différents types d'eau Pure Sea, Clear Ocean et Coastal Ocean sont affichés dans la Figure 3.15, respectivement. Étant donné que des ouvertures de l'œil plus larges sont observées à l'eau claire, le système NLOS UVLC proposé assure une bonne réception des signaux.



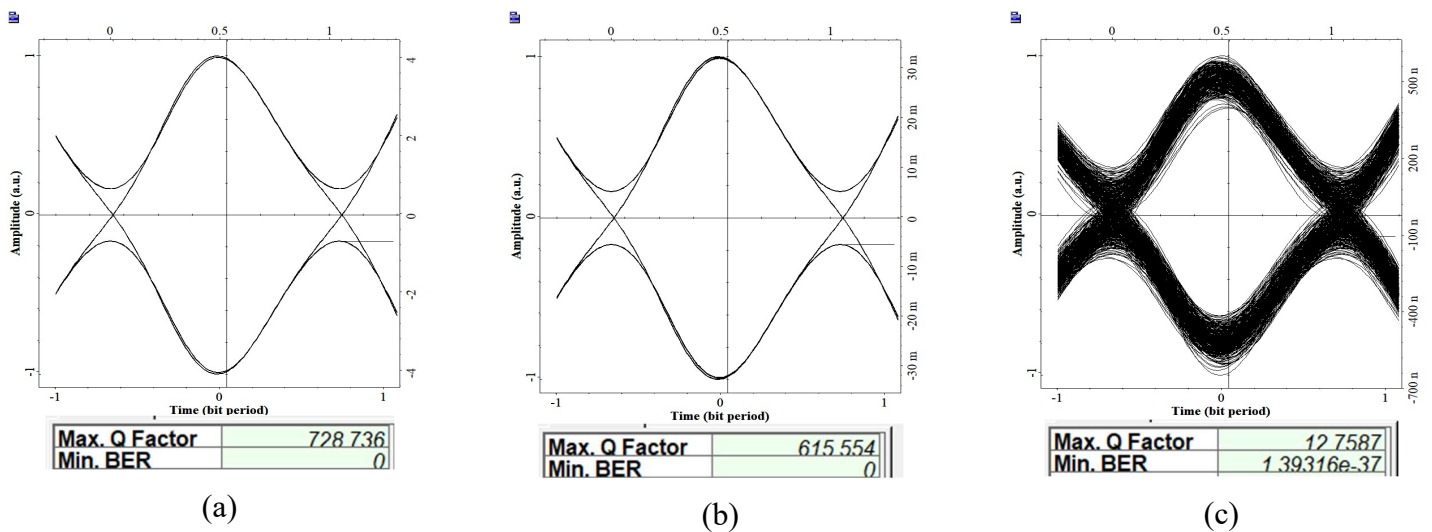
**Figure 3.12 :** Signaux MSK-IPS à la sortie du canal NLOS dans l'environnement Pure Sea, (a) Clear Ocean (b) et Coastal Ocean(c).



**Figure 3.13** : Signaux reçus démodulés avant le filtrage pour l'environnement Pure Sea, (a) Clear Ocean (b) et Coastal Ocean(c).



**Figure 3.14** : Signaux reçus démodulés après le filtrage pour l'environnement Pure Sea, (a) Clear Ocean (b) et Coastal Ocean(c).

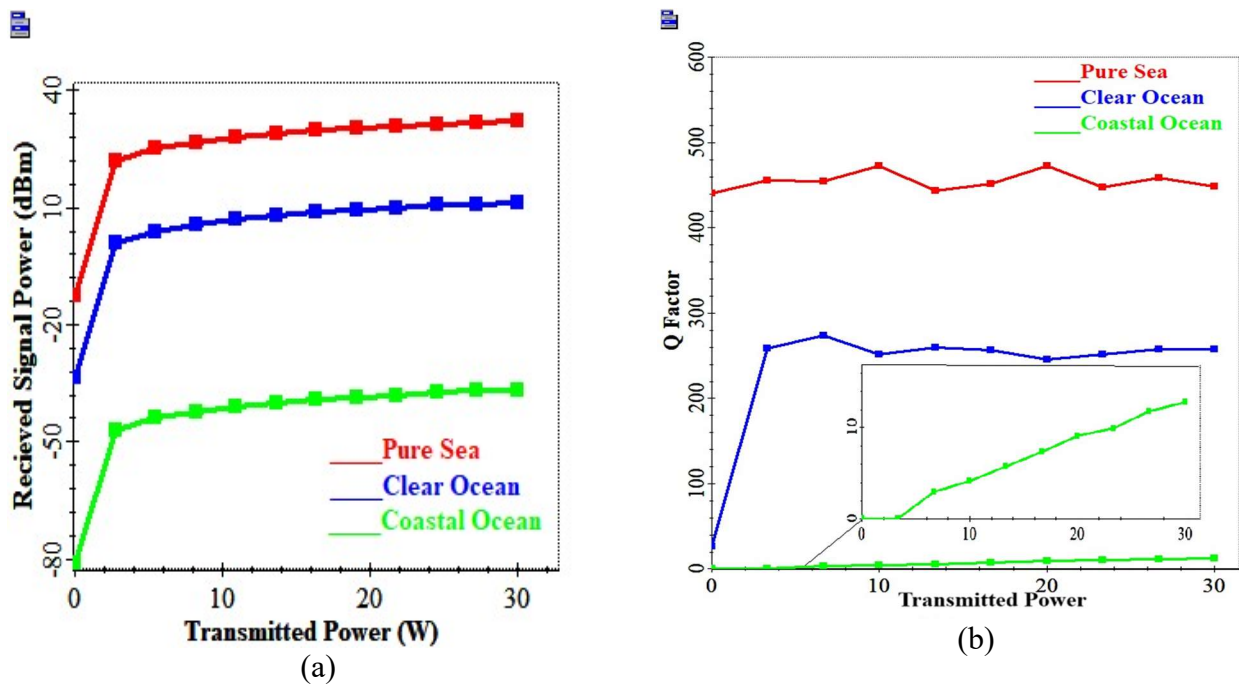


**Figure 3.15** : Diagrammes de l'œil et facteur Q dans l'environnement Pure Sea, (a) Clear Ocean (b) et Coastal Ocean(c).

### 3.8 Effet de différents paramètres sur la performance du système NLOS UVLC

#### 3.8.1 Effet de la puissance optique transmise

La Figure 3.16 montre la variation de la puissance reçue et du facteur Q en fonction de la puissance optique transmise par la diode laser dans trois types d'eau différents Pur Sea (PS), Clear Ocean (CLO), et Coastal Ocean (CSO). Dans cette expérience, la puissance transmise a été variée de 1 mW à 30 W. La distance de transmission entre l'émetteur et le récepteur a été fixée à 20 m, et le débit binaire à 100 Mbits/s. Le reste des paramètres restent les mêmes.



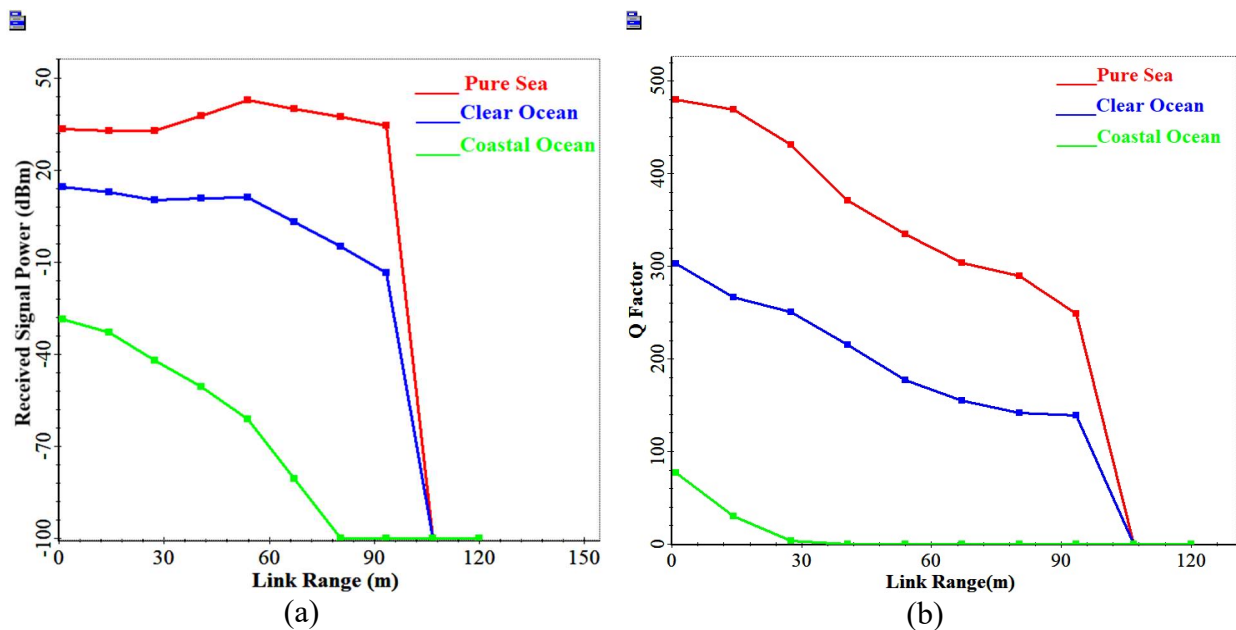
**Figure 3.16 :** Variation de la puissance du signal reçu (a) et du facteur Q (b) en fonction de la puissance optique transmise

D'après les résultats de la Figure 3.16, il est très clair que l'augmentation de la puissance optique transmise a un effet significatif sur les performances d'un système NLOS UVLC. On peut constater sur la Figure 3.16.a que le système NLOS UVLC fonctionnant dans l'eau pure (PS) présente les meilleures performances, avec une puissance reçue plus élevée, variant de -18 à 40 dBm. Le système dans CLO montre des performances intermédiaires, avec une puissance reçue allant de -35 à 10 dBm, tandis que le système dans CSO affiche les pires performances, avec une puissance reçue beaucoup plus faible, de -80 à -35 dBm. Les différences de puissance reçue sont principalement dues à la variation de la pureté de l'eau qui affecte fortement l'atténuation du

signal: plus l'eau est turbide (comme dans les zones côtières CSO), plus le signal est atténué. Ces résultats sont confirmés par les mesures des facteurs Q qui reflètent la qualité de la réception du signal (figure 3.16.b). Un facteur Q élevé (environ 460) est atteint dans l'eau PS même avec de faibles puissances, tandis que dans CLO, le facteur Q augmente de 20 à environ 360 avec l'augmentation de la puissance. Cependant le système NLOS UVLC dans l'environnement CSO fonctionne mieux pour des puissances optiques transmises élevées pour obtenir une puissance reçue supérieur au seuil de récepteur, et un facteur Q supérieur à 6. Pour une puissance transmise de 30 W, un facteur Q d'environ 13 est atteint dans CSO. Cette différence dans la valeur de facteur Q indique également une meilleure réception du signal dans l'environnement PS et CLO que CSO. On peut conclure ainsi que la puissance reçue élevée garantit donc une récupération fiable des informations transmises au niveau du récepteur.

### 3.8.2 Effet de l'atténuation dans les milieux sous-marins

La figure 3.17 représente la variation de la puissance reçue et le facteur de qualité en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur (Link range) pour des différentes valeurs d'atténuation aquatique dans trois types d'eau différents, PS (0.043 /m), CLO (0.151 /m), et CSO (0.398 /m). Dans cette expérience, la distance a été variée de 1 m à 120 m. Le débit binaire a été fixé à 100 Mbits/s et la puissance optique transmise à 30 W. Le reste des paramètres restent les mêmes.



**Figure 3.17 :** Variation de la puissance du signal reçu (a) et du facteur Q (b) en fonction de la distance de transmission

Nous avons constaté, à partir des résultats de la figure 3.17, que l'atténuation dans un milieu aquatique provoque une diminution de la puissance du signal à mesure que la distance augmente, ce qui réduit la valeur du facteur  $Q$  et diminue les performances du système. Plus la distance parcourue par le signal dans l'eau est grande, plus l'atténuation est importante, ce qui entraîne une diminution significative de la puissance reçue par le récepteur notamment dans les eaux avec une atténuation élevée (CSO) que pour celles avec une atténuation plus faible (PS) (figure 3.17.a et b). Par conséquent, le facteur  $Q$  diminue également, reflétant une dégradation de la qualité du signal, ce qui entraîne une diminution de la portée de détection. La valeur du facteur  $Q$  atteint également une valeur  $Q = 6$  à une distance de 106 m dans le cas du PS, 104 m dans le cas du CLO, et 23 m dans le cas du CSO (figure 3.17.c).

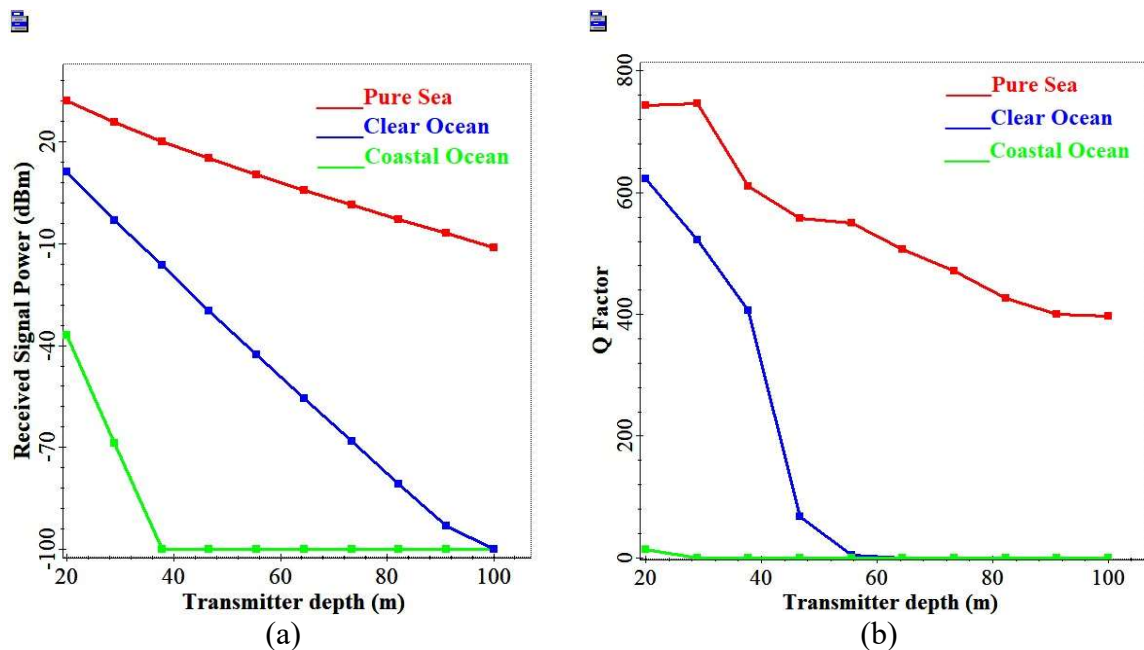
Ces résultats suggèrent que la dégradation significative de la portée maximale du système, en particulier pour l'eau PS, est due à la turbulence du milieu. Cette turbulence perturbe la propagation du signal, réduisant ainsi la distance maximale à laquelle il peut être détecté. Selon la référence [23], cela est due au fait que l'eau PS ne contient que des sels dissous et aucune particule en suspension, il présente la plus faible atténuation de la lumière  $c(\lambda) = 0.043/\text{m}$ , ce qui signifie que le signal peut théoriquement se propager plus loin sans être absorbé.

### 3.8.3 Effet de la profondeur de l'émetteur / récepteur

La Figure 3.18 illustre la variation de la puissance reçue et du facteur  $Q$  en fonction de la profondeur de l'émetteur / récepteur dans trois types d'eau différents (PS, CLO, et CSO). Dans cette expérience, la profondeur de l'émetteur / récepteur a été variée de 20 m à 100 m. La distance de transmission entre l'émetteur et le récepteur a été fixée à 20 m, la puissance optique transmise à 30 W et le débit binaire à 100 Mbits/s. Le reste des paramètres restent les mêmes.

On observe sur cette figure que la profondeur de l'émetteur / récepteur dans un système UVLC influence directement la puissance et la qualité du signal reçu dans tous les environnements aquatiques étudiés. Plus la profondeur est grande, plus la lumière peut être absorbée, ce qui entraîne une diminution significative de la puissance reçue par le récepteur notamment dans les eaux CLO et CSO (figure 3.18.a). Par conséquent, le facteur  $Q$  diminue également, reflétant une dégradation significative de la qualité du signal dans ces deux derniers types d'eaux. Le système UVLC dans l'eau PS est plus robuste, fonctionnant jusqu'à plus de 100 m de profondeur avec un facteur de qualité au-delà de 400, tandis que le CLO et le CSO sont limités à des faibles profondeurs allant jusqu'à 26 et 58 m, respectivement, avec des facteurs  $Q$  sensiblement égal à 6 (figure 3.18.b et c). Ces résultats démontrent bien que la profondeur optimale de l'émetteur /

récepteur varie considérablement selon le type d'eau. Cette variation est due au fait que les profondeurs sous-marines n'ont pas du tout les mêmes concentrations en chlorophylle, matière organique..., ces derniers jouent un rôle dans la turbidité et la diffusion de la lumière. Effectivement d'après les références [4] et [14], selon les niveaux habituels de chlorophylle, l'eau pure des mers PS et des océans clairs CLO est généralement reconnue comme non turbide, alors que les eaux côtières CSO sont souvent perçues comme turbides et la diffusion de la lumière est forte dans l'eau océanique claire CLO en raison de sa densité accumulée en particules comme les éléments minéraux, les sels dissous et d'autres, par rapport à l'eau de mer pure PS.

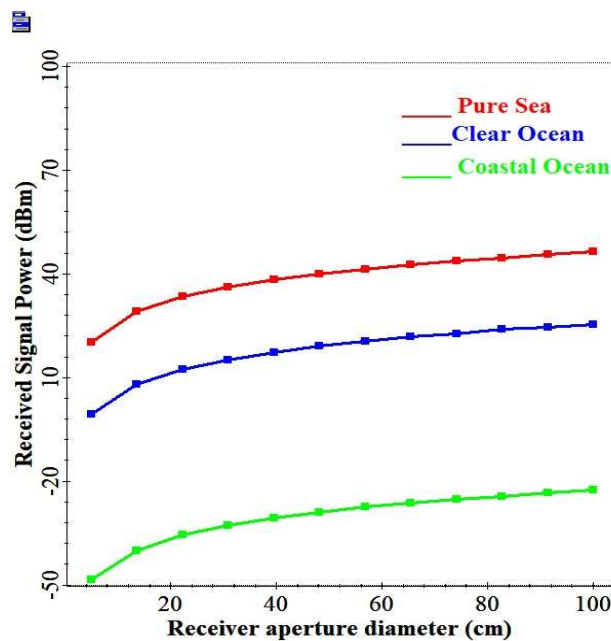


**Figure 3.18** : Variation de la puissance du signal reçu (a) et du facteur Q (b) en fonction de la profondeur de l'émetteur/récepteur

### 3.8.4 Effet de la variation du diamètre de l'ouverture du récepteur

La figure 3.19 illustre la variation de la puissance du signal reçu en fonction du diamètre d'ouverture du récepteur UVLC dans trois types d'eau différents (PS, CLO, et CSO). Dans cette expérience, le diamètre d'ouverture du récepteur a été varié de 5 cm à 100 cm. La distance de transmission entre l'émetteur et le récepteur ainsi que la profondeur ont été fixées à 20 m, la puissance optique transmise à 30 W et le de bit binaire à 100 Mbits /s. Le reste des paramètres restent les mêmes.

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que l'augmentation du diamètre d'ouverture du récepteur dans un système NLOS UVLC améliore la puissance du signal détecté dans tous les environnements aquatiques étudiés notamment dans les environnements troubles CSO. Cette amélioration est due à une meilleure capture de la lumière diffusée par l'eau. Ces résultats sont en accord avec les résultats de la référence [44], où l'augmentation du diamètre d'ouverture du récepteur a permis ainsi d'augmenter la portée maximale de la transmission. Cependant, un grand diamètre d'ouverture du récepteur peut également capter plus de bruit environnant, réduisant ainsi le rapport signal /bruit (SNR) et augmentant ainsi les erreurs de communication. Le choix du diamètre d'ouverture du récepteur UVLC est donc dépendant de la qualité de l'eau et des exigences du système (distance de transmission, débit binaire, etc).



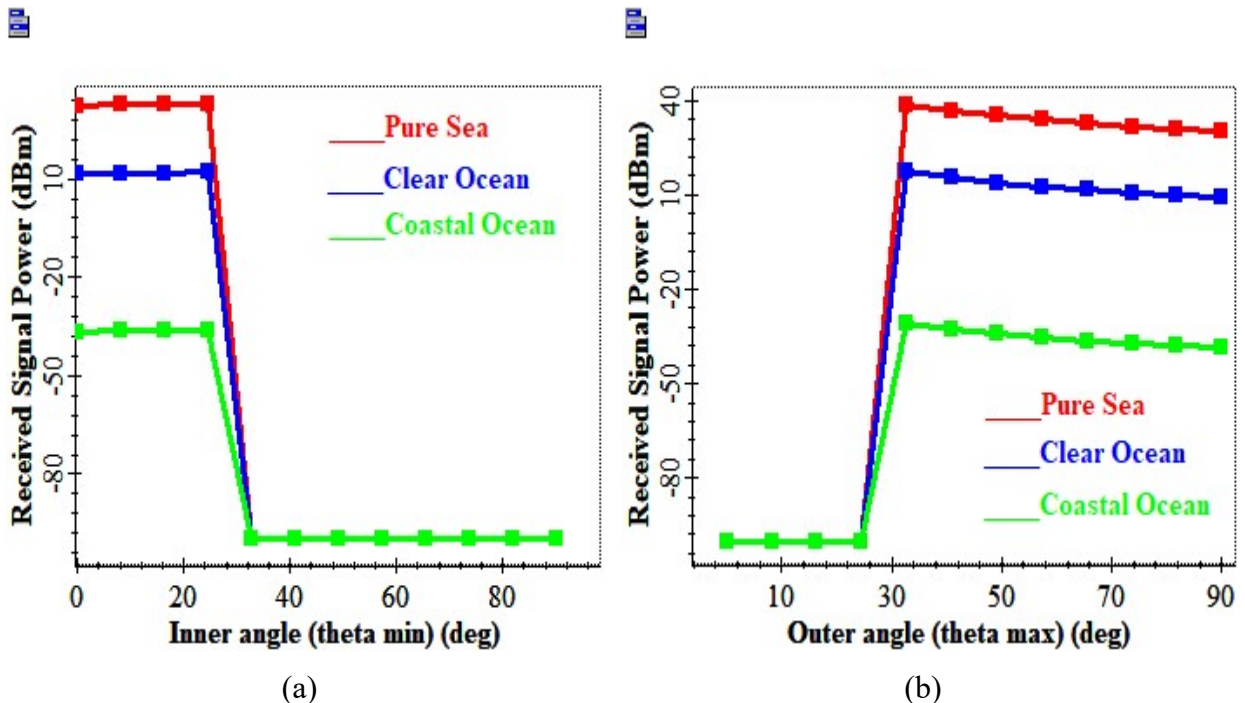
**Figure 3.19 :** Variation de la puissance du signal reçu en fonction du diamètre d'ouverture du récepteur.

### 3.8.5 Effet de la variation des angles d'émission/réception (angles intérieur $\theta_{\min}$ et extérieur $\theta_{\max}$ )

La figure 3.20 illustre la variation de la puissance du signal reçu en fonction des angles d'émission (angles intérieur  $\theta_{\min}$  et extérieur  $\theta_{\max}$ ) dans trois types d'eau différents (PS, CLO, et CSO). Dans cette expérience, les angles intérieur  $\theta_{\min}$  et extérieur  $\theta_{\max}$  ont été variée de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ , Chacun. La distance de transmission entre l'émetteur et le récepteur ainsi que la profondeur ont

été fixée à 20 m, la puissance optique transmise à 30 W et le débit binaire à 100 Mbits /s. Le reste des paramètres restent les mêmes.

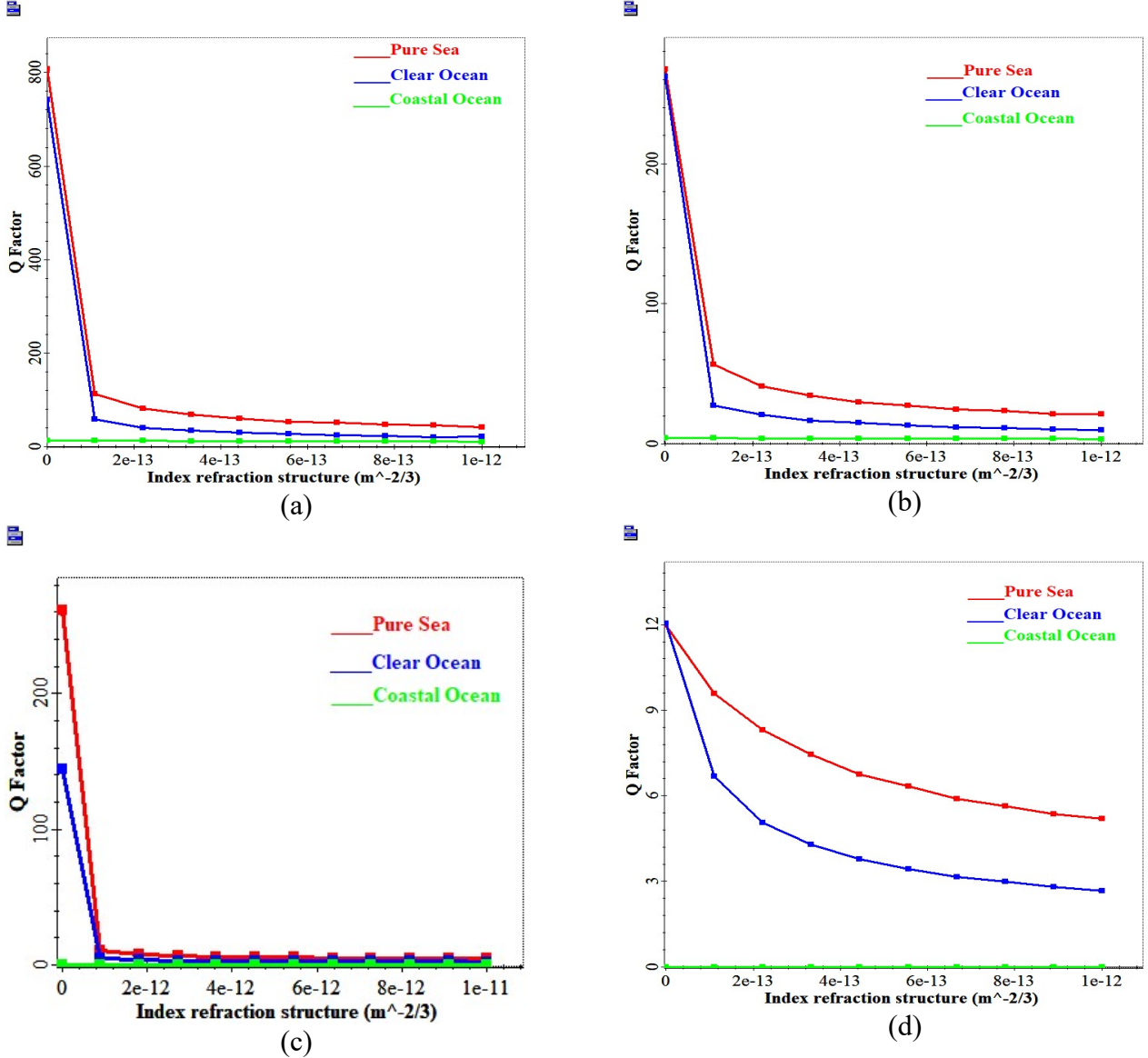
Les résultats obtenus montrent qu'un angle intérieur (angle sous lequel émet l'émetteur)  $\theta_{\min}$  étroit ( $< 26^\circ$ ) permet une bonne qualité de transmission dans le système NOLS UVLC, tandis qu'un angle extérieur (angle de réception) suffisamment large permet de maintenir une bonne qualité de transmission dans tous les environnements aquatiques étudiés. En effet lorsque l'angle d'émission de l'émetteur est étroit la puissance transmise dans une direction est plus concentrée et plus directive, ce qui entraîne une augmentation de la puissance de signal reçu (figure 3.20.a). Selon la référence [48], une diminution de l'angle  $\theta_{\min}$  entraînerait ainsi une augmentation de la distance maximale atteignable. Alors que si  $\theta_{\min}$  est large la lumière se disperse diminuant ainsi la puissance du signal reçu et la portée maximale atteignable. De même on peut observer sur la figure 3.20.b que plus l'angle extérieur  $\theta_{\max}$  est large plus la puissance du signal reçu augmente, on peut en déduire qu'en augmentant ce paramètre le champ de vision du récepteur augmente et donc il captera plus de lumière ce qui augmentera encore plus le signal. On peut conclure, qu'un compromis entre un angle d'émission étroit pour la concentration du signal optique et un angle de réception large pour la capture maximale de la lumière est crucial pour optimiser la qualité de la transmission dans un système NLOS UVLC.



**Figure 3.20 :** Variation de la puissance du signal reçu en fonction de l'angle intérieur (a) et de l'angle extérieur (b)

### 3.8.6 Effet de la turbulence aquatique (l'indice de réfraction de la structure $C_n^2$ )

La figure 3.21 illustre la variation du facteur Q en fonction de la turbulence (indice de réfraction de la structure ( $C_n^2$ )) dans trois types d'eau différents (PS, CLO, et CSO). La variation du facteur Q est observée pour différentes valeurs de débit binaires. Dans cette expérience,  $C_n^2$  a été variée de  $10^{-16}$  à  $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$  [41] pour faible à forte turbulence, respectivement. La distance de transmission entre l'émetteur et le récepteur ainsi que la profondeur ont été fixées à 20 m, la puissance optique transmise à 30 W. Le reste des paramètres restent les mêmes.



**Figure 3.21 :** Variation du facteur Q en fonction de la turbulence (paramètre de l'indice de réfraction de la structure) dans divers types d'eau, pour un débit binaire de 100 Mbits/s (a), 1 Gbits/s (b), 10 Gbits/s (c) et 40 Gbits/s (d).

D'après les résultats obtenus dans la figure 3.21, nous avons constaté que la turbulence affecte très fortement la qualité de la transmission sous-marine. La turbulence introduit des variations aléatoires de l'indice de réfraction du milieu, ce qui provoque la diffusion de la lumière et donc des pertes supplémentaires dans la liaison. En effet, la faible variation de  $C_n^2$  entraîne une dégradation drastique du facteur de qualité Q. Nous pouvons constater également que l'impact de la turbulence est dépendant du type de l'eau et du débit binaire utilisé. L'eau pure PS étant moins sensible à la turbulence que l'eau de mer CLO ou l'eau côtière CSO. En plus, un débit plus élevé est plus sensible aux perturbations causées par la turbulence. Cela peut rendre la communication impossible à un débit au-delà de 10 Gbits/s notamment dans l'eau CSO.

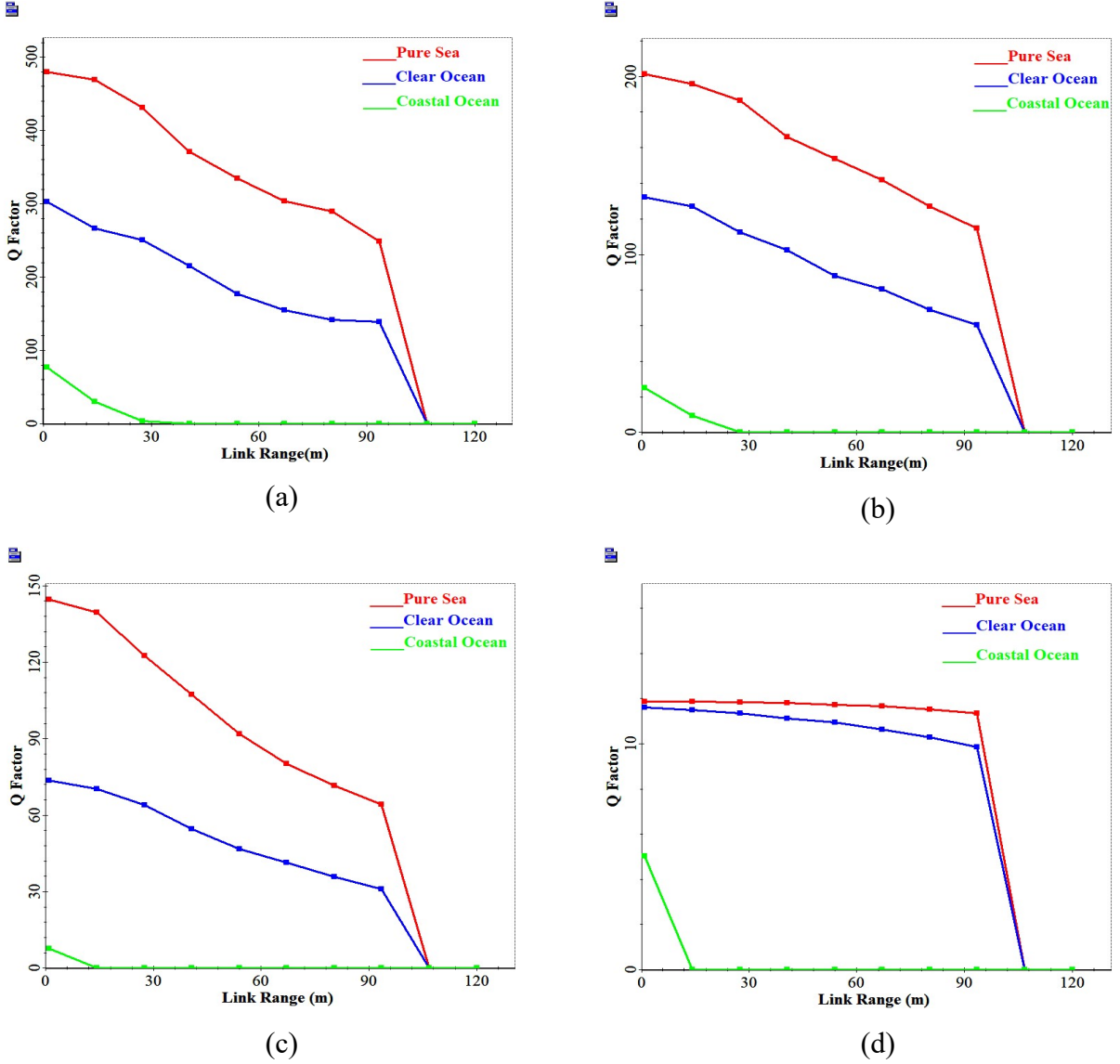
### 3.8.7 Effet de la variation de débit de transmission

Cette étude est divisée en deux parties pour bien évaluer l'impact de la turbulence et le débit binaire sur les performances du système NLOS UVLC proposé.

#### a. Pour faible à moyenne turbulence : $C_n^2 = 0.5 \times 10^{-15} m^{-2/3}$

Les figures 3.22 suivantes montrent la variation de facteur Q en fonction de la distance de transmission dans trois types d'eau différents (PS, CLO, et CSO) soumis à turbulence modéré. La variation de facteur Q est observée pour différentes valeurs de débit binaire : 100 Mbit/s, 1 Gbit/s, 10 Gbit/s et 40 Gbit/s, respectivement.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du débit dans un système NLOS UVLC entraîne une diminution du facteur Q, ce qui signifie une dégradation de la qualité de transmission en fonction de la distance. Le système NLOS UVLC proposé peut atteindre avec succès une distance d'environ 106 m dans l'eau de type PS et d'environ 104 m dans CLO, avec un facteur Q = 6 pour des débits allant de 100 Mbits/s à 40 Gbits/s. Cependant, dans l'eau de type CSO, une plus courte distance est atteinte avec un facteur Q = 6, cette distance est diminuée de 24 m pour un débit de 100 Mbits/s, à 18 m pour un débit de 1 Gbits/s, en suite à 6.25 m pour un débit de 10 Gbits/s. Tandis qu'un débit de 40 Gbits/s peut devenir impossible pour des distances supérieures à 1 m.

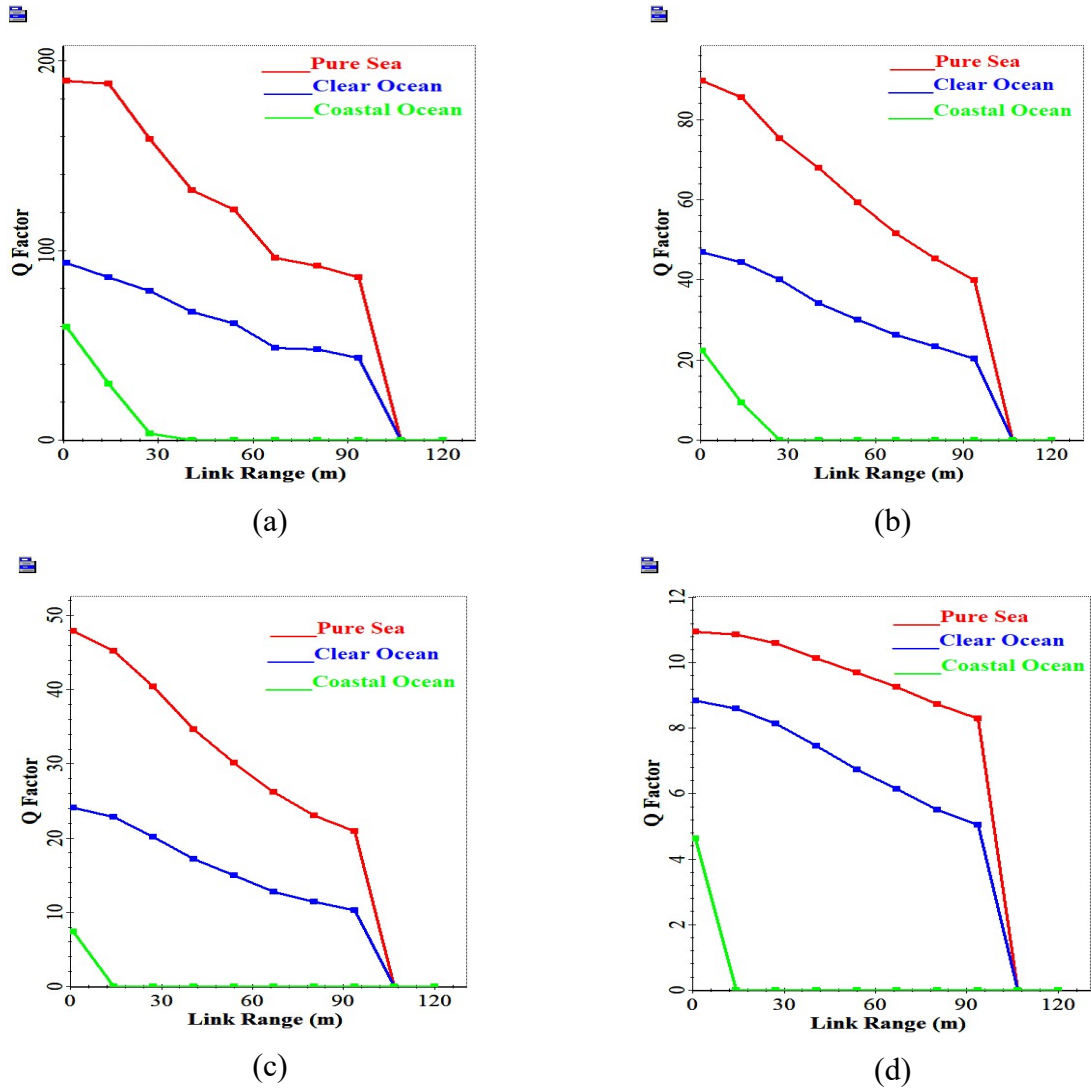


**Figure 3.22 :** Variation du facteur Q en fonction de la distance sous turbulence modérée et pour différents débits binaires (a) 100 Mbits/s, (b) 1 Gbits/s, (c) 10 Gbits/s et (d) 40 Gbits/s.

**b. Pour forte turbulence :  $C_n^2 = 0.5 \times 10^{-13} m^{-2/3}$**

Les figures 3.23 suivantes montrent la variation du facteur Q en fonction de la distance de transmission dans trois types d'eau différents (PS, CLO, et CSO) soumis à forte turbulence. La variation du facteur Q est observée pour différentes valeurs de débit binaire : 100 Mbit/s, 1 Gbit/s, 10 Gbit/s et 40 Gbit/s, respectivement. On peut constater, une dégradation significative de la qualité du signal (le facteur Q) à mesure que la distance de transmission augmente, pour différents débits et types d'eau, dans des conditions de forte turbulence par rapport à la transmission dans des conditions de turbulence modérée. En effet on peut observer que de la distance atteinte dans l'eau

de type PS soumis à forte turbulence est maintenue à environ 106 m pour des débits allant de 100 Mbits/s à 40 Gbits/s. Tandis que la distance atteinte dans l'eau de type CLO est maintenue à environ 104 m pour des débits allant de 100 Mbits/s à 10 Gbits/s, puis diminué à 96 m pour un débit de 40 Gbits/s. Ce qui confirme que le système NLOS UVLC proposé fonctionne dans l'eau de type PS et CLO peut résister à des fortes turbulences tout en ayant de bonne performance jusqu'à 40 Gbits/s. Cependant, dans l'eau de type CSO, des courtes distances de 24 m à 100 Mbits/s, 18 m à 1 Gbits/s, et 6.25 m à 10 Gbits/s, sont maintenue même en présence de forte turbulence. Tandis qu'un débit de 40 Gbits/s est devenu impossibles dans ces conditions. Ce qui confirme également que les performances du système proposé fonctionnant dans l'eau de type CSO dépendent fortement de la turbulence et du débit utilisé. Plus le débit ou  $C_n^2$  sont élevés, plus les performances du système diminuent.



**Figure 3.23 :** Variation du facteur Q en fonction de la distance sous forte turbulence et pour différents débit binaire (a) 100 Mbits/s, (b) 1 Gbits/s, (c) 10 Gbits/s et (d) 40 Gbits/s.

### 3.8.8 Etude des performances face au bruit

Les résultats présentés dans les figures 3.24 et 3.25 offrent des informations précieuses sur la relation entre le rapport signal/bruit (SNR) et le BER sous différents conditions sous-marines. Cette comparaison nous aide à comprendre l'impact du de la modulation MSK-IPS, et du type d'eau sur le SNR requis pour atteindre un débit de 100 Mbit/s dans le système NLOS UVLC proposé.

La figure 3.24 illustre la relation entre le SNR et la distance de transmission, dans divers types de l'eau notamment PS, CLO et CSO. Il est clair que l'augmentation de la distance de transmission entraine une diminution du SNR dans tous les environnements aquatiques étudiés, ce qui indique une perte de qualité du signal avec la distance. Il est à noter aussi que les systèmes fonctionnant dans l'eau de type PS et CLO offrent systématiquement des SNR supérieurs à ceux dans l'eau de type CSO. Cela est dû aux différences de clarté de l'eau affectant l'atténuation du signal et par conséquent, la puissance du signal capté au niveau du récepteur. Notons que le SNR électrique est proportionnel au carré de la puissance optique reçue.

Par exemple à un SNR = 40 dB, une distance d'environ 106 m dans l'eau de type PS est achevée, tandis que cette distance est limitée à 96 m dans l'eau de type CLO. Cependant, dans l'eau de type CSO, le SNR diminue fortement pour des distances plus courtes de 26 m. Ceci est le résultat d'une atténuation importante provoquée par la turbidité ou les impuretés caractéristiques des régions côtières, qui restreignent considérablement la portée de la transmission.

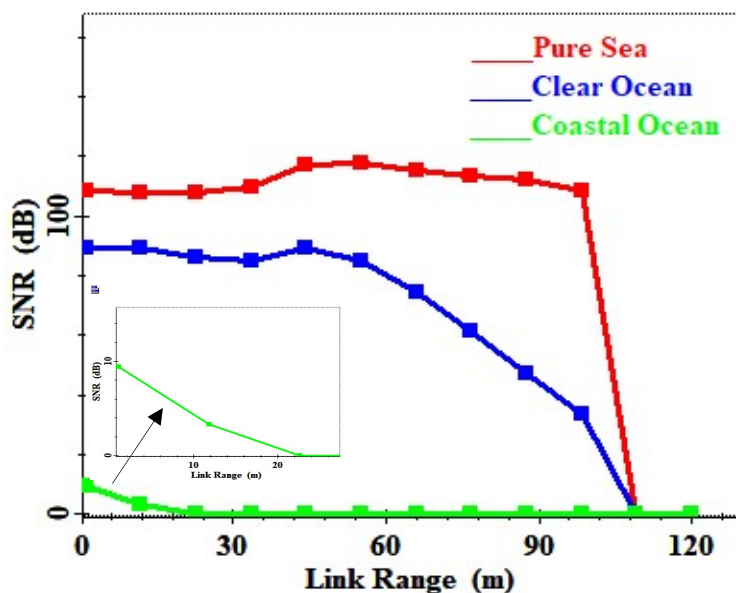
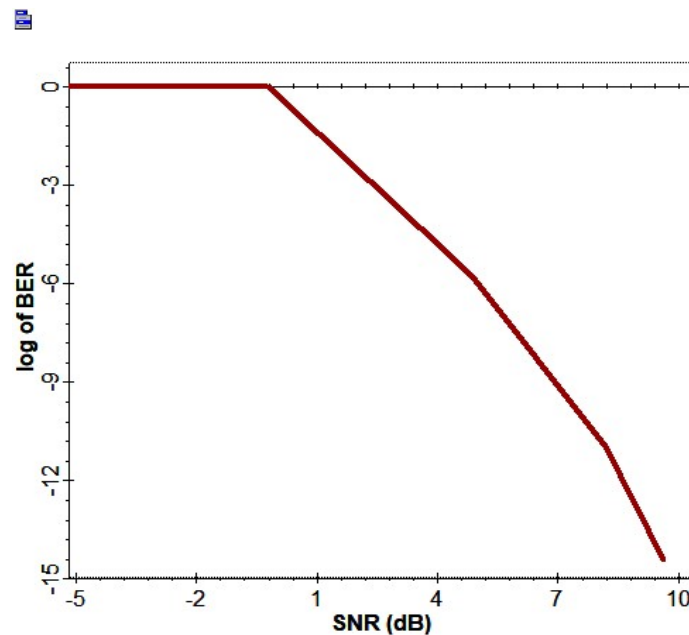


Figure 3.24 : Variation du SNR en fonction de la distance de transmission.



**Figure 3.25** : Variation du log BER en fonction du SNR pour CSO

La figure 3.25 illustre la variation du log BER en fonction du SNR pour l'eau de type CSO. On peut observer que : à mesure que le SNR augmente, le BER diminue dans l'environnement aquatique étudié. Un SNR élevé se traduit généralement par une meilleure clarté du signal et une réduction des erreurs. En eaux PS et CLO, le système NLOS UVLC montre des performances de BER inférieures à celles du système fonctionnant en eau trouble CSO où l'atténuation et la diffusion sont plus importantes.

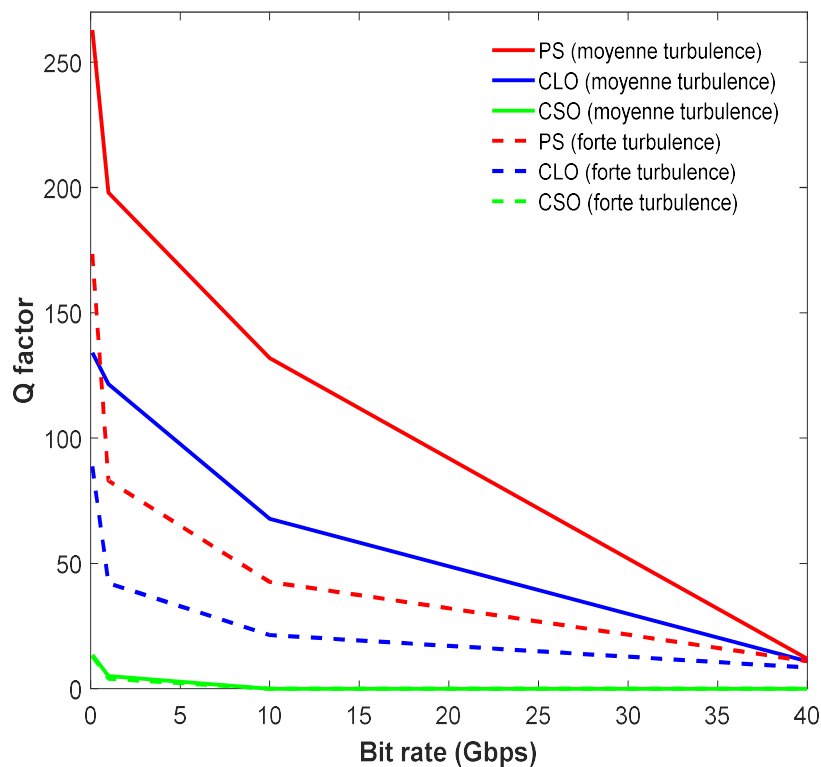
Dans l'eau CSO, le log BER est mesuré pour une valeur de -15 à un SNR de 10 dB, démontrant que les pertes introduites par la turbulence diminuent la puissance du signal reçu, réduisant ainsi le SNR et augmentant le taux d'erreur binaire BER. Cela souligne l'importance de prendre en compte les facteurs environnementaux dans les systèmes NLOS UVLC, notamment dans les environnements difficiles pour maintenir des liaisons de communication robustes sur de longues distances.

### 3.8.9 Comparaison entre la modulation MSK\_IPS et d'autres types de modulation

La Figure 3.26 illustre l'évolution du facteur Q en fonction du débit binaire pour trois types d'environnements aquatiques : Pure Sea (PS), Clear Ocean (CLO) et Coastal Ocean (CSO), soumise aux deux niveaux de turbulence : modéré et forte. La distance entre l'émetteur et le récepteur de transmission a été fixée à 100 m. On peut constater que dans un système NLOS

UVLC, l'augmentation du débit binaire entraîne une diminution de facteur Q dans tous les environnements aquatiques étudiés. Cette augmentation peut également rendre le système plus sensible aux effets de la propagation, comme de la diffusion et de l'absorption de la lumière, en particulier dans des environnements turbides comme CSO, qui peuvent dégrader la qualité du signal. Le système fonctionne nettement mieux sous une turbulence modérée que sous une forte turbulence, ce qui démontre la sensibilité du canal à la turbulence.

Dans l'environnement PS et CLO, les valeurs du facteur Q varient de 263 à 12 et de 173.5 à 11, respectivement, pour de débit binaire allant de 100 à 40 Gbit/s sous des turbulences modérées, tandis que ces valeurs de Q sont démunies sous des fortes turbulences, de 134 à 11 et de 88.7 à 5.4, respectivement, pour de débit binaire allant de 100 Mbit/s à 40 Gbit/s. On note, que pour des débits supérieurs à 40 Gbit/s, la performance de ces 2 environnements est sensiblement identique. Cependant, dans l'environnement CSO, naturellement turbulent, le débit binaire est limité à 10 Gbit/s avec un facteur Q = 4 dans ces conditions (distance de 100 m). On note également, qu'un débit binaire de 40 Gbit/s a été achevé dans l'environnement CSO à une distance de 1 m.



**Figure 3.26 :** Variation du facteur Q en fonction du débit pour faible et forte turbulence.

Les résultats de la simulation ont révélé que la modulation MSK-IPS permet d'obtenir de bonnes performances, notamment dans des eaux claires, avec des distances atteignant entre 96 et 106 mètres tout en maintenant un débit binaire élevé (40 Gbit/s). En revanche, les performances se dégradent considérablement dans des environnements à forte turbidité ou avec une turbulence élevée ce qui limite la distance à 6.25 m à 10 Gbit/s, et à 1 m à 40 Gbit/s. Une comparaison fine avec d'autres techniques de modulation (NRZ, OOK, QAM, OFDM) a confirmé l'efficacité de la modulation MSK-IPS dans les systèmes NLOS UVLC (tableau 3.4).

| Type de modulation   | Type d'eau                             | Débit binaire utilisé | Distance achevée (m) | Référence                     |
|----------------------|----------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|
| MSK_IPS              | PS<br>CLO<br>CSO                       | 40 Gbps               | 106<br>96<br>1       | <a href="#">Notre travail</a> |
| 16-QAM OFDM          | Eau douce                              | 12,4 Gbps             | 1,7                  | <a href="#">[32]</a>          |
| OAM-OOK              | CSO<br>( $c = 0,4128 \text{ m}^{-1}$ ) | 3 Gbps                | 2.96                 | <a href="#">[34]</a>          |
| OCDMA                | PS<br>CLO<br>CSO                       | 40 Gbps               | 48<br>27,5<br>16     | <a href="#">[36]</a>          |
| NRZ                  | Tap Water                              | 12 Mbps               | 18                   | <a href="#">[49]</a>          |
| Pseudo Random signal | CLO                                    | 50 Mbps               | 9                    | <a href="#">[50]</a>          |
| PAM4                 | Tap water                              | 16 Gbps               | 10                   | <a href="#">[51]</a>          |
| Manchester-coded     | Harbor water                           | 10 Mbps               | 7.5                  | <a href="#">[52]</a>          |
| PAM4                 | Harbor                                 | 30 Gbps               | 2.5                  | <a href="#">[53]</a>          |
| 32-QAM               |                                        | 3.31 Gbps             | 56                   | <a href="#">[54]</a>          |
| OFDM                 | Eau douce du robinet                   | 1.45 Gbps             | 4.8                  | <a href="#">[55]</a>          |

**Tableau 3.1 :** Comparaison de la modulation MSK\_IPS avec d'autres types de modulation.

### **3.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel OptiSystem afin d'évaluer les performances d'un système NLOS UVLC utilisant la modulation MSK-IPS. Les résultats ont montré l'impact significatif d'un certain nombre de facteurs environnementaux sur la qualité de la transmission, notamment le type d'eau, la profondeur, la distance, le diamètre d'ouverture du récepteur, les angles d'émission et de réception et la turbulence.

Les résultats montrent que la modulation MSK-IPS fonctionne exceptionnellement bien dans les eaux pures et claires, avec une portée allant de 96 à 106 m et un débit binaire allant jusqu'à 40 Gbit/s, avec un faible BER et SNR et un facteur Q élevé. En raison de la turbidité et de la forte atténuation du signal, les performances diminuent rapidement dans les eaux côtières.

Enfin, l'efficacité et la pertinence du choix du MSK\_IPS dans le contexte UVLC ont été confirmées par comparaison avec d'autres techniques de modulation disponibles dans la littérature. Ces résultats permettent de proposer des pistes d'amélioration et d'optimisation pour des applications spécifiques dans divers environnements marins.

# *Conclusion Générale*

### **Conclusion générale**

Ce projet a été réalisé dans le cadre de l'étude des systèmes de communication optique sous-marine par lumière visible (UVLC), une technologie émergente conçue pour remédier aux limitations des méthodes traditionnelles telles que les communications acoustiques et radiofréquences.

Le mémoire était structuré en trois chapitres principaux, chacun contribuant à une compréhension approfondie et progressive du sujet.

Le premier chapitre a établi les bases théoriques de la communication par lumière visible en mettant en évidence ses avantages, son évolution, ses multiples applications et sa pertinence actuelle. Il a été démontré que les technologies UVLC offrent des débits élevés, une faible latence, une consommation énergétique minimale et une sécurité renforcée. Une attention particulière a été accordée à l'architecture des systèmes UVLC, en détaillant les composants tels que les sources lumineuses (LED et LD), les modulations utilisées, les récepteurs optiques et les techniques de modulation adaptées à l'environnement sous-marin. Ce chapitre a également souligné la correspondance entre les besoins des applications sous-marines modernes (exploration pétrolière, surveillance environnementale, sécurité côtière, archéologie marine) et le potentiel technologique des systèmes UVLC.

Dans le deuxième chapitre, l'accent a été mis sur la modélisation du canal sous-marin, étape cruciale pour la conception de systèmes robustes et efficaces. Le canal optique dans un environnement aquatique est affecté par divers phénomènes physiques tels que l'absorption, la diffusion, la turbulence, les interférences multipath et les erreurs de pointage. Ce chapitre a présenté les modèles mathématiques et les lois physiques pour caractériser ces effets, y compris le modèle de Beer-Lambert pour l'atténuation, les modèles log-normal et Gamma-Gamma pour la turbulence, ainsi que les paramètres tels que la turbidité, la profondeur, la concentration en chlorophylle, etc. Cette modélisation a permis une meilleure compréhension des limites naturelles du canal UVLC et a envisagé des solutions pour améliorer la performance du lien optique.

Le troisième chapitre s'est concentré sur la simulation et l'analyse des performances du système proposé NLOS UVLC à l'aide du logiciel OptiSystem. Divers scénarios ont été établis pour évaluer l'impact de plusieurs paramètres (type d'eau, distance, ouverture de réception, bruit) sur la qualité de transmission. Le choix de la modulation MSK-IPS a été justifié par sa robustesse face aux interférences inter-symboles, son efficacité spectrale et sa compatibilité avec les environnements turbulents sous-marins. Les résultats ont confirmé la capacité du système à maintenir un faible

taux d'erreur binaire et un facteur Q satisfaisant dans des eaux pures et claires, tout en identifiant les défis rencontrés dans des eaux très troubles. Cette partie a permis d'identifier les limites pratiques du système étudié et de proposer des pistes d'amélioration.

Ce mémoire se distingue par l'intégration de la modulation MSK-IPS, peu étudiée dans le cadre des systèmes UVLC, et par la précision de la modélisation du canal optique marin. Cette recherche a apporté une contribution technique et méthodologique importante à un domaine en pleine expansion, alliant une approche théorique, une simulation pratique et une analyse critique des résultats.

Il y a plusieurs pistes intéressantes à explorer pour enrichir nos travaux :

- L'intégration de la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) : en augmentant le nombre d'émetteurs et de récepteurs, le MIMO pourrait accroître significativement le débit du système, réduire les pertes de données et renforcer sa robustesse face aux interférences.
- L'utilisation de la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) : déjà utilisée dans les réseaux terrestres, cette technique permettrait une meilleure utilisation de la bande passante disponible et une amélioration de l'efficacité spectrale, notamment dans les canaux multipath rencontrés en milieu marin.

- Des tests en conditions réelles : afin de valider les performances du système UVLC avec MSK-IPS, il serait essentiel de réaliser des expérimentations dans des bassins ou en mer, en intégrant des instruments de mesure du canal en temps réel.

- L'optimisation dynamique : des algorithmes d'adaptation du signal et des paramètres de transmission en fonction de la turbidité, du courant ou des mouvements des AUV pourraient être développés pour améliorer la stabilité du lien.

En conclusion, cette étude ouvre la voie à de nouvelles solutions de communication optique fiables, rapides et adaptées aux besoins croissants des environnements marins. Elle démontre que l'UVLC, malgré son stade de développement, possède un potentiel énorme pour révolutionner les systèmes sous-marins traditionnels et relever avec succès les défis de demain.

# ANNEXE

## 1. La modulation CPM (Continuous Phase Modulation)

La modulation de phase continue est une catégorie de modulations numériques à amplitude constante ; l'information se transmet par la phase du signal, et les modifications de phase sont constantes [56]. La modulation de phase continue (CPM) présente un potentiel significatif en termes de puissance et d'efficacité spectrale. La CPM permet l'emploi d'amplificateurs non linéaires, qui sont à la fois économiques et peu énergivores, grâce à leur enveloppe constante. Grâce à ces atouts (enveloppe stable, performance énergétique et efficacité spectrale), la CPM est largement adopté dans divers domaines d'application, y compris les communications mobiles, Communications à ondes millimétriques et communications militaires. Par ailleurs, les signaux CPM sont également récemment envisagés pour des usages en télémétrie et machine de communication dans le cadre de la 5e génération (5G) de communication sans fil [57].

La forme d'onde du signal CPM est décrite comme suit [58] :

$$s(t, \alpha) = \frac{2E}{T} \operatorname{Re}\{e^{j\varphi(t, \alpha)} e^{j(2\pi f_0 t + \theta)}\}, \quad (\text{a.1})$$

Où  $\varphi(t, \alpha)$  la phase déterminé par l'ensemble de symboles d'information d'entrée M-aire  $\alpha$ , satisfaisant  $\alpha_i \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm M - 1\}$  :

$$\varphi(t, \alpha) = 2\pi h \sum_{i=-\infty}^{\infty} \alpha_i q(t - iT), \quad (\text{a.2})$$

$\operatorname{Re}\{\cdot\}$  : désigne la partie réelle,

$T$  : intervalle de symboles ou temps du symbole,

$E$  : énergie par symbole,

$h \in Q$  : indice de modulation,

$\theta$  : décalage de phase initial,

$f_0$  : la fréquence porteuse et

$q(t)$  : l'impulsion de phase

$$q(t) = \begin{cases} 0 & t < 0, \\ \int_{-\infty}^t g(t) dt & 0 \leq t < LT, \\ \frac{1}{2} & t \geq LT, \end{cases} \quad (\text{a.3})$$

$L$  : longueur d'impulsion mesurée en intervalles de symboles  $T$ . Le signal est dit à réponse complète lorsque  $L = 1$ , et dit à réponse partielle lorsque  $L > 1$ .

$g(t)$  : est l'impulsion de fréquence.

## 1.1 La modulation MSK

La MSK est une forme spécifique de modulation par déplacement de phase-fréquence. Le signal MSK comporte une phase continue qui s'accroît ou décroît de manière linéaire à une vitesse constante, assurant ainsi un écart de fréquence constant pour chaque symbole et une différence de phase identique entre les symboles voisins. L'obtention de la modulation MSK peut se faire soit à partir du format OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) grâce à la manipulation des impulsions via des formes d'onde semi-sinusoïdales, soit en tant que variante spécifique du format CPFSK (Continuous Phase Frequency Shift Keying) avec un indice de modulation de 0,5 [46].

### 1.1.1. Modulateurs MSK externes basés sur la modulation par déplacement de phase

Les modulateurs MSK externes basés sur la modulation par déplacement de phase sont des modulateurs dans lesquels les données entrantes sont codées, entrelacées et démultiplexées en données en phase  $I(t)$  et en données en quadrature  $Q(t)$ , pour être ensuite misent en forme par des modulateurs Mach-Zehnder. Pour ces types de modulateurs on a [46] :

#### a . Modulateur MSK à mise en forme directe des impulsions (DPS)

Un modulateur DPS (**Direct Pulse Shaping**) comprend deux MZM, chacun placé sur l'un des deux bras du dispositif. Les données et le signal d'horloge RF sont combinés électriquement pour piloter chaque MZM, assurant à la fois la modulation et la mise en forme des impulsions. Le champ optique est séparé en deux, modulé par chaque MZM, puis un déphasage de  $-\frac{\pi}{2}$  est appliqué sur le bras inférieur pour rendre les signaux orthogonaux. Le signal d'horloge RF et le signal de données sont combinés soit par addition soit par multiplication pour générer le signal de commande du MZM (figure a.1).

A la sortie des deux MZM on a :

$$\begin{aligned}
 E_{up}(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp(j2\pi f_c t) \cos \left[ \pi \frac{d_{tri}(t - T) + I'(t)}{V_\pi} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp(j2\pi f_c t) I(t) \cos \left( \frac{\pi t}{2T} \right) \\
 E_{low}(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp \left( j2\pi f_c t + \frac{\pi}{2} \right) \cos \left[ \pi \frac{d_{tri}(t) + Q'(t)}{V_\pi} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{a.4}$$

$$= -j \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp(j2\pi f_c t) Q(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \quad (\text{a.5})$$

Le signal de commande du MZM est donc :

$$E_{out} = \frac{\sqrt{2}}{2} [E_{up}(t) + E_{low}(t)] = \frac{E_0 \exp(j2\pi f_c t)}{2} \left[ I(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) - jQ(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \right] \quad (\text{a.6})$$

Avec

$E_{up}(t)$  : Champ électrique dans le bras supérieur du modulateur à l'instant  $t$  ;

$E_{low}(t)$  : Champ électrique dans le bras inférieur du modulateur à l'instant  $t$  ;

$E_{out}$  : Champ électrique de sortie total du modulateur ;

$E_0$  : Amplitude initiale du signal optique avant modulation ;

$f_c$  : Fréquence porteuse ;

$d_{tri}(t)$  : la tension de commande

$V_\pi$  : Tension de commutation du MZM, tension nécessaire pour induire un déphasage de  $\pi$  dans le MZM.

$T$  : Durée d'un symbole.

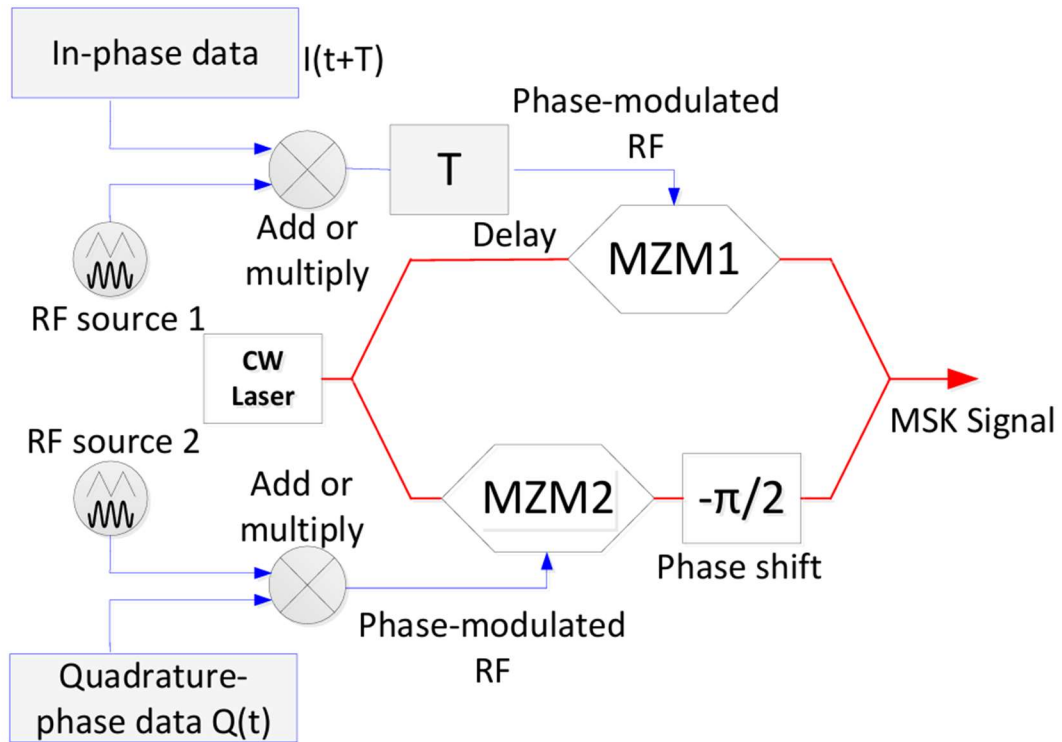


Figure a.1 : Architecture d'un modulateur MSK-DPS

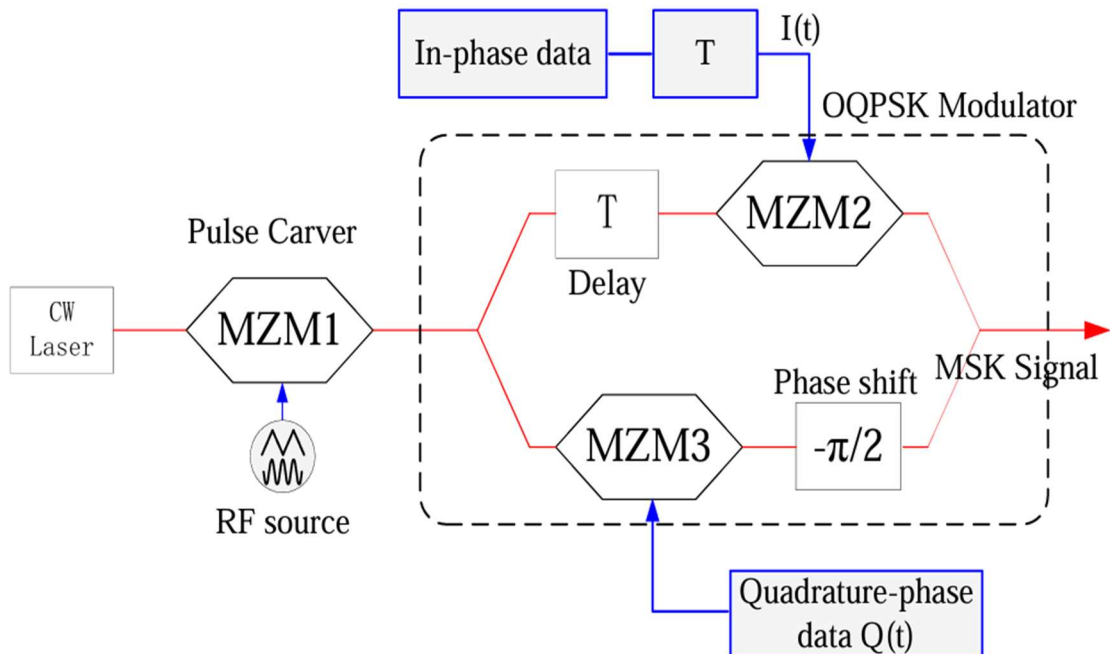
### b. Modulateur MSK à mise en forme d'impulsions séparée (SPS)

Le modulateur SPS (**Separate Pulse Shaping**) réalise la mise en forme des impulsions et l'encodage des données en deux étapes distinctes : chaque composante en phase et en quadrature est modulée par un MZM séparé. Un module retard placé sur l'un des bras garantit la différence de phase entre ces deux composantes. Sous l'action d'une source RF, le MZM1 module le signal optique entrant  $E_0 \exp(j2\pi f_c t)$  tel que  $E(t) = E_0 \exp(j2\pi f_c t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right)$ . Ensuite le champ optique est divisé en deux branches, supérieure et inférieure (figure a.2) :

$$\begin{aligned} E_{up}(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp[j2\pi f_c (t - T)] \sin\left[\frac{\pi(t - T)}{2T}\right] \exp\left[\frac{j\pi I'(t)}{2V_\pi}\right] \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp(j2\pi f_c t - \delta) I(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \end{aligned} \quad (a.7)$$

$$\begin{aligned} E_{low}(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp(j2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \exp\left[\frac{j\pi Q'(t)}{2V_\pi}\right] \\ &= -j \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp(j2\pi f_c t) Q(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \end{aligned} \quad (a.8)$$

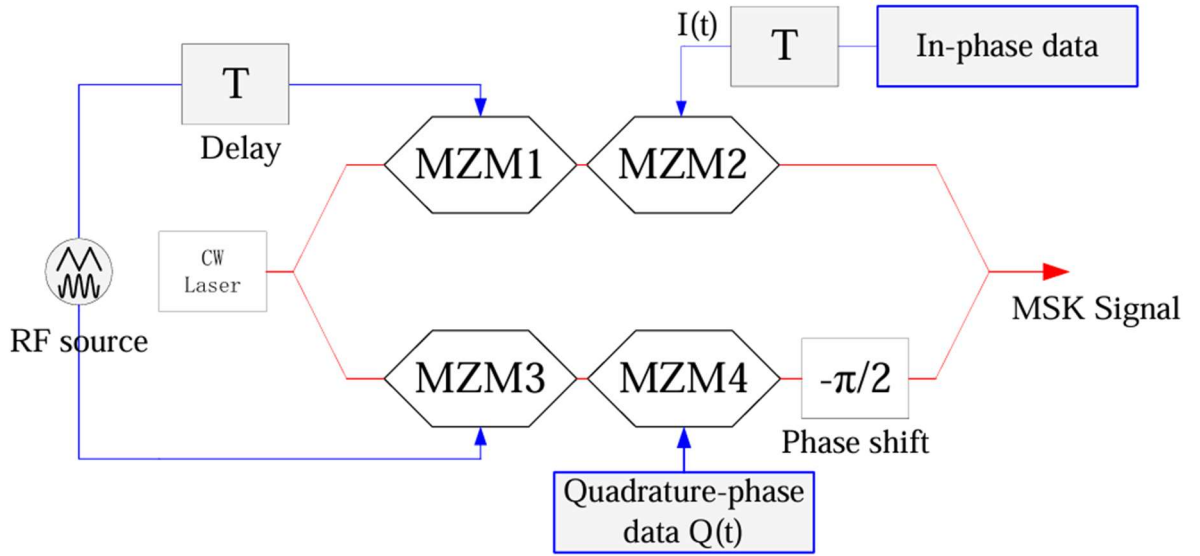
$$E_{out} = \frac{\sqrt{2}}{2} [E_{up}(t) + E_{low}(t)] = \frac{E_0 \exp(j2\pi f_c t)}{2} \left[ I(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) - jQ(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \right]$$



**Figure a.2** : Architecture d'un modulateur MSK-SPS

### c. Modulateur de mise en forme d'impulsions indépendant IPS

Le modulateur de mise en forme indépendant des impulsions IPS (**I**ndependent **P**ulse **S**haping), souvent désigné comme modulateur MSK à quatre MZM, comprend quatre modulateurs Mach-Zehnder, avec deux dans chaque bras. La mise en forme des impulsions est réalisée individuellement dans chaque bras par les MZM1 et MZM2, ce qui permet de se passer d'une ligne à retard intégrée (Figure a.3), le décalage étant alors appliqué directement au niveau du circuit électrique [45][46][59].



**Figure a.3** : Architecture d'un modulateur MSK-IPS

Le champ optique est divisé en deux branches, supérieure et inférieure, comme suit :

$$\begin{aligned}
 E_{up}(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp[j2\pi f_c(t - T)] \sin\left[\frac{\pi(t - T)}{2T}\right] \exp[j\pi I(t)] \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp(j2\pi f_c t - \delta) I(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right)
 \end{aligned} \tag{a.9}$$

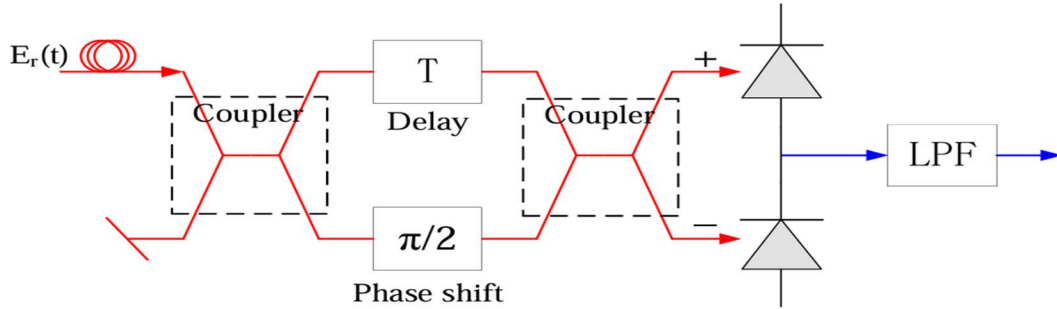
$$\begin{aligned}
 E_{low}(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp(j2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \exp[j\pi Q(t)] \\
 &= -j \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp(j2\pi f_c t) Q(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right)
 \end{aligned} \tag{a.10}$$

$$E_{out} = \frac{\sqrt{2}}{2} [E_{up}(t) + E_{low}(t)] = \frac{E_0 \exp(j2\pi f_c t)}{2} \left[ I(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) - jQ(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \right]$$

### 1.1.2 Récepteur à retard optique

Le récepteur MSK le plus fréquemment utilisé est celui à démodulation par retard optique. Ce récepteur compare, dans le domaine optique, la phase de deux symboles successifs, puis convertit cette information de phase en une amplitude directement détectable. Pour cela, il fait généralement appel à un interféromètre à retard de Mach-Zehnder (**MZDI : Mach-Zehnder Delay Interferometer**) associé à un récepteur équilibré.

Le MZDI comprend deux coupleurs de 3 dB (ou coupleurs à  $180^\circ$ , qui introduit un déphasage de  $180^\circ$  entre le champ du signal et celui de l'oscillateur local) placés aux entrées et sorties, et reliés par deux bras de longueurs différentes. Cette différence de longueur permet au signal circulant dans le bras le plus long d'être retardé exactement d'un symbole par rapport à celui du plus court. L'ajustement de la longueur du chemin dans l'interféromètre soit par chauffage thermique ou transducteur piézoélectrique (**PZT : Piezoelectric Transducer**). L'emploi d'un récepteur équilibré améliore la sensibilité de 3 dB par rapport aux signaux OOK et supprime la composante continue [46][60].



**Figure a.4** : Architecture d'un récepteur à retard optique [46].

Le champ électrique  $E_r(t)$  s'écrit comme suit :

$$E_r(t) = \sqrt{P_s} \exp\{j[2\pi f_c t + \phi(t)]\} \quad (\text{a.11})$$

Avec  $P_s$  est la puissance du signal optique reçu et  $\phi(t)$  la phase du signal optique reçu.

Les champs électriques à l'extrémité des deux bras ainsi que la matrice de relations d'entrée et de sortie du coupleur 3 dB sont donnés par :

$$E_{up}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_r(t - T) \quad (\text{a.12})$$

$$E_{low}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_r(t) \exp\left(j \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{a.13})$$

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{a.14})$$

## Références Bibliographique

- [1] H. M. Oubei *et al.*, « Light based underwater wireless communications », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, n° 8S2, p. 08PA06, août 2018, doi: [10.7567/JJAP.57.08PA06](https://doi.org/10.7567/JJAP.57.08PA06).
- [2] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater Optical Wireless Communication," in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1518-1547, 2016, doi: [10.1109/ACCESS.2016.2552538](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2552538).
- [3] Ali, M., Jayakody, D.N.K., Chursin, Y.A. et al. « Recent Advances and Future Directions on Underwater Wireless Communications». *Arch Computat Methods Eng* 27, 1379–1412 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09354-8>
- [4] A.A. U. Barambu, « Non-line of Sight Underwater Optical Wireless Communications », These de Doctorat, Université de Warwick, Juin 2021.
- [5] N. K. Shukla *et al.*, « High speed integrated RF–VLC data communication system: Performance constraints and capacity considerations », *Physical Communication*, vol. 50, p. 101492, févr. 2022, doi: [10.1016/j.phycom.2021.101492](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101492).
- [6] S. T, R. S, S. J, J. S. R. Alex, R. G, et M. Das, « Reinforcement learning-based automated modulation switching algorithm for an enhanced underwater acoustic communication », *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102791, sept.2024, doi: [10.1016/j.rineng.2024.102791](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102791).
- [7] A. Elfikkyet *al.*, « Underwater visible light communication: recent advancements and channel modeling », *Opt Quant Electron*, vol. 56, n° 10, p. 1617, sept.2024, doi: [10.1007/s11082-024-07426-z](https://doi.org/10.1007/s11082-024-07426-z).
- [8] N. Saeed, A. Celik, T. Y. Al-Naffouri, et M.-S. Alouini, « Underwater optical wireless communications, networking, and localization: A survey », *Ad Hoc Networks*, vol. 94, p. 101935, nov.2019, doi: [10.1016/j.adhoc.2019.101935](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101935).
- [9] M. Singh, S. A. Abd El-Mottaleb, A. Atieh, H. Y. Ahmed, M. Zeghid, et K. S. Nisar, « Indoor VLC system based on tri color laser diodes, dual polarization states, and OAM beams », *Alexandria Engineering Journal*, vol. 114, p. 342-352, févr. 2025, doi: [10.1016/j.aej.2024.11.096](https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.11.096).
- [10] L. U. Khan, « Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges », *Digital Communications and Networks*, vol. 3, n° 2, p. 78-88, mai 2017, doi: [10.1016/j.dcan.2016.07.004](https://doi.org/10.1016/j.dcan.2016.07.004).
- [11] S. Hranilovic, L. Lampe, S. Hosur, et R. D. Roberts, « visible light communications: the road to standardization and commercialization (part 2) », *IEEE Communications Magazine*, juillet 2014.
- [12] H. Haas, C. Chen, et D. O'Brien, « A guide to wireless networking by light », *Progress in Quantum Electronics*, vol. 55, p. 88-111, sept.2017, doi: [10.1016/j.pquantelec.2017.06.003](https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2017.06.003).

- [13] M. A. Amirabadiet S. A. Nezamalhoseini, « Sum rate optimization in STAR-RIS assisted multiuser massive MIMO-OFDM VLC systems », *Physical Communication*, vol. 67, p. 102524, déc. 2024, doi: [10.1016/j.phycom.2024.102524](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2024.102524).
- [14] F. Miramirkhani, « Channel Modeling and Characterization for Visible Light Communications: Indoor, Vehicular and Underwater Channels », Thèse de Doctorat, Université d'Ozyegin, juin 2018.
- [15] A. Petrosino, D. Striccoli, O. Romanov, G. Boggia, et L. A. Grieco, « Light Fidelity for Internet of Things: A survey », *Optical Switching and Networking*, vol. 48, p. 100732, mars 2023, doi: [10.1016/j.osn.2023.100732](https://doi.org/10.1016/j.osn.2023.100732).
- [16] C. Sofia, « Conception et réalisation d'un système de communication bureautique par lumière visible (Li-Fi) », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, juillet 2019.
- [17] M. Z. Chowdhury, Md. T. Hossan, A. Islam, et Y. M. Jang, « A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications », *IEEE Access*, vol. 6, p. 9819-9840, 2018, doi: [10.1109/ACCESS.2018.2792419](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2792419).
- [18] G. SchirripaSpagnolo, L. Cozzella, et F. Leccese, « Underwater Optical Wireless Communications: Overview », *Sensors*, vol. 20, n° 8, p. 2261, avr. 2020, doi: [10.3390/s20082261](https://doi.org/10.3390/s20082261).
- [19] M. N. Hasanet A. G. Wadday, « Investigation the Performance of Underwater Optical Wireless Communication Under Impacts of Different Modulation Schemes and MIMO Configuration », Thèse de Doctorat, Université technique de AL-FURAT AL-AWSAT, Sept. 2020.
- [20] H. A. E. M. Ali, E.-S. S. A. Said, et M. E. Yousef, « Effect of Environmental Parameters on the Performance of Optical Wireless Communications », *International Journal of Optics*, vol. 2019, p. 1-12, mai 2019, doi: [10.1155/2019/1828275](https://doi.org/10.1155/2019/1828275).
- [21] Saleha Al-Zhrani, Nada M. Bedaiwi, Intesar F El-Ramli, Abeer Z. Barasheed, Ali Abduldaiem, Yas Al-Hadeethi and Ahmad Umar., « Underwater Optical Communications: A Brief Overview and Recent Developments », *Eng. Sci.*, 2021, doi: [10.30919/es8d574](https://doi.org/10.30919/es8d574).
- [22] T. Ridha, « Modélisation et Simulation d'un Système de Communication à base de la Technologie VLC-OFDM », Thèse de Doctorat, université Ferhat Abbas- Setif 1, septembre 2023.
- [23] M. F. Ali, D. N. K. Jayakody, et Y. Li, « Recent Trends in Underwater Visible Light Communication (UVLC) Systems », *IEEE Access*, vol. 10, p. 22169-22225, 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3150093](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3150093).
- [24] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, et P. Mohapatra, « Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges », *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, n° 4, p. 2047-2077, 2015, doi: [10.1109/COMST.2015.2476474](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2476474).

- [25] S. Nivetha, G.A. Preethi, C. Chandrasekar, « Performance Evaluation of Modulation Techniques in Li-Fi », *IJRTE*, vol. 8, n° 3, p. 1509-1518, sept.2019, doi: [10.35940/ijrte.C4203.098319](https://doi.org/10.35940/ijrte.C4203.098319).
- [26] P. A. Loureiro, F. P. Guiomar, et P. P. Monteiro, « Visible Light Communications: A Survey on Recent High-Capacity Demonstrations and Digital Modulation Techniques », *Photonics*, vol. 10, n° 9, p. 993, août 2023, doi: [10.3390/photonics10090993](https://doi.org/10.3390/photonics10090993).
- [27] A. R. Ndjongue, T. Shongwe, H. C. Ferreira, T. M. N. Ngatched et A. J. Han Vinck, "Cascaded PLC-VLC Channel Using OFDM and CSK Techniques," *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA, USA, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2015.7417129.
- [28] B. Bachir et Z. Abderahmane, « La poursuite de référence dans un système de communication optique sans fil sous-marin », Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, 2020.
- [29] J. Wang, C. Lu, S. Li, et Z. Xu, « 100 m/500 Mbps underwater optical wireless communication using an NRZ-OOK modulated 520 nm laser diode », *Opt. Express*, vol. 27, n° 9, p. 12171, avr. 2019, doi: [10.1364/OE.27.012171](https://doi.org/10.1364/OE.27.012171).
- [30] X. Liu *et al.*, « 34.5 m underwater optical wireless communication with 270 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation », *Opt. Express*, vol. 25, n° 22, p. 27937, oct. 2017, doi: [10.1364/OE.25.027937](https://doi.org/10.1364/OE.25.027937).
- [31] Y. Chen *et al.*, « 26 m/55 Gbps air-water optical wireless communication based on an OFDM-modulated 520-nm laser diode », *Opt. Express*, vol. 25, n° 13, p. 14760, juin 2017, doi: [10.1364/OE.25.014760](https://doi.org/10.1364/OE.25.014760).
- [32] T.-C. Wu, Y.-C. Chi, H.-Y. Wang, C.-T. Tsai, et G.-R. Lin, « Blue Laser Diode Enables Underwater Communication at 12.4 Gbps », *Sci Rep*, vol. 7, n° 1, p. 40480, janv. 2017, doi: [10.1038/srep40480](https://doi.org/10.1038/srep40480).
- [33] J. Mirza *et al.*, « Relay aided UWOC-SMF-FSO based hybrid link for underwater wireless optical sensor network », *Optical Fiber Technology*, vol. 89, p. 104045, janv. 2025, doi: [10.1016/j.yofte.2024.104045](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2024.104045).
- [34] J. Baghdady *et al.*, « Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing », *Opt. Express*, vol. 24, n° 9, p. 9794, mai 2016, doi: [10.1364/OE.24.009794](https://doi.org/10.1364/OE.24.009794).
- [35] X. Xu, Y. Li, P. Huang, M. Ju, et G. Tan, « BER Performance of UWOC With APD Receiver in Wide Range Oceanic Turbulence », *IEEE Access*, vol. 10, p. 25203-25218, 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3154892](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3154892).
- [36] S. A. Abd El-Mottaleb, M. Singh, A. Armghan, A. Atieh, et M. H. Aly, « Enhanced underwater optical wireless communication using optical code division multiple access with sigma shift matrix code », *Optics Communications*, vol. 574, p. 131204, janv. 2025, doi: [10.1016/j.optcom.2024.131204](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.131204).

- [37] P. Yue, X. Wang, D. Xu, et S. Xu, « Non-line-of-sight scattering channel modeling of MIMO links for underwater wireless optical communication », *Optics Communications*, vol. 578, p. 131468, avr. 2025, doi: [10.1016/j.optcom.2024.131468](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.131468).
- [38] D. T. Sy, M. Q. Vu, et N. T. Dang, « Design and performance of entanglement-based underwater VLC/QKD systems », *Opt. Continuum*, vol. 3, n° 9, p. 1817, sept.2024, doi: [10.1364/OPTCON.528567](https://doi.org/10.1364/OPTCON.528567).
- [39] M. Furqan Ali et D. N. K. Jayakody, « SIMO-Underwater Visible Light Communication (UVLC) system », *Computer Networks*, vol. 232, p. 109750, août 2023, doi: [10.1016/j.comnet.2023.109750](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109750).
- [40] C. Gabriel, M.-A. Khalighi, S. Bourennane, P. Léon, et V. Rigaud, « Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems », *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, n° 1, p. 1, janv. 2013, doi: [10.1364/JOCN.5.000001](https://doi.org/10.1364/JOCN.5.000001).
- [41] A. D. Tunick, « The Refractive Index Structure Parameter/Atmospheric Optical Turbulence Model: CN2 »:, Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, avr. 1998. doi: [10.21236/ADA341685](https://doi.org/10.21236/ADA341685).
- [42] A. Kabanovet V. Kramar, « Marine Internet of Things Platforms for Interoperability of Marine Robotic Agents: An Overview of Concepts and Architectures », *JMSE*, vol. 10, n° 9, p. 1279, sept.2022, doi: [10.3390/jmse10091279](https://doi.org/10.3390/jmse10091279).
- [43] Optiwave, <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- [44] S. M. Merzougui, A. Belkacem, et A. R. Borsali, « Transmission simultanée fixe FTTH et mobile 5G sur fibre optique basée sur les modulations à double polarisation », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid, Novembre 2020, doi: [10.13140/RG.2.2.32392.65286](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32392.65286).
- [45] D. Sarkar et S. K. Metya, « 3 × 40-Gbps Multiplexed Optical MSK Using Quad-Mach-Zehnder IQ Modulator », *Procedia Computer Science*, vol. 93, p. 662-667, 2016, doi: [10.1016/j.procs.2016.07.257](https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.257).
- [46] S. Li, B. Eng, et A. J. Lowery, « Modelling and Analysis of Minimum Shift Keying Modulation in Optical Systems », Mémoire de Master, Université Monash, Australie, 2016.
- [47] M. Gay, « Etude théorique et expérimentale de L'impact de la régénération 2R dans un système de transmission optique haut débit », Thèse Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Février 2006.
- [48] M. Elamassie, C. Geldard, et W. Popoola, « Underwater Visible Light Communication (UVLC) », in *Handbook of Radio and Optical Networks Convergence*, T. Kawanishi, Éd., Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, p. 1021-1056. doi: [10.1007/978-981-97-2282-2\\_62](https://doi.org/10.1007/978-981-97-2282-2_62).
- [49] M. B. AL-Din, R. A. S. A. Alkareem, et M. A. A. Ali, « Transmission Of 10 Gb/s For Underwater Optical Wireless Communication System », *J Opt*, mai 2024, doi: [10.1007/s12596-024-01825-x](https://doi.org/10.1007/s12596-024-01825-x).

- [50] Judith Bannon Snow, James P. Flatley, Dennis E. Freeman, Mark A. Landry, Carl E. Lindstrom, Jacob R. Longacre, and Joshua A. Schwartz "Underwater propagation of high-data-rate laser communications pulses", Proc. SPIE 1750, Ocean Optics XI, (31 December 1992); <https://doi.org/10.1117/12.140670>.
- [51] Li CY, Lu HH, Tsai WS, et al, «16 Gb/s PAM4 UWOC system based on 488-nm LD with light injection and optoelectronic feedback techniques», *Optics Express*, Mai 2017, 25(10):11598-11605. DOI: [10.1364/oe.25.011598](https://doi.org/10.1364/oe.25.011598). PMID: 28788723.
- [52] G. Cossu, A. Sturniolo, A. Messa, D. Scaradozzi and E. Ciaramella, "Full-Fledged 10Base-T Ethernet Underwater Optical Wireless Communication System," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 1, pp. 194-202, Jan. 2018, doi: [10.1109/JSAC.2017.2774702](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2774702).
- [53] Tsai, WS., Lu, HH., Wu, HW. *et al.* A 30 Gb/s PAM4 underwater wireless laser transmission system with optical beam reducer/expander. *Sci Rep* **9**, 8605 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45125-y>.
- [54] Chen X, Lyu W, Zhang Z, Zhao J, Xu J. 56-m/3.31-Gbps underwater wireless optical communication employing Nyquist single carrier frequency domain equalization with noise prediction. *Opt Express*. 2020 Aug 3;28(16):23784-23795. doi: [10.1364/OE.399794](https://doi.org/10.1364/OE.399794). PMID: 32752370.
- [55] K. Nakamura, I. Mizukoshi, M. Hanawa, « Optical wireless transmission of 405 nm, 1.45 Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel», *Optics Express*, Jan 2015, [doi.org/10.1364/oe.23.001558](https://doi.org/10.1364/oe.23.001558).
- [56] P. Desombre, H. Farès, et Y. Louët, « Continuous Phase Modulation Proposal for Photonics-Wireless Sub-THz Transmissions », *IEEE Access*, vol. 12, p. 100217-100229, 2024, doi: [10.1109/ACCESS.2024.3431275](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3431275).
- [57] K. Kassan, « Performance of a new single sideband (SSB) continuous phase modulation (CPM) », thèse de doctorat, Centralesupélec, Décembre 2021.
- [58] Y. Sun, « Optimal Parameter Design of Continuous Phase Modulation for Future GNSS Signals », *IEEE Access*, vol. 9, p. 58487-58502, 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3073317](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073317).
- [59] L. Tao, J. Zhu, B. Huang, J. Zhang, Y. Shao, et N. Chi, « A modulation scheme for 100 Gb/s modified minimum-shift keying format based on imbalanced bias in IQ components », *Optical Fiber Technology*, vol. 17, n° 6, p. 601-607, déc. 2011, doi: [10.1016/j.yofte.2011.08.004](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2011.08.004).
- [60] L. Paillier, « Architecture de récepteur cohérent pour les liens optiques satellite-sol avec optique adaptative », Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Paris, oct. 2020.

## Liste des Abréviations

| <b>Abréviations</b> | <b>Signification</b>                                |
|---------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>APD</b>          | Avalanche Photodiode                                |
| <b>AUV</b>          | Autonomous Underwater Vehicule                      |
| <b>BER</b>          | Bit Error Rate                                      |
| <b>BSF</b>          | Beam Spread Function                                |
| <b>CDBM/ CSK</b>    | Color Domain-Based Modulation/ Color Shift Keying   |
| <b>CDOM</b>         | Colored Dissolved Organic Matter                    |
| <b>CLO</b>          | Clear Ocean                                         |
| <b>CPM</b>          | Continuous Phase Modulation                         |
| <b>CSO</b>          | Coastal Ocean                                       |
| <b>CSRZ</b>         | Carrier-Suppressed Return-to-Zero                   |
| <b>DEL</b>          | Diode Électroluminescente                           |
| <b>DP-QPSK</b>      | Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying     |
| <b>DPSK</b>         | Differential Phase Shift Keying                     |
| <b>DQPSK</b>        | Differential Quadrature Phase Shift Keying          |
| <b>FEC</b>          | Forward Error Correction                            |
| <b>FFT</b>          | Fast Fourier Transform                              |
| <b>FSO</b>          | Free Space Optics                                   |
| <b>IFFT</b>         | Inverse Fast Fourier Transform                      |
| <b>IM/DD</b>        | Intensity Modulation/Direct Detection               |
| <b>ISI</b>          | Inter Symbol Interference                           |
| <b>LAN</b>          | Local Area Network                                  |
| <b>LD</b>           | Lazer Diode                                         |
| <b>LED</b>          | Light Emitting Diode                                |
| <b>LOS</b>          | Line-Of-Sight                                       |
| <b>MAN</b>          | Metropolitan Area Network                           |
| <b>MCM</b>          | Multiple Carrier Modulation                         |
| <b>MIMO</b>         | Multiple Input Multiple Output                      |
| <b>MSK-DPS</b>      | Minimum Shift Keying with Direct Pulse Shaping      |
| <b>MSK-IPS</b>      | Minimum Shift Keying with Independent Pulse Shaping |

|                |                                                        |
|----------------|--------------------------------------------------------|
| <b>MSK-SPS</b> | Minimum Shift Keying with Separate Pulse Shaping       |
| <b>MZM</b>     | Mach-Zehnder Modulator                                 |
| <b>NLOS</b>    | No-Line-Of-Sight                                       |
| <b>NRZ</b>     | No-Return-Zero                                         |
| <b>OFDM</b>    | Orthogonal Frequency Division Multiplexing             |
| <b>OOK</b>     | On-Off Keying                                          |
| <b>OQPSK</b>   | Offset Quadrature Phase Shift Keying                   |
| <b>OWC</b>     | Optical Wireless Communication                         |
| <b>PAM</b>     | Pulse Amplitude Modulation                             |
| <b>PD</b>      | Photodetector                                          |
| <b>PIN</b>     | Positive-Intrinsic-Negative Photodiode                 |
| <b>PM-QPSK</b> | Polarization-Multiplexed Quadrature Phase Shift Keying |
| <b>POA</b>     | Propriété Optique Apparente                            |
| <b>POI</b>     | Propriété Optique Inhérente                            |
| <b>PPM</b>     | Pulse Position Modulation                              |
| <b>PS</b>      | Pure Sea                                               |
| <b>PSK</b>     | Phase Shift Keying                                     |
| <b>PZT</b>     | Piezo-electric Transducer                              |
| <b>QAM</b>     | Quadrature Amplitude Modulation                        |
| <b>QPSK</b>    | Quadrature Phase Shift Keying                          |
| <b>RF</b>      | Radio Frequency                                        |
| <b>RTE</b>     | Radiative Transfer Equation                            |
| <b>RZ</b>      | Return-to- Zero                                        |
| <b>SAN</b>     | Storage Area Network                                   |
| <b>SCM</b>     | Single Carrier Modulation                              |
| <b>SNR</b>     | Signal-to-Noise Ratio                                  |
| <b>SPF</b>     | Scattering Phase Function                              |
| <b>TEB</b>     | Taux d'Erreur Binaire                                  |
| <b>UOWC</b>    | Underwater Optical Wireless Communication              |
| <b>UVLC</b>    | Underwater Visible Light Communication                 |
| <b>UWSN</b>    | Underwater Wireless Sensors Network                    |

