

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة

Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك

Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes de Télécommunication

Présenté par

AKACHA ABDELJAOUD & BOUATTOU MOUHAMED

Étude et simulation d'un réseau Li-Fi

Proposé Par :

Mr YACINE BENNANI

Année Universitaire 2024-2025.

الملخص:

تتناول هذه المذكرة دراسة تقنية لاي فاي، وهي تقنية حديثة للاتصال اللاسلكي تعتمد على الضوء لنقل البيانات بدلاً من الموجات الراديوية المستخدمة في تقنيات الواي فاي التقليدية، تعتمد هذه التقنية على مصابيح قادرة على الوميض بترددات عالية جداً لا تُلاحظ بالعين المجردة، ما يسمح بإرسال معلومات رقمية تُنقَط من قبل مستقبلات ضوئية (فوتوديودات)، ويتميز نظام بعدة مزايا من أبرزها السرعة العالية في نقل البيانات، زمن الاستجابة المنخفض، ومستوى الأمان المرتفع، نظراً لعدم قدرة الإشارات الضوئية على اختراق الجدران. وتُعد هذه الخصائص مثالية للاستخدام في البيئات التي تتطلب درجات عالية من الأمان والدقة، مثل المستشفيات والطائرات.

Résumé : Ce mémoire porte sur l'étude de la technologie Li-Fi (Light Fidélité), une méthode de communication sans fil innovante qui utilise la lumière pour transmettre des données, en remplacement des ondes radio utilisées dans les technologies Wi-Fi classiques. Cette technologie repose sur des lampes LED capables de clignoter à des fréquences très élevées, imperceptibles à l'œil nu, permettant ainsi la transmission d'informations numériques captées par des photodiodes. Le système Li-Fi se distingue par plusieurs avantages, notamment un débit de transmission élevé, une faible latence et un niveau de sécurité accru, puisque les signaux lumineux ne traversent pas les murs. Ces caractéristiques en font une solution idéale pour des environnements nécessitant un haut niveau de sécurité et de précision, tels que les hôpitaux ou les avions.

Mots clés : VLC, éclairage LED, communications intérieures, éclairage intelligent, communications optiques sans fil, technologie infrarouge.

Abstract : This thesis focuses on the study of Li-Fi (Light Fidelity), an innovative wireless communication technology that uses light to transmit data, as an alternative to the radio waves used in traditional Wi-Fi systems. This technology relies on LED lamps capable of flashing at extremely high frequencies, invisible to the human eye, allowing the transmission of digital information that is received by photodiodes. The Li-Fi system offers several advantages, including high data transmission speeds, low latency, and enhanced security, as light signals cannot pass through walls. These characteristics make it an ideal solution for environments requiring high levels of security and precision, such as hospitals and airplanes.

Keywords: VLC, LED lighting, indoor communications, smart lighting, wireless optical communications, infrared technology.

Liste des acronymes

Li-Fi : Light Fidelity (communication par lumière visible)

Wi-Fi : Wireless Fidelity (communication sans fil par ondes radio)

VLC : Visible Light Communication (communication par lumière visible)

BER : Bit Error Rate (taux d'erreur binaire)

SNR : Signal to Noise Ratio (rapport signal/bruit)

LOS : Line Of Sight (ligne de visée)

NLOS : Non-Line Of Sight (hors ligne de visée)

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IR : InfraRed (infrarouge)

DAC : Digital-to-Analog Converter (Convertisseur numérique-analogique)

TCA : TransConductance Amplifier

LPF : Low Pass Filter (Filtre passe-bas)

CAN : Convertisseur Analogique-Numérique

PIN : Positive Intrinsic Negative (Photodiode)

APD : Avalance Photo Diode

OOK : On-Off keying (Modulation par extinction de porteuse)

PPM : Pulse Position Modulation (Modulation par position d'impulsion)

VPPM: Variable Pulse Position Modulation (Modulation par position d'impulsion variable)

CSK : Color Shift Keying (Modulation par décalage de couleur)

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

OFDM:Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexage orthogonal par répartition de fréquence)

CAP : Carrierless Amplitude and Phase modulation (Modulation d'amplitude et de phase sans porteuse)

PWM : Pulse Width Modulation

RGB : Red Green Blue

CIE : Commission Internationale de L'éclairage

LED : Light Emitting Diode (diode electroluminescence)

μLED : Micro Light Emitting Diode

OLED :Organic Light Emitting Diode

PLED : Polymer Light Emitting Diode

SMOLED : SmallMolecule Organic Light Emitting Diode

OWC : Optical Wireless Communication

OCC : Optical Camera Communication

RLL : Run Length Limited

IM/DD : Intensity Modulation / Direct Detection (Modulation d'intensité / Détection directe)

RIN : Relative Intensity Noise (Bruit d'intensité relative)

FWHT : Fast Walsh-Hadamard Transform (Transformée rapide de Walsh-Hadamard)

HCM : Hadamard Coded Modulation (Modulation codée Hadamard)

DCR-HCM : DC-Removed Hadamard Coded Modulation (Modulation codée Hadamard avec suppression de la composante continue)

PAPR : Peak-to-Average Power Ratio (Rapport de puissance crête à puissance moyenne)

GPS : Global positioning System (Systeme de Positionnement Global)

Table des matières

Introduction Générale	1
<i>Chapitre 1 Généralités sur le réseau Li-Fi</i>	<i>3</i>
1.1 Introduction au Li-Fi	4
1.2 Avantages et applications	5
1.3 La communication par lumière visible au Li-Fi	9
1.4 La norme IEEE 802.15.7	10
1.5 Architecture d'un système Li-Fi	12
1.6 Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi	13
1.7 Conclusion	15
<i>Chapitre 2 Architecture et modulation du réseau Li-Fi</i>	<i>16</i>
2.1 Émetteurs Li-Fi	17
2.1.1 Description	17
2.1.2 Les diodes électroluminescentes	17
2.1.3 Caractéristiques des LED	20
2.1.4 Efficacité des LED	27
2.2 Récepteurs Li-Fi	31
2.2.1 Description	31
2.2.2 La photodiode	32
2.2.3 Liens de propagation	34
2.3 Bruits dans les systèmes Li-Fi	35
2.3.1 Le bruit quantique	36
2.3.2 Le bruit de fond des radiations	36
2.3.3 Les bruits thermiques	37
2.3.4 Le bruit 1/f	37
2.3.5 Le bruit dans le courant d'obscurité	37
2.3.6 Le bruit d'intensité	38

2.3.7 Ratio signal/bruit (SNR)	38
2.4 La modulation dans les systèmes Li-Fi	38
2.4.1 Nouvelles techniques de modulation numérique pour la VLC et le Li-Fi	40
2.4.2 Modélisation du canal de transmission	41
2.5 Conclusion.....	42
<i>Chapitre 3 Simulation de réseau Li-Fi</i>	43
Introduction	44
3.1 Outils de simulation.....	44
3.2 Modélisation du réseau Li-Fi.....	45
3.2.1 Techniques de modulation dans les systèmes Li-Fi	46
3.3 Paramètres de simulation.....	46
3.4 Résultats de simulation.....	56
3.5 Conclusion.....	57
Conclusion General	58

Liste des Figures

Figure 1.1 Conception d'une architecture Li-Fi au sein de l'hôpital	6
Figure 1.2 Li-Fi en avion [25].	7
Figure 1.3 Exemple d'emploi du Li-Fi dans un environnement intérieur [23].	7
Figure 1.4 Scénario Li-Fi sous-marin (1) [22].	8
Figure 1.5 Scénario Li-Fi dans un environnement intérieur [17].	9
Figure 1.6 Structure du dispositif VLC selon la norme IEEE 802.15.7[9].	12
Figure 1.7 Diagramme d'un système Li-Fi [25]	13
Figure 2.1 Partie émetteur d'un système Li-Fi[11]	17
Figure 2.2 Exemples de classification [12]	19
Figure 2.3 Types des LED	21
Figure 2.4 Prévisions des revenus mondiaux de l'éclairage commercial jusqu'en 2025.....	23
Figure 2.5 Coordonnées de couleur CIE 1931 x-y [1]	26
Figure 2.6 Fonction de sensibilité oculaire basée sur les données CIE de 1978 [17].	29
Figure 2.7 Efficacité lumineuse des LED [17]	30
Figure 2.8 Une illustration de la bande passante optique et électrique [17].	31
Figure 2.9 Partie récepteur d'un système Li-Fi.....	31
Figure 2.10 Liens de propagation. (a) LOS ; (b) NLOS	34
Figure 2.11 Gain de canal LOS.	35
Figure 2.12 Résultats de simulation des différents bruits[19]	38
Figure 3.1 Logiciel du simulation OptiSysteme	45
Figure 3.2 OptiSysteme workspace	47
Figure 3.3 Simulation a 10m	48
Figure 3.4 Tableau des paramètres de simulation à 10m	49
Figure 3.5 Le Débit en fonction de la puissance et le BER à 10 m	49
Figure 3.6 Résultat sur Optical Power à 10m	50
Figure 3.7 Simulation à 50m.....	50
Figure 3.8 Le Débit en fonction de la puissance et le BER à 50 m	51
Figure 3.9 Résultat de la Simulation... ..	52
Figure 3.10 Simulation à 100m	52
Figure 3.11 Le Débit en fonction de la puissance et le BER à 100 m	53
Figure 3.12 Résultat de la Simulation à 100m	54

Figure 3.13	Résultat de BER à 100 m	54
Figure 3.14	Le Débit en fonction de la puissance et le BER à 150 m	55
Figure 3.15	Résultat de la Simulation à 150m	55
Figure 3.16	Résultat dans le BER à 150m	56

Liste des Tableaux

Tableau 1.1	Classement des dispositifs IEEE 802.15.7	11
Tableau 1.2	Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi.	14
Tableau 2.1	Caractéristiques de LED.	18
Tableau 2.2	Tableau comparatif des différentes ampoules existantes.	19
Tableau 2.3	Tableau comparatif des différentes LED selon leurs puissances	20
Tableau 2.4	Mode de fonctionnement au niveau de la couche physique [20].	44
Tableau 3.1	Tableau des paramètres de simulation à 10 m	52
Tableau 3.2	Tableau des paramètres de simulation à 50 m	53
Tableau 3.3	Tableau des paramètres de simulation à 100 m	54
Tableau 3.4	Tableau des paramètres de simulation à 150 m	55

Introduction Générale

Introduction Générale

Le Li-Fi repose exclusivement sur la lumière, présente des avantages uniques, notamment sa capacité à être utilisé sans danger dans des environnements sensibles aux ondes radio, comme les avions ou les hôpitaux. Là où les ondes radio peuvent causer des interférences, cette technologie utilise des ondes lumineuses pour transmettre des données. Elle pourrait même fonctionner sous l'eau, là où le Wi-Fi traditionnel échoue, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour des applications militaires et d'autres domaines spécialisés. Imaginez simplement pouvoir accéder à Internet en passant sous un lampadaire ou télécharger un film directement depuis un éclairage dans votre bureau. Le Li-Fi pourrait, littéralement et figurativement, "éclairer" la voie pour répondre à la demande croissante de connectivité sans fil à haut débit.

En remplaçant les ondes radio par des ondes lumineuses, le Li-Fi représente une méthode innovante de transmission de données sans fil. Les diodes électroluminescentes (LED), que l'on trouve dans des applications courantes comme les feux de circulation, les lampadaires, ou encore les télécommandes, peuvent être allumées et éteintes à une vitesse telle que l'œil humain ne perçoit aucune variation, donnant l'illusion d'une lumière constante. Ce clignotement rapide, bien qu'inoffensif pour les yeux, permet de coder des données en utilisant un système binaire : une LED allumée correspond à un "1" logique, et une LED éteinte à un "0". En variant la fréquence de clignotement, il devient possible de transmettre des informations sous forme de chaînes de 1 et de 0.

Organisation du mémoire

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude et la simulation d'un réseau de communication optique sans fil, basé sur la technologie Li-Fi (Light Fidélité). L'objectif principal est de modéliser et évaluer les performances d'un tel réseau en milieu intérieur, en prenant en compte différents paramètres comme la portée, le débit, la consommation énergétique, ainsi que les contraintes liées à la propagation de la lumière. Cette étude s'appuie sur des outils de simulation performants et repose sur une combinaison de modélisations physiques et numériques.

Le premier chapitre introduit les concepts fondamentaux des communications optiques sans fil et plus particulièrement du Li-Fi, en détaillant ses principes de fonctionnement, ses composants essentiels (LED, photodiodes, modulations), ainsi que ses avantages et limitations par rapport aux technologies traditionnelles comme le Wi-Fi. Il comprend la description de l'architecture réseau simulée et ces protocoles de communication adaptés.

Le deuxième chapitre est dédié à une application pratique de la simulation à un cas concret : par exemple, l'étude de la couverture Li-Fi dans une salle de conférence, un hôpital ou une bibliothèque. Ce chapitre inclut également une comparaison entre les performances simulées du réseau Li-Fi et celles d'un réseau Wi-Fi classique dans le même environnement.

Le troisième chapitre expose la mise en œuvre de la simulation du réseau Li-Fi à l'aide de logiciels tels que MATLAB/Simulink ou COMSOL Multiphasiques. Il comprend la description de l'architecture réseau simulée, les paramètres choisis (position des luminaires, modulation utilisée, nombre d'utilisateurs, etc.), ainsi que les résultats obtenus en termes de couverture, débit, interférences et efficacité énergétique.

Chapitre 1

Généralités sur le réseau Li-Fi

1.1 Introduction au Li-Fi

Le Li-Fi, ou « Light Fidélité », est une technologie qui permet la transmission de données par lumière. Elle repose sur l'utilisation de lampes LED dont l'intensité lumineuse peut varier plus rapidement que l'œil humain ne peut percevoir. Ces variations rapides de lumière permettent de transmettre des informations sans fil à travers l'air. Historiquement, la lumière n'était qu'un moyen de transmission de données jusqu'à une certaine étape du réseau, mais aujourd'hui, elle atteint nos foyers. Le Li-Fi représente l'étape finale de cette évolution en projetant la lumière directement vers les appareils comme les ordinateurs ou les télévisions, et en ne la convertissant en signal électronique qu'à la dernière étape de son parcours.

Contrairement au Wi-Fi qui utilise les ondes radio pour la communication, le Li-Fi utilise la lumière visible, ce qui en fait une version optique du Wi-Fi. Le Li-Fi joue un rôle clé dans l'Internet des objets (IoT), où chaque objet est connecté à Internet. Les LED servent ici de points d'accès pour ces réseaux. Bien que le Li-Fi ne soit pas destiné à remplacer le Wi-Fi, il présente un potentiel immense avec des débits de données pouvant atteindre 3 téraoctets par seconde, bien plus que les 7 Gb/s du Wi-Fi. En outre, l'utilisation de la lumière permet d'éviter les limitations liées à l'encombrement des fréquences radio. Cela offre une bande passante presque illimitée et un spectre sans licence pour ceux qui se trouvent dans la portée de la lumière.

Avec la popularité croissante du Wi-Fi, les fréquences radio disponibles se saturent progressivement. Cette saturation se combine à l'augmentation du nombre de personnes cherchant à se connecter à Internet, ce qui entraîne une élévation continue des fréquences sans fil et une augmentation des interférences RF. Le Li-Fi offre une solution pour contourner ces problèmes. La technologie repose sur la Communication par Lumière Visible (VLC), qui utilise des longueurs d'onde lumineuses comprises entre 400 et 800 THz (780 à 375 nm). Le VLC est une catégorie des technologies de communication sans fil optique.[1]

Les lampes fluorescentes ordinaires peuvent être utilisées pour des transmissions à faible débit (10 kbit/s), tandis que les LED permettent des débits beaucoup plus élevés, allant jusqu'à 500 Mbit/s. Des démonstrations de transmissions de données à faible débit sur des distances allant de 1 à 2 kilomètres ont déjà été réalisées. Pour recevoir ces signaux lumineux, des dispositifs électroniques équipés de photodiodes sont utilisés. Dans certains cas, un appareil photo

numérique ou celui d'un téléphone portable peut également suffire à capter les signaux lumineux. En effet, les capteurs d'image dans ces dispositifs sont constitués de photodiodes (ou pixels), et cette configuration permet une communication multi-canaux, où chaque pixel agit comme un canal de communication, offrant également une prise en charge spatiale pour plusieurs sources lumineuses.

1.2 Avantages et applications

Les systèmes Li-Fi présentent de nombreux avantages par rapport aux technologies utilisant les ondes radio. Voici les principaux :

Spectre lumineux étendu : La lumière visible offre une bande passante bien plus vaste, allant de 400 à 780 THz, soit environ 1000 fois plus large que celle des ondes radio, qui se limitent à une plage de 3 kHz à 300 GHz.

Absence d'interférences électromagnétiques : Le Li-Fi ne génère pas d'interférences, ce qui en fait une technologie idéale pour les environnements sensibles aux perturbations électromagnétiques, comme les hôpitaux, les avions ou les centrales nucléaires.

Implémentation simple : Les composants du Li-Fi peuvent être miniaturisés et facilement intégrés aux installations d'éclairage existantes. Les éléments comme la modulation, le contrôle électronique ou les convertisseurs peuvent être intégrés directement dans les lampes LED, tandis que les récepteurs peuvent être portables ou fixes.

Efficacité énergétique élevée : Les LED sont des sources lumineuses à faible consommation d'énergie et représentent l'éclairage du futur. Elles permettent de réduire jusqu'à 80 % la consommation d'énergie par rapport aux sources traditionnelles. À l'échelle mondiale, remplacer toutes les lampes classiques par des LED permettrait de diviser par deux la consommation d'électricité. Le Département américain de l'énergie estime qu'une économie de 217 TWh pourrait être réalisée d'ici 2025 grâce à l'adoption massive des LED.

Sécurité sanitaire : Contrairement aux dispositifs utilisant des ondes radio ou micro-ondes, les LED n'émettent pas de rayonnement nocif. Leur lumière est diffusée de manière sécurisée, rendant leur utilisation sans danger pour la santé dans la plupart des environnements.

Protection des données : Contrairement aux ondes radio qui peuvent traverser les murs et exposer les communications à des risques d'espionnage, le signal lumineux du Li-Fi est limité aux espaces fermés, ce qui renforce la confidentialité des échanges [2].

Ces caractéristiques ouvrent la voie à un large éventail d'applications, tant en intérieur qu'en extérieur. Une application particulièrement prometteuse est l'accès Internet haut débit via l'éclairage LED des habitations ou des bureaux. Étant donné que les gens passent beaucoup de temps dans des espaces clos, cela offrirait un moyen simple et efficace de se connecter à Internet. Les capacités de modulation des LED, bien que naturellement limitées, peuvent être améliorées par des techniques avancées comme la modulation multi porteuse ou le multiplexage en longueur d'onde, permettant ainsi d'atteindre des débits équivalents à plusieurs gigabits par seconde, bien supérieurs au Wi-Fi actuel [3].

Dans des lieux sensibles comme les hôpitaux, les avions ou les centrales nucléaires, où l'utilisation d'appareils émettant des ondes électromagnétiques est strictement encadrée voire interdite, le Li-Fi offre une alternative de communication fiable et sécurisée, sans risque de perturber les équipements environnants.



Figure 1.1 Conception d'une architecture Li-Fi au sein de l'hôpital

Dans certaines situations, les utilisateurs préfèrent échanger des données directement entre eux, sans passer par une infrastructure réseau. C'est notamment le cas dans les communications entre machines (M2M) ou entre appareils (D2D). Grâce à la technologie VLC, deux terminaux équipés, comme des Smartphones ou des ordinateurs portables, peuvent établir une connexion directe de type point à point. Dans ce contexte, la communication par lumière apparaît comme une alternative viable et efficace.



Figure 1.2 Li-Fi en avion [6].

Il est bien établi que les LED sont naturellement capables d'émettre de la lumière tout en servant de support à la transmission d'informations. Elles peuvent être utilisées dans divers environnements publics, comme les halls d'attente d'aéroports ou de gares, en étant intégrées à des écrans ou des panneaux d'affichage pour transmettre des messages aux voyageurs. En utilisant le capteur d'image d'une caméra comme récepteur, la technologie de communication optique par caméra (OCC) permet de capter ces données transmises par la lumière. De la même manière, dans les centres commerciaux ou les magasins, les LED peuvent servir à diffuser des informations sur les produits ou des publicités aux clients. Ce type de diffusion discrète et efficace peut également être mis en œuvre dans les musées, les expositions ou les galeries pour partager du contenu informatif avec les visiteurs [4].

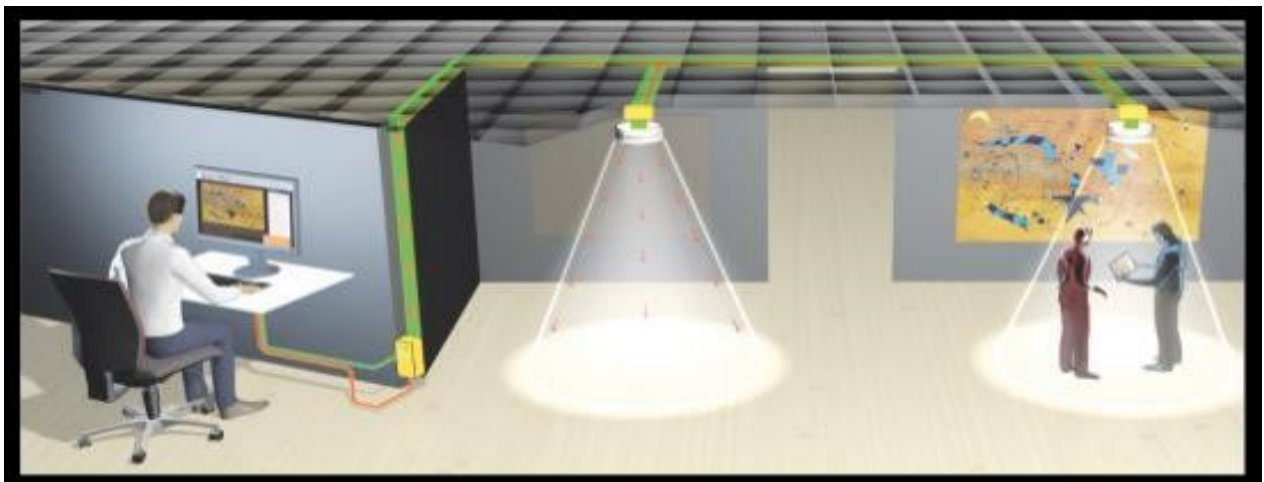


Figure 1.3 Exemple d'emploi du Li-Fi dans un environnement intérieur [8].

Par ailleurs, la forte densité d'installation des LED peut être exploitée pour localiser précisément les utilisateurs en intérieur. En utilisant des techniques de triangulation, il devient possible de déterminer la position d'un appareil avec une grande précision. Ce système de positionnement intérieur, rendu possible par la lumière LED, fonctionne d'une manière similaire au GPS, mais dans des environnements clos où les signaux satellites ne sont pas accessibles. De plus, les LED peuvent émettre des signaux de contrôle destinés à des robots intelligents, leur permettant de se déplacer avec exactitude selon un itinéraire défini à l'avance.[5]

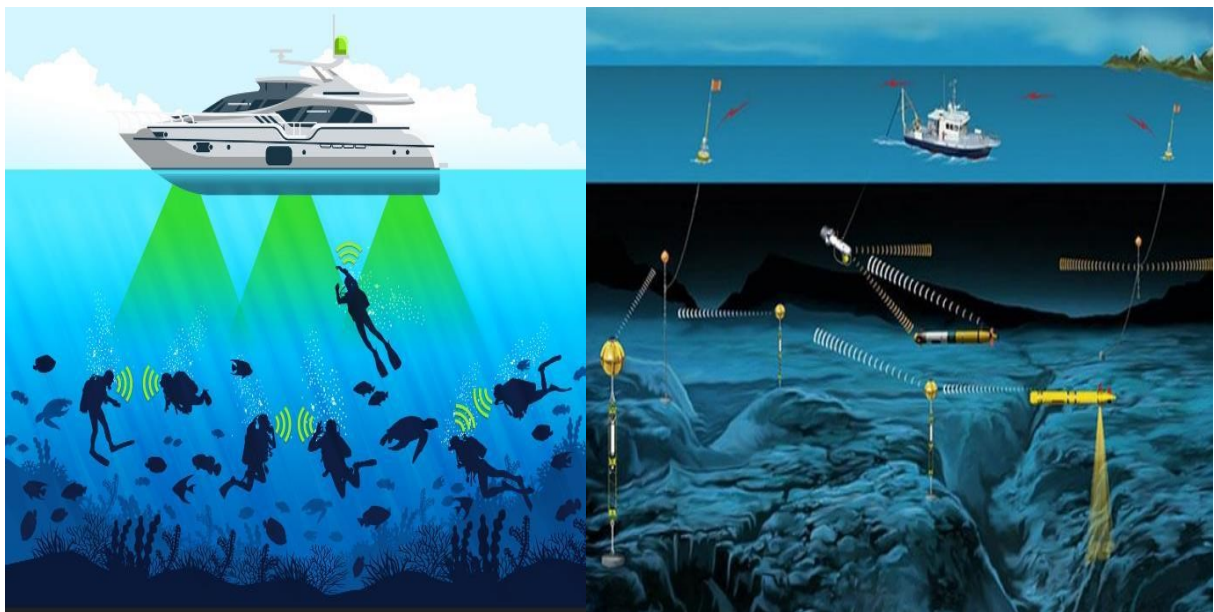


Figure 1.4 Scénario Li-Fi sous-marin [12].

Comme les LED sont largement déployées en extérieur, elles peuvent être utilisées pour établir des connexions VLC sans fil dans divers contextes. Par exemple, les lampadaires, les feux de circulation ou encore les phares des véhicules peuvent permettre une communication entre véhicules, entre infrastructures routières et automobiles, ou encore entre voitures et feux de signalisation. Étant donné que les véhicules modernes sont généralement équipés de capteurs d'image, ces dispositifs peuvent simultanément capter les données transmises et estimer leur propre mouvement par rapport à l'environnement. En outre, la communication optique par lumière visible s'avère également prometteuse pour les communications sous-marines, notamment dans les missions d'exploration océanique.

Les différentes applications du VLC, qu'elles soient en intérieur ou en extérieur, couvrent un large éventail de secteurs et sont appelées à se déployer progressivement sur plusieurs marchés. Elles permettent de proposer des services variés, allant de la transmission de données à faible débit jusqu'à des communications à haut débit, en incluant aussi des fonctions de localisation et de navigation précises, ainsi que des solutions pour les systèmes de transport intelligents. Grâce à l'utilisation de la lumière visible, cette technologie offre un potentiel prometteur pour accompagner les évolutions de notre quotidien moderne.

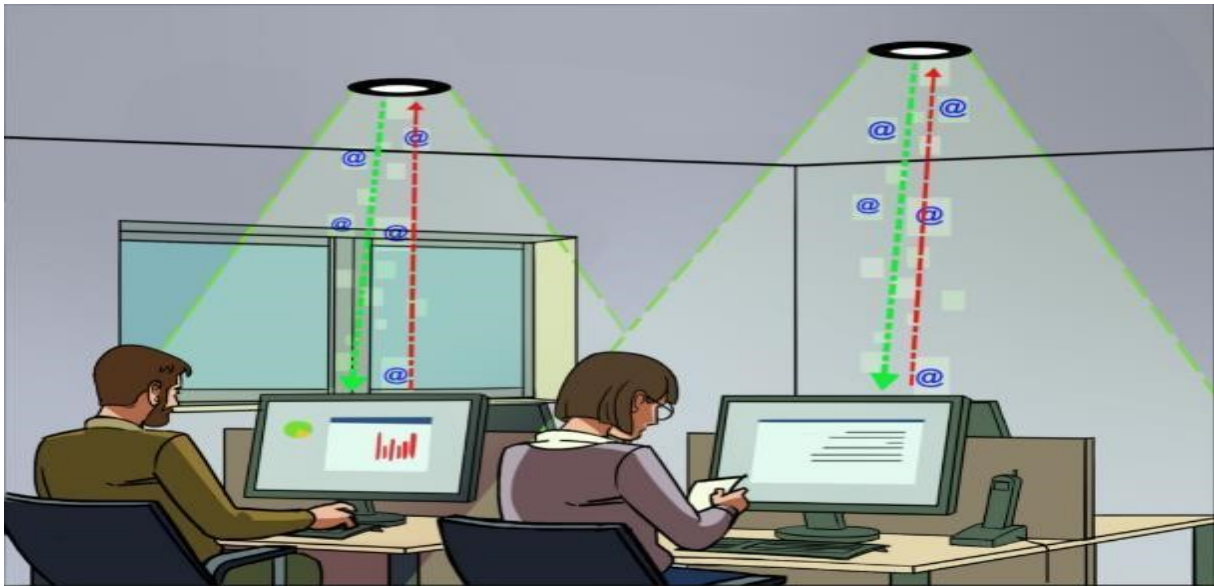


Figure 1.5 Scénario Li-Fi dans un environnement intérieur [17].

1.3 La communication par lumière visible au Li-Fi

Avec le développement constant de la technologie VLC, il devient indispensable de mettre en place des standards appropriés afin d'unifier les protocoles au niveau des couches physique (PHY) et liaison de données (MAC). Cette harmonisation facilite l'intégration rapide des avancées technologiques dans des applications concrètes, ce qui a suscité l'intérêt de nombreuses organisations de normalisation, tant au niveau international que national. En 2011, le groupe de travail **IEEE 802.15.7** a publié la première norme internationale dédiée à la VLC, connue sous le nom d'**IEEE 802.15.7**, destinée aux réseaux personnels sans fil. Cette norme définit précisément les spécifications techniques des couches PHY et MAC pour les communications sans fil à courte portée utilisant la lumière visible, que ce soit en intérieur ou en extérieur [1].

La norme *IEEE 802.15.7* prévoit également l'intégration de dispositifs de gradation permettant de moduler l'intensité lumineuse tout en optimisant la consommation d'énergie. Pour que l'éclairage conserve son efficacité, ces dispositifs doivent fonctionner de manière cohérente avec les circuits de transmission Li-Fi. Sur le plan des infrastructures, remplacer les ampoules traditionnelles par des LED permettrait de créer un réseau capable à la fois d'éclairer et de transmettre des données.

Contrairement aux technologies radiofréquences, la lumière visible appartient à une plage spectrale totalement différente, éliminant ainsi toute interférence avec les dispositifs RF. Cela rend le Li-Fi particulièrement adapté à des environnements sensibles comme les avions et les hôpitaux. Tandis que le VLC reste limité à des zones de couverture restreintes, le Li-Fi, en utilisant l'ensemble du spectre lumineux, permet une communication plus étendue. Le Li-Fi, qui est une des nombreuses applications de la VLC, se distingue également par l'utilisation possible de lumière infrarouge pour les transmissions, atteignant des débits pouvant aller jusqu'à 40 Gbps.

Cependant, il convient de noter que les signaux radio sont moins sensibles aux interférences lumineuses, ce qui confère à la RF une certaine robustesse. Ainsi, le Li-Fi n'a pas vocation à remplacer les technologies radio, mais plutôt à les compléter selon les besoins du contexte d'usage.

1.4 La norme IEEE 802.15.7

Selon la norme IEEE 802.15.7, les transmissions à faible débit via la couche physique de niveau I (PHY I) utilisent principalement des schémas de modulation comme l'On-Off Keying (OOK) ou la modulation par position d'impulsion variable (VPPM). La modulation VPPM permet d'atteindre un débit de 100 kb/s avec une fréquence d'horloge de 200 kHz, et jusqu'à 266 kb/s lorsque la fréquence passe à 400 kHz. En ce qui concerne la couche PHY II, l'utilisation de la modulation OOK avec une horloge cadencée à 120 MHz peut permettre un débit allant jusqu'à 96 Mb/s. Par ailleurs, la modulation VPPM appliquée à cette couche, avec une fréquence d'horloge de 7,5 MHz, permet d'atteindre un débit d'environ 5 Mb/s. [8] La couche PHY III, quant à elle, est dédiée à la modulation par décalage de couleur (CSK), qui nécessite l'emploi de LED à puces multiples. Cette méthode permet de transmettre des données à une vitesse de 96 Mb/s lorsqu'elle est utilisée en mode 16-CSK avec une fréquence d'horloge de 24 MHz. Des expériences ont démontré qu'il est possible d'obtenir des débits

encore plus élevés en adoptant des techniques comme la modulation d'amplitude en quadrature (QAM). En complément, une approche basée sur la répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), qui repose sur l'utilisation de nombreuses sous-porteuses, a également été explorée pour améliorer les performances de transmission des signaux numériques.

	Infrastructure	Mobile	Véhicule
Coordinateur fixe	Oui	Non	Non
Source de courant	Ample	Limitée	Modérée
Facteur de forme	Non contraint	Contraint	Contraint
Source de lumière	Intense	Faible	Intense
Mobilité physique	Non	Oui	Oui
Intervalle	Court/long	Court	Long
Débit de données	Elevé/bas	Elevé	Bas

Tableau 1.1 Classement des dispositifs IEEE 802.15.7 [13]

D'autres techniques de modulation, comme la modulation d'amplitude associée à une modulation de porteuse en phase réduite (CAP), ont permis d'atteindre des débits allant jusqu'à 1 Gb/s. Toutefois, il reste encore des efforts à fournir du côté de l'optique de réception, notamment pour améliorer la portée et la capacité de détection des signaux lumineux.

La norme **IEEE 802.15.7** constitue une base fondamentale pour le développement de dispositifs compatibles avec la communication par lumière visible. Comme le montre le tableau 2.1, cette norme s'applique à trois grandes catégories de dispositifs : ceux destinés au secteur automobile, aux appareils mobiles et aux infrastructures fixes. Afin de faire évoluer cette norme et de l'adapter aux nouveaux besoins technologiques, un groupe de travail nommé **802.15.7r1** a été mis en place en 2014, aboutissant à la publication d'une version mise à jour en 2017 [9].

Par la suite, en 2018, une nouvelle spécification intitulée **IEEE 802.15.7m** a vu le jour. Celle-ci vise à étendre les capacités de la norme initiale en y intégrant les technologies de communication par caméra optique (OCC), qui reposent sur l'utilisation de capteurs d'image, ainsi que des modes de communication unidirectionnelle à faible débit basés sur l'utilisation de LED. Parallèlement, la norme **IEEE 802.15.13** a été élaborée pour soutenir les évolutions de la communication optique sans fil (OWC) à haut débit.

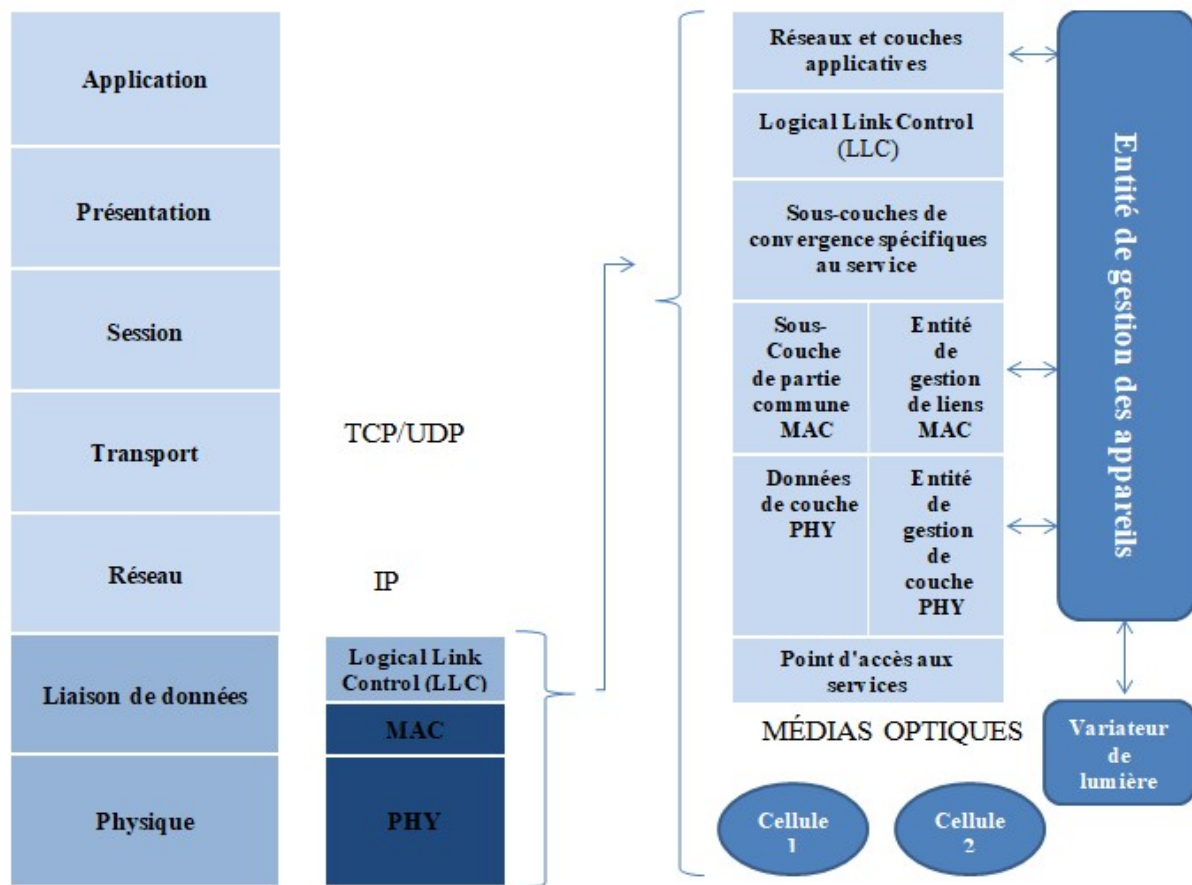


Figure 1.6 Structure du dispositif VLC selon la norme IEEE 802.15.

1.5 Architecture d'un système Li-Fi

Un dispositif Li-Fi se compose de deux éléments principaux : un émetteur, qui module l'intensité lumineuse émise par des LED, et un récepteur, généralement équipé d'un photodétecteur, chargé de capter et de décoder le signal lumineux transmis. La communication entre ces deux composants s'effectue par l'intermédiaire d'un canal de transmission utilisant la lumière visible (VLC).

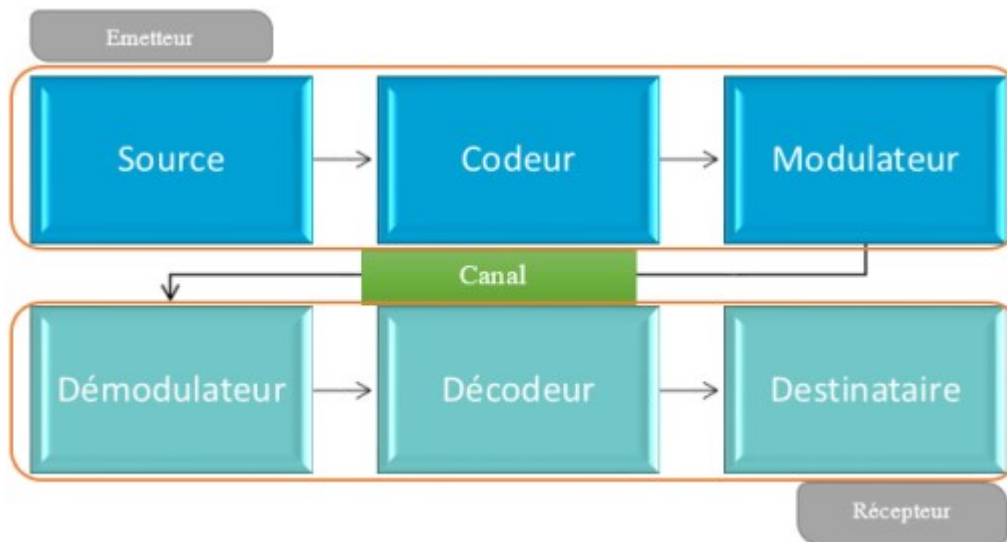


Figure 1.7 Diagramme d'un système Li-Fi [25]

1.6 Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi

Le Li-Fi, ou communication par lumière visible, désigne une technologie sans fil à haut débit reposant sur l'utilisation de la lumière, contrairement au Wi-Fi, qui s'appuie sur les ondes radio. Le nom "Li-Fi" s'inspire directement de celui du Wi-Fi, soulignant leur parenté fonctionnelle. Alors que le Wi-Fi est bien adapté à une couverture large dans les bâtiments, le Li-Fi se distingue par sa capacité à fournir un accès sans fil performant dans des espaces confinés, tout en minimisant les risques d'interférences électromagnétiques.

Les deux technologies ne sont pas en concurrence directe, mais plutôt complémentaires : le Wi-Fi reste idéal pour les zones étendues, tandis que le Li-Fi excelle dans les environnements nécessitant une haute densité de données et une sécurité accrue. Le Li-Fi offre ainsi plusieurs avantages, notamment en matière de capacité de transmission, d'efficacité énergétique, de sécurité des données et de fiabilité. Malgré ses atouts distincts, il est destiné à fonctionner en synergie avec le Wi-Fi. Un tableau comparatif présenté ci-dessous illustre les principales différences entre le Li-Fi et le Wi-Fi.

Sécurité	Il est plus sûr car les ondes lumineuses ne peuvent pas traverser les murs et ne peuvent être captées par personne en dehors de l'éclairage LED.	En raison de l'énorme force de dispersion des ondes radio, n'importe qui sur la route peut les intercepter.
Coût	Bas	Plus élevé
Modulation	DCO-OFDM	Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
Architecture	AttoCell	FemtoCell

	Li-Fi (Light Fidelity)	Wi-Fi (Wireless Fidelity)
Normes	IEEE 802.15.xx	IEEE 802.11.xx
Spectre disponible	380 THz	300GHz
Opérations	Li-Fi transmet des données par la lumière à l'aide des ampoules LED.	Wi-Fi transmet des données par le biais des ondes radio à l'aide d'un routeur Wi-Fi
Bande passante	Non limitée.	Limitée.
Topologie	Point-à point.	Point-à-multipoints.
Interférences Electromagnétiques	Non.	Oui.
Densité de données	Fonctionne dans un environnement très dense.	Fonctionne dans un environnement moins dense en raison des problèmes liés aux interférences.
Couverture	Environ 10 mètres.	Environ 32 mètres (WLAN 802.11b/11g), varie en fonction de la transmission.
Composants du système	Le pilote de lampe, l'ampoule LED et le photodétecteur.	Nécessite l'installation de routeurs, les appareils des utilisateurs (ordinateurs portables, PDA, etc.)

Tableau 1.2 Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi.

1.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'introduire les systèmes Li-Fi, une technologie de communication sans fil à part entière, capable de gérer des échanges bidirectionnels, mobiles et multiutilisateurs. Le Li-Fi représente une alternative innovante et prometteuse face à certaines limites rencontrées avec le Wi-Fi.

Nous avons également mis en lumière les principaux atouts de cette technologie, ainsi que ses nombreuses applications possibles dans des domaines variés. Toutefois, en raison du manque actuel de dispositifs grand public compatibles, le Li-Fi semble pour le moment davantage destiné à des usages professionnels ou spécialisés.

L'architecture typique d'un système Li-Fi et ses composants fondamentaux ont été brièvement présentés, et feront l'objet d'une analyse approfondie dans le chapitre 3. Une première approche de la norme *IEEE 802.15.7*, qui encadre les communications à haut débit via des sources lumineuses optiques modulables jusqu'à **96 Mb/s**, a également été évoquée. Enfin, une introduction à la problématique de la sécurité dans les communications par lumière visible a été proposée, sujet qui sera traité de manière plus détaillée dans les prochains chapitres.

Chapitre 2

Architecture et modulation du réseau Li-Fi

2.1 Émetteurs Li-Fi

2.1.1 Description

Un émetteur VLC est un dispositif qui convertit les signaux électriques en signaux lumineux visibles afin de transmettre des données sans fil [10]. Ce processus repose sur une chaîne de composants comprenant un convertisseur numérique-analogique (DAC), qui encode les bits d'information en signaux analogiques, un amplificateur de transconductance (TCA), des filtres passe-bas (LPF) ainsi que des LED à haute vitesse [11].

La LED joue un rôle clé en convertissant ces signaux électriques en impulsions lumineuses, permettant ainsi de combiner fonction d'éclairage et transmission de données. Avant cette conversion, les données sont modulées en temps réel par le DAC, en ajustant des caractéristiques telles que l'intensité ou une autre propriété de la lumière émise par la LED [12].

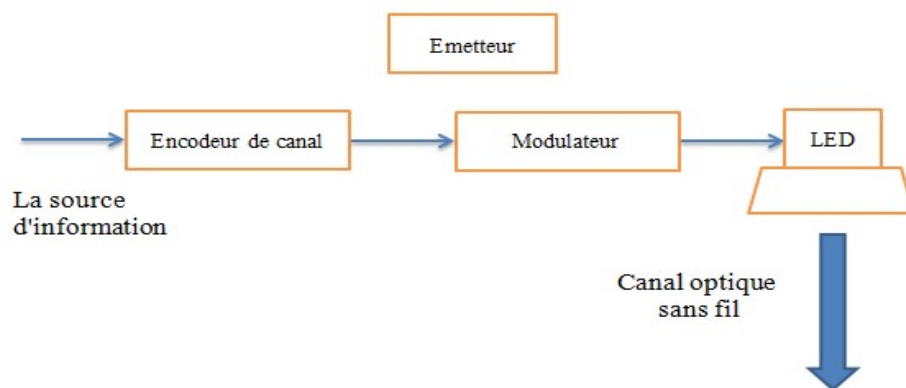


Figure 2.1 Partie émetteur d'un système Li-Fi.

2.1.2 Les diodes électroluminescentes

Lorsqu'une LED est activée, elle convertit le courant électrique en lumière visible, émettant une couleur spécifique selon sa longueur d'onde (rouge, verte, bleue, jaune, etc.). En revanche, lorsque la diode est en position de blocage, elle cesse d'émettre de la lumière.

LED et technologie Li-Fi

Le Li-Fi repose sur l'utilisation de la lumière émise par les LED pour transmettre des données. Cette innovation, bien que conceptualisée plus tôt, a pris une dimension pratique et commerciale dans les années 1990 grâce aux avancées techniques réalisées par Shiji Nakamura et Takashi Muchai de l'entreprise Nichai.

Aujourd'hui, les LED sont de plus en plus présentes sur le marché, utilisées aussi bien pour l'éclairage que dans des dispositifs d'affichage tels que les téléviseurs ou les smartphones. Elles remplacent progressivement les anciennes technologies d'éclairage comme les ampoules à incandescence, les halogènes ou les tubes fluorescents. Au cours de la dernière décennie, leurs performances ont été considérablement améliorées, et plusieurs défauts techniques ont été corrigés. Par exemple, l'indice de rendu des couleurs, qui se limitait autrefois à 80 %, atteint désormais près de 100 %, offrant ainsi une qualité lumineuse nettement supérieure.

Couleur	Longueur d'ondes (nm)	Tension de seuil (V)	Semi-conducteur utilisé
Infrarouge	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$	AlGaAs
Rouge	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	AlGaAs) GaAsP
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	GaAsP
Jaune	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	GaAsP
Vert	$500 < \lambda < 570$	$2.18 < \Delta V < 2.48$	GaN GaP
Bleu	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 2.76$	ZnSe InGaN SiC
Ultra-Violet	$\lambda < 400$	$\Delta V > 3.1$	C AlN AlGaIn

Tableau 2.1 Caractéristiques de LED.

Le tableau récapitule les avantages des LED et les raisons pour lesquelles elles sont mieux Adaptées au Li-Fi.



Technologie	Lampe incandescent	Lampe halogène	Lampe fluorescente	Lampe à LED	OLED
Rendement (Lumen/watt)	10 - 20	15 - 20	40 - 70	70 - 100	30 - 60
durée de vie moyenne (heures)	1000 - 2000	2000 - 3000	6000 - 15000	15000 - 50000	10000 - 50000
temps d'allumage	Lent	Lent	Très Lent	Immédiat	Immédiat
cycles de commutation	6000	8000	30000	50000	60000
Indice de rendu des couleurs (IRC de 0 à 100)	100	80	100	80 - 100	85 - 90
Température de fonctionnement (°C)	600	725	60	35	< 35
Recyclage	Pas recyclable peu polluant	Pas recyclable peu polluant	recyclable polluant	Recyclable Très peu polluant	Recyclable Très peu polluant

Tableau 2.2 Tableau comparatif des différentes ampoules existantes.

Les LED peuvent être classifiés selon plusieurs types :

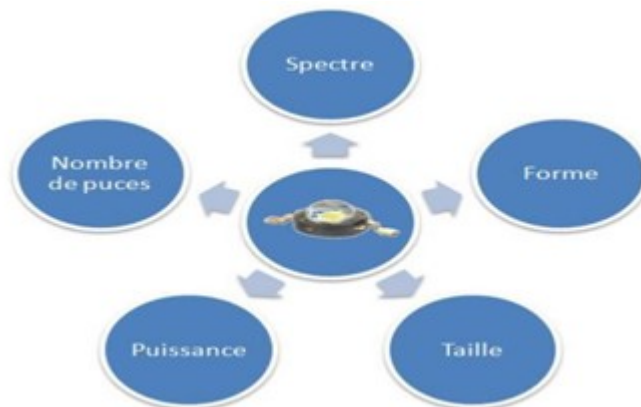


Figure 2.2 Exemples de classification.

Selon ces aspects, il existe :

- ✓ LED SMD (Surface Mounted Device)
- ✓ LED Blanches
- ✓ LED de couleurs

- ✓ LED UVS
- ✓ LED de puissance
- ✓ LED organiques
- ✓ LED multicolores

Le tableau ci-dessus montre quelques types de LED selon leurs puissances.

Puissance (W)	Puissance driver (W)	Puissance totale (W)	Flux lumineux (lm)	Efficacité lumineuse (lm/w)	IRC	Température de couleur (°K)	Durée de vie (h)
3	0,6	3.6	136	45	80-90	2 700-3 000	15 000-30 000
5	0.9	5.9	250	50			
8	1.6	9.6	470	59			
10	2	12	650	65			
12	2.4	14.4	810	68			
14.5	5.9	20.4	1055	73			

Tableau 2.3 Tableau comparatif des différentes LED selon leurs puissances

2.1.3 Caractéristiques des LED

L'une des premières LED rouges a été fabriquée en 1962 à partir du composé GaAsP. Comparées aux sources lumineuses traditionnelles telles que les ampoules à incandescence ou fluorescentes, les LED se distinguent par leur haute efficacité énergétique, leur luminosité, leur durée de vie prolongée et leur grande fiabilité.

Grâce à l'optimisation des matériaux semi-conducteurs de type III-V et aux progrès dans les techniques d'épithaxie, les performances des LED ont connu une amélioration notable au cours des cinq dernières décennies. L'efficacité lumineuse des LED commerciales est passée de seulement 0,1 lumen par watt à plus de 100 lumens par watt aujourd'hui. De plus, les LED modernes sont capables d'émettre de la lumière dans l'ensemble du spectre visible, allant du violet (longueur d'onde courte) au rouge (longueur d'onde longue). De ce fait, elles sont désormais omniprésentes dans notre quotidien, utilisées aussi bien pour l'éclairage général que pour les panneaux de signalisation routière ou les écrans plats [1].

Leur part de marché dans le secteur de l'éclairage mondial ne cesse de croître, et les revenus liés aux ventes de LED devraient dépasser les 20 milliards de dollars américains dans un

avenir proche. Bien que leur coût initial reste plus élevé que celui des solutions d'éclairage traditionnelles, il est attendu que l'industrialisation accrue et les avancées en matière de fabrication entraînent une baisse progressive des prix.

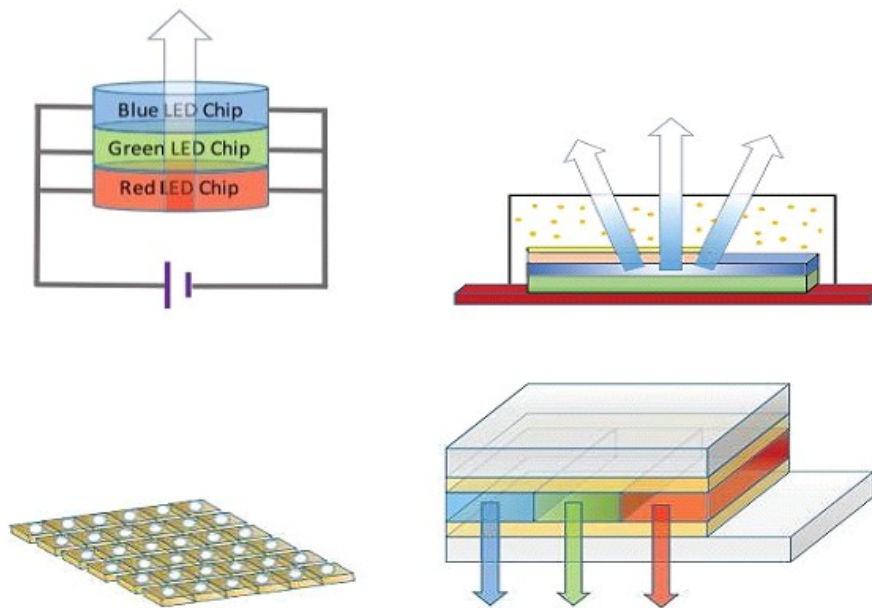


Figure 2.3 Types des LED

Les pc-LED commerciales standard intègrent généralement un phosphore à base de grenat d'yttrium et d'aluminium dopé au cérium, qui génère une lumière jaune lorsqu'il est excité. Cette lumière est ensuite combinée à la lumière bleue émise par une puce LED en nitrure de gallium (Gan) [13]. Grâce aux progrès récents dans les technologies de fabrication, ces LED ont vu leur efficacité lumineuse grimper à plus de 150 lumens par watt [1]. Toutefois, leur bande passante de modulation reste limitée à quelques mégahertz, en raison de la lenteur de la réponse du phosphore utilisé [1].

En parallèle, les LED multi-puces utilisent plusieurs (généralement trois) puces émettant des lumières monochromatiques distinctes (rouge, verte et bleue – RGB) qui sont ensuite combinées selon des proportions précises pour produire une lumière blanche. Ce type de LED permet non seulement un excellent contrôle dynamique de la couleur, mais également un indice de rendu des couleurs (IRC) très élevé, supérieur à 95. En intégrant des capteurs externes (thermiques, optiques ou électriques), il est possible de corriger les variations indésirables de la couleur émise. Bien que plus coûteuses et techniquement plus complexes, les LED multi-puces offrent une bande passante de modulation nettement supérieure à celle des pc-LED [14].

Concernant les OLED, leur structure repose sur des couches minces de matériaux organiques semi-conducteurs, disposées entre deux électrodes (anode et cathode). Leur mécanisme d'émission lumineuse diffère de celui des LED inorganiques. Lorsqu'un électron et un trou se recombinent, ils forment un exciton (état singulet ou triplet) dont la désexcitation produit la lumière. La longueur d'onde de cette émission dépend du matériau utilisé dans la couche active, et non de la bande interdite du semi-conducteur. On retrouve les OLED à petites molécules (SMOLED) ou à base de polymères (PLED) principalement dans les écrans plats. Par rapport aux écrans à cristaux liquides, les OLED offrent de nombreux avantages : consommation énergétique réduite, contraste élevé, fréquence de rafraîchissement rapide et rendu des couleurs amélioré.

Enfin, les μ LED (micro-LED) représentent une technologie émergente qui s'impose dans les micro-écrans auto-émissifs, les dispositifs de photo stimulation localisée ou encore les systèmes hybrides inorganiques/organiques. Contrairement aux écrans LCD, les écrans μ LED sont auto-lumineux et très efficaces sur le plan énergétique. Ils offrent également un large angle de vision sans perte de qualité de l'image ni distorsion des couleurs. À la différence des matériaux organiques utilisés dans les OLED, les μ -LED, constituées de composants inorganiques, sont chimiquement stables et bénéficient d'une longévité accrue. Ces écrans intègrent des éléments lumineux très compacts, souvent de dimensions inférieures à quelques micromètres (μm^2) [21].

Aux États-Unis, le nombre total d'unités installées pour la production de LED, toutes applications confondues, a atteint environ 105 millions, soit plus du double du nombre enregistré en 2012. La valeur marchande des LED devait représenter environ 60 % de l'ensemble du marché de l'éclairage à la même échéance, issue d'une étude récente menée par Navigant Research, illustre cette dynamique dans le domaine de l'éclairage commercial, couvrant les espaces tels que les bureaux, les commerces de détail, les établissements d'enseignement et les structures de santé. Selon les données du graphique, une progression importante des revenus issus des ventes mondiales de LED commerciales est attendue jusqu'en 2025 [22].

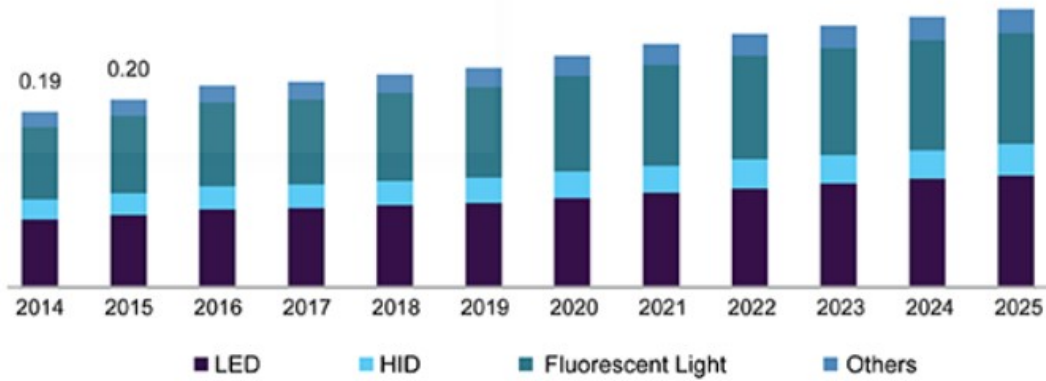


Figure 2.4 Prévisions des revenus mondiaux de l'éclairage commercial jusqu'en 2025

Commande de gradation (Deming Control)

La perception de la luminosité par l'œil humain est modélisée par la fonction d'efficacité lumineuse spectrale $V(\lambda)$, telle que définie par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Cette fonction indique que la vision humaine est la plus sensible à la lumière dans les longueurs d'onde intermédiaires, et moins réceptive aux extrémités du spectre, c'est-à-dire aux longueurs d'onde courtes et longues. La quantité de lumière perçue est exprimée par le flux lumineux, calculé à l'aide d'une intégrale pondérée qui tient compte de la distribution spectrale de puissance et de l'efficacité lumineuse humaine. [1].

$$\Phi = k_m \int \lambda p(\lambda) v(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Ici, la constante K_m , qui vaut 683 lumens par watt (lm/W), sert à convertir une puissance rayonnée en une quantité de lumière visible pour l'œil humain. La variable $P(\lambda)$ représente la distribution spectrale de cette puissance. En conséquence, l'intensité lumineuse peut être déterminée à partir de cette information en prenant en compte l'angle solide dans lequel la lumière est émise.

$$I_t = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2)$$

Les diodes électroluminescentes (LED) sont des composants semi-conducteurs particuliers qui produisent une lumière non cohérente lorsqu'elles sont alimentées. Dans les systèmes de

communication optique en lumière visible (VLC), les données sont généralement encodées en modulant la puissance lumineuse émise instantanément par la LED. Pour les applications d'intérieur, il est souvent nécessaire de réduire l'intensité lumineuse afin de s'adapter aux besoins d'éclairage ambiant. Le circuit de commande, généralement composé de transistors, permet d'intégrer à la fois le signal de modulation et celui de gradation afin de contrôler l'allumage et l'extinction des LED.

Ces dernières années, les systèmes VLC ont principalement été exploités pour assurer des communications à haut débit. Néanmoins, des aspects essentiels tels que la qualité de l'éclairage et l'efficacité énergétique ont souvent été négligés. Les besoins en éclairage dans les environnements intérieurs varient fortement selon les cas d'usage. Par exemple, dans des espaces tels que les chambres ou les salons, une intensité lumineuse très faible – parfois inférieure à 1 % de l'éclairement maximal – peut être suffisante pour créer une atmosphère agréable et confortable. En revanche, des niveaux d'éclairement autour de 300 lux sont recommandés pour la lecture et l'écriture, tandis que 30 lux peuvent suffire pour les activités sur ordinateur. Dans des zones telles que les escaliers ou les couloirs, la flexibilité du niveau de gradation est essentielle afin de prolonger la durée de vie des LED et réduire la consommation énergétique [15].

L'ajustement de la luminosité d'une LED se fait via le contrôle du courant continu qui l'alimente, et cela peut être effectué par plusieurs techniques : la gradation analogique, numérique ou hybride. La gradation analogique ajuste directement l'intensité du courant pour faire varier le flux lumineux de manière linéaire. La gradation numérique, souvent basée sur la modulation de largeur d'impulsion (PWM), fonctionne en maintenant une période fixe pour le signal tout en faisant varier le rapport cyclique en fonction du niveau d'intensité souhaité. La gradation hybride combine ces deux méthodes afin de minimiser les variations indésirables de teinte perçue.

Selon la norme *IEEE 802.15.7*, deux techniques de modulation sont employées pour les communications VLC : le (OOK) et la modulation de position d'impulsion variable (VPPM). Dans le cas de l'OOK, la gradation peut être réalisée soit en variant l'intensité des états "allumé" et "éteint", soit en insérant une période de compensation où la source lumineuse reste stablement allumée ou éteinte, permettant ainsi d'ajouter une composante continue au signal. Pour le VPPM, la largeur d'impulsion de chaque symbole lumineux est ajustée selon le niveau de gradation requis. Cette méthode est analogue à la modulation 2-PPM lorsque le

rapport cyclique atteint 50 %, avec les bits logiques codés via la variation de la largeur d'impulsion.

Gestion de la chromaticité

Lorsque l'on utilise des LED composées de plusieurs puces, la gestion de la chromaticité devient un enjeu crucial, car elle concerne la qualité de la couleur perçue indépendamment de sa luminosité. La vision humaine repose sur trois types de photorécepteurs dans la rétine, chacun sensible à des plages différentes du spectre visible (longue, moyenne et courte longueur d'onde). Ainsi, les couleurs sont généralement représentées par trois composantes de base (rouge, vert, bleu – RGB), associées à des fonctions dites de correspondance des couleurs. Toutefois, certaines de ces fonctions peuvent produire des valeurs négatives, rendant nécessaire une transformation linéaire afin d'obtenir des composantes positives (X, Y, Z), ce qui permet une représentation cohérente de la couleur. Ces nouvelles valeurs peuvent ensuite être utilisées pour calculer les coordonnées de chromaticité (x,y) dans l'espace colorimétrique CIE 1931.

$$x = k_m \int_{\lambda} \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda) \quad (3)$$

$$y = k_m \int_{\lambda} \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda) \quad (4)$$

$$z = k_m \int_{\lambda} \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda) \quad (5)$$

Ensuite, la chromaticité de la couleur peut être représentée par deux points de coordonnées x et y dans le diagramme de l'espace couleur CIE 1931 qui sont définis comme suit

$$x = \frac{x}{x+y+z'} \quad (6)$$

$$y = \frac{y}{x+y+z'} \quad (7)$$

Absence de scintillement dans la communication optique

Le scintillement correspond à des variations, régulières ou irrégulières, de l'intensité lumineuse émise, perceptibles par la vision humaine. Une exposition prolongée à ce phénomène peut entraîner une fatigue oculaire importante, voire altérer la vision. D'après des études statistiques, environ une personne sur 4 000 présente une hypersensibilité aux lumières qui clignotent dans une plage de fréquence allant de 3 à 70 Hz, ce qui souligne l'importance de concevoir des systèmes d'éclairage sans scintillement, notamment pour les applications en communication par lumière visible.

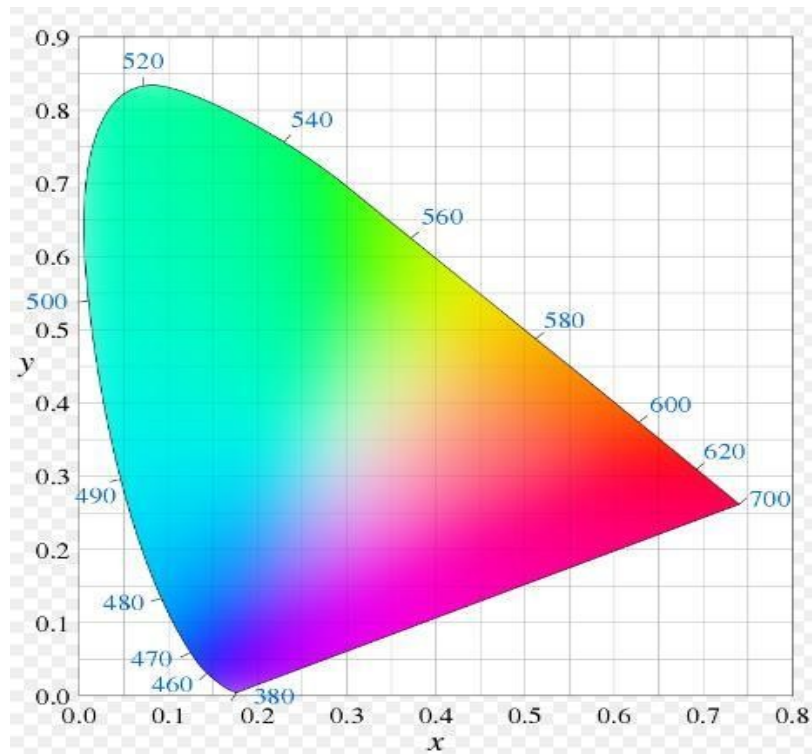


Figure 2.5 Coordonnées de couleur CIE 1931 x - y [1].

Ce qui est souvent moins connu, c'est que l'exposition prolongée à des scintillements indésirables et plus fréquents, dans la plage de fréquence de 70 à 160 Hz, peut entraîner des symptômes tels que des maux de tête, des troubles visuels, voire des malaises. En l'absence de lumière naturelle, les personnes peuvent être exposées à ce type de scintillement provenant de lampes fluorescentes ou de LED, ce qui peut perturber leur confort. Par conséquent, des efforts soutenus ont été consacrés au développement de pilotes LED de haute qualité, capables de commuter rapidement, afin de minimiser les effets négatifs du scintillement.

Il est évident que la réduction du scintillement est essentielle dans les systèmes de communication par lumière visible (VLC). Afin de garantir une transmission sans scintillement, il est nécessaire de s'assurer que le signal est exempt de composante continue, ce qui permet de maintenir une intensité lumineuse moyenne stable. Une méthode pour atteindre ce résultat est l'utilisation de codes de modulation qui n'introduisent pas de courant continu. Un exemple classique de tels codes est le code Manchester binaire, dans lequel le bit "1" est représenté par les symboles $[+1, -1]$ et le bit "0" par les symboles $[-1, +1]$.

La gestion du scintillement se divise en deux stratégies principales : l'atténuation du scintillement intra-trame et la suppression du scintillement inter-trame, comme défini dans la

norme *IEEE 802.15.7*. L'atténuation intra-trame vise à éliminer le scintillement pendant la transmission d'une trame de données. Cette approche est particulièrement importante pour les modulations OOK et VPPM (Variable Pulse Position Modulation) [16].

Cela peut être réalisé en utilisant le mode OOK atténué et le codage de ligne à longueur de course limitée (RLL). Les codes de ligne RLL sont conçus pour éviter les longues séquences de 1 et de 0, lesquelles pourraient engendrer des problèmes de scintillement et compliquer la récupération de l'horloge. Différents types de codes RLL, tels que les codes Manchester, 4B6B et 8B10B, sont spécifiés dans la norme *IEEE 802.15.7*, et offrent un compromis entre la surcharge de codage et la simplicité d'implémentation.

Dans la modulation CSK, ce compromis est atteint en garantissant une puissance moyenne constante sur plusieurs sources lumineuses, ainsi qu'un brouillage et des fréquences d'horloge optique élevées. La gestion du scintillement inter-trame s'applique non seulement à la transmission des données, mais également pendant les périodes d'inactivité. Pendant ces phases d'inactivité, il est possible d'utiliser des modèles de visibilité ou d'inactivité pour garantir que l'émission lumineuse des émetteurs VLC conserve une luminosité moyenne constante tout au long de la période de scintillement maximum adjacente.

2.1.4 Efficacité des LED

L'efficacité du quantificateur interne désigne la capacité du dispositif à convertir les porteurs de charge en photons à l'intérieur du composant. Elle peut être définie comme le rapport entre le nombre de photons produits à l'intérieur du dispositif et le nombre de porteurs de charge traversant la jonction **P.N** du semi-conducteur. En d'autres termes, cette efficacité mesure la proportion de porteurs de charge qui génèrent de la lumière après leur passage à travers la jonction p-n du dispositif LED.

$$\eta_{in} = \frac{\text{Nombre de photo emis a l`interieur}}{\text{Nombre de porteurs passant la jomction}} \quad (8)$$

L'efficacité quantique interne est également liée à la proportion des porteurs de charge injectés qui se recombinent de manière radiative par rapport à l'ensemble des recombinaisons. Cette relation dépend directement des durées de vie des porteurs de charge, et elle peut être décrite à l'aide de l'équation suivante

$$\eta_{in} = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} = \frac{\tau_r}{\tau_r + \tau_{nr}} \quad (9)$$

Où R_r est le taux de recombinaison radiative et R_{nr} représente le taux de recombinaison non radiative, tandis que τ_r et τ_{nr} représentent les durées de vie radiative et non radiative, dans cet ordre.

L'efficacité quantique externe se distingue de l'efficacité quantique interne en ce qu'elle mesure la quantité de photons émis à l'extérieur du dispositif. Elle est définie comme le rapport entre la recombinaison radiative et non radiative, ainsi que l'absorption de la lumière générée par le matériau semi-conducteur

$$\eta_{ex} = \eta_{tn}\eta_t \quad (10)$$

L'efficacité optique, notée η_t , représente le rapport entre les photons émis par la LED vers l'extérieur et ceux produits à l'intérieur. Ce rapport dépend des caractéristiques optiques du dispositif et de son environnement. Pour une LED à semi-conducteur planaire classique, l'efficacité optique peut être aussi faible que 2 %. Une estimation approximative de cette efficacité optique peut être exprimée par la formule suivante

$$\eta_{ex} = \frac{1}{2}(1 - \cos \theta_c) \quad (11)$$

L'angle critique au sein du dispositif joue un rôle clé dans la quantité de photons émis vers l'extérieur et dans l'efficacité quantique externe. Cette efficacité dépend des pertes internes qui peuvent survenir à cause de plusieurs facteurs, notamment :

1. **Perte due à la réflexion interne totale** : Cela se produit lorsque les photons frappent la surface à un angle supérieur à l'angle critique, ce qui empêche leur sortie et les reflète à l'intérieur du dispositif.
2. **Perte par absorption** : Les photons générés peuvent être absorbés par le matériau de la LED, entraînant une perte d'énergie. Par exemple, dans les LED fabriquées avec un substrat opaque comme le GAAS, jusqu'à 85 % des photons générés peuvent être absorbés. En revanche, pour des substrats transparents comme le GAP avec des centres iso-électroniques, cette perte est beaucoup plus faible, avoisinant les 25 %.
3. **Perte de Fresnel** : La réflexion de Fresnel se produit à l'interface entre des matériaux ayant des indices de réfraction différents. Elle entraîne une partie des photons générés à être renvoyée dans le matériau semi-conducteur plutôt que d'être émise à l'extérieur.

En ce qui concerne l'**efficacité énergétique**, elle est définie comme le rapport entre la puissance optique de sortie et la puissance électrique d'entrée de la LED

$$\eta_{in} = \frac{\text{Nombre de photons emis a l`interieur} \times hv}{\text{Nombre de porteurs passant la jomction} \times q \times v} \quad (12)$$

L'efficacité lumineuse est une mesure couramment utilisée pour évaluer les LED qui émettent dans le spectre visible. Elle permet de normaliser l'efficacité en termes de puissance, en prenant en compte un facteur lié à la perception visuelle humaine. Le flux lumineux, exprimé en lumens, décrit la lumière totale, en tenant compte de la façon dont l'œil humain réagit différemment aux diverses longueurs d'onde. Cette pondération de la lumière est effectuée selon la sensibilité visuelle de l'œil, qui varie en fonction de la longueur d'onde de la lumière.

$$\text{flux lumineux} = 683 \int_{\lambda} v(\lambda) P_{op}(\lambda) d(\lambda) \quad (13)$$

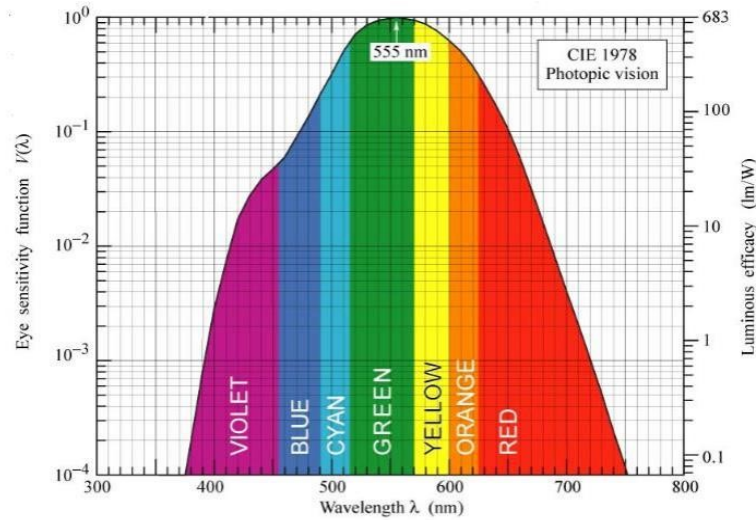


Figure 2.6 Fonction de sensibilité oculaire basée sur les données CIE de 1978 [17].

L'efficacité lumineuse est donc donnée par :

$$n = \frac{683 \int_{\lambda} v(\lambda) P_{op}(\lambda) d(\lambda)}{vl} \frac{Lm}{W} \quad (14)$$

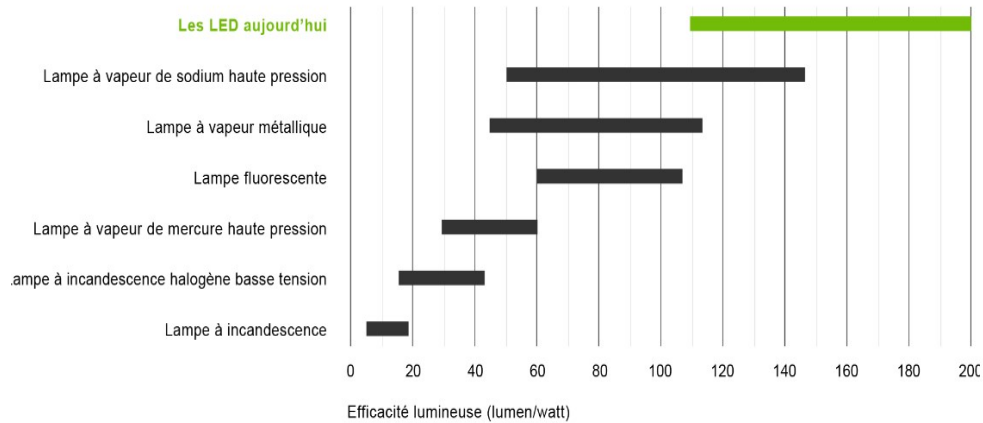


Figure 2.7 Efficacité lumineuse des LED

La largeur de la bande de modulation et la réponse en fréquence d'une LED dépendent de plusieurs facteurs, à savoir (1) le courant injecté, (2) la capacité de jonction et (3) la capacité parasite. Alors que la capacité reste presque constante, la réponse en fréquence tend à augmenter avec le courant appliqué. Pour minimiser l'impact de ces facteurs, une solution consiste à ajouter une polarisation continue constante au signal alternatif. Ainsi, la puissance de sortie optique à une fréquence donnée peut être exprimée en fonction de la puissance du courant continu (P_0) et de celle à la fréquence ($P(\omega)$), comme suit [17].

$$\frac{P(\omega)}{P_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

Il existe deux façons de diminuer la durée de vie effective des porteurs et d'augmenter la largeur de bande de modulation. La première consiste à augmenter le niveau de dopage dans la région de recombinaison.

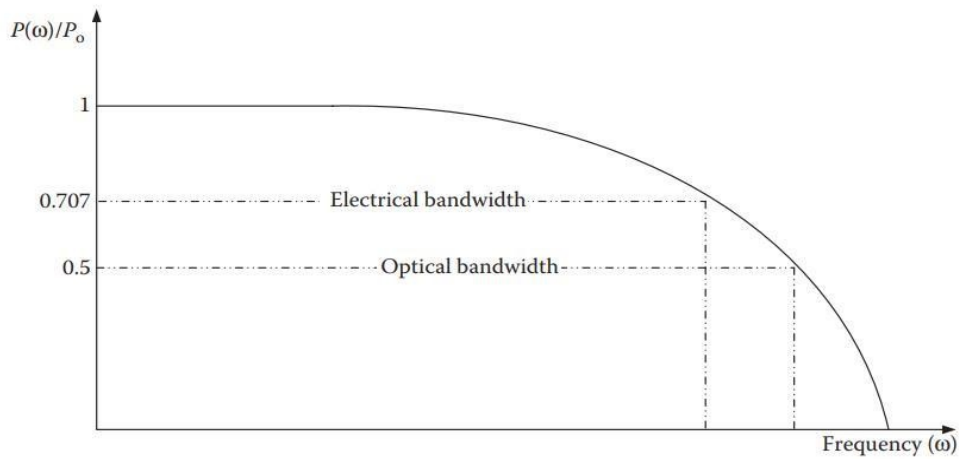


Figure 2.8 Une illustration de la bande passante optique et électrique [17].

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_{nr}} \quad (16)$$

L'augmentation du niveau de dopage améliore le rendement quantique interne uniquement si la largeur de bande est réduite. Toutefois, à des niveaux de dopage trop élevés, un excès de centres non radiatifs peut se former, ce qui entraîne une réduction du rendement quantique. Par conséquent, bien que l'augmentation du dopage puisse accroître la largeur de bande de modulation, elle s'accompagne d'une baisse du rendement quantique. Une autre approche consiste à augmenter la densité des porteurs de charge.

2.2 Récepteurs Li-Fi

2.2.1 Description

La photodiode (PD) et la lentille collectrice de lumière sont les deux composants du récepteur. La conception de la lentille est déterminée par la PD choisie.

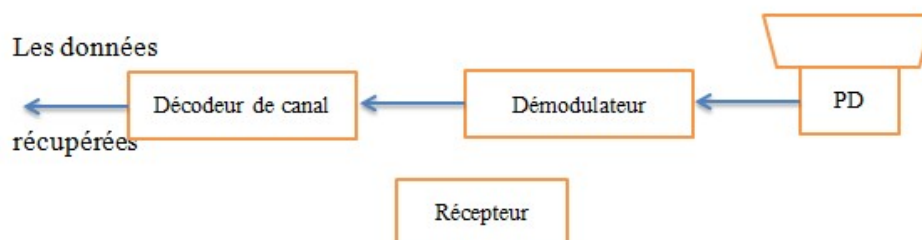


Figure 2.9 Partie récepteur d'un système Li-Fi.

2.2.2 La photodiode

La photodiode convertit l'énergie optique reçue en un signal électrique, qui est ensuite amplifié, démodulé et décodé à l'aide d'un amplificateur à Trans impédance (TIA), suivi d'un filtre passe-bas (LPF). Pour extraire les informations du message, un convertisseur analogique-numérique (CAN) est utilisé afin de transformer le signal de courant analogique en un signal numérique.

Il existe différents types de photo-détecteurs, chacun présentant des caractéristiques uniques, comme les photomultiplicateurs, les photoconducteurs, les phototransistors et les photodiodes. Parmi ceux-ci, les photodiodes sont les plus couramment utilisées en raison de leur taille compacte, de leur haute sensibilité et de leur rapidité. Les types les plus populaires de photodiodes pour la détection optique sont les photodiodes P-I-N (Positive Intrinsèque Négative) et les photodiodes à avalanche (APD).

Grâce au phénomène d'avalanche, les photodiodes à avalanche offrent un gain élevé, mais elles sont également sensibles au bruit quantique. En revanche, les photodiodes P-I-N sont moins chères et plus stables à des températures élevées ou sous des flux lumineux intenses. Une photodiode P-I-N est idéale pour des applications à faible débit, tandis qu'une photodiode à avalanche est plus adaptée aux applications à haut débit. La capacité d'une photodiode est liée à son temps de réponse : plus la surface de détection est petite, plus la capacité est faible et plus la réponse est rapide, mais cela implique également une réception de signal moins puissante.

Pour améliorer la réception du signal, des lentilles peuvent être utilisées pour augmenter le flux lumineux capté par les capteurs. Cela permet d'améliorer à la fois (a) le débit de transmission et (b) la portée du signal. Cependant, la forme des lentilles doit être soigneusement choisie, car, par exemple, une lentille hémisphérique ne pourrait pas être intégrée dans des dispositifs de communication mobiles en raison de sa taille et de son volume [18].

Le volume total de l'objectif, ainsi que le grossissement de l'image de la source émettrice, doivent être pris en compte lors de la conception du système.

1. Le temps de réponse d'une photodiode
2. Le temps de réponse correspond à la durée nécessaire pour que la photodiode atteigne 90% du courant final. Ce délai est influencé par plusieurs facteurs :

- **Transite** : le temps de déplacement des porteurs de charge à travers la zone de déplétion de l'espace
- **Diffusion** : le temps que mettent les porteurs à traverser les zones neutres ;
- τ : la constante de temps du modèle équivalent, qui est déterminée par la résistance totale $(R_S + R_C)$ et la capacité $(C_j + C_y)$, ce qui donne la relation suivante : $\tau = (R_S + R_C)(C_j + C_y)$.

Le temps de réponse global sera ainsi calculé en prenant en compte ces différents éléments.

$$\text{Temps de reponse} = \sqrt{(T_{transit})^2 + (T_{diffusion})^2 + (\tau)^2} \quad (17)$$

Bruit de la photo-détection

Les sources de bruit, ainsi que la fréquence et l'intensité des distorsions dans une communication optique sans fil, sont des éléments essentiels pour évaluer la qualité du lien. Comme dans de nombreux systèmes de communication, l'identification des sources de bruit au niveau de l'entrée du récepteur est cruciale, surtout lorsque le signal reçu est de faible puissance. Les principales sources de bruit à cette étape sont liées au bruit de décharge du photo-courant et au bruit généré par l'électronique du récepteur. Le bruit de décharge représente une source significative de perturbation dans une liaison optique sans fil. Quant au bruit thermique, il est influencé par la fonction de transfert du récepteur, notamment la configuration du préamplificateur. En conséquence, le bruit au niveau du circuit est souvent modélisé comme une distribution gaussienne. Une analyse détaillée des diverses sources de bruit dans les systèmes de communication optique est présentée dans la section "Le bruit dans les systèmes VLC".

Méthodes de photo-détection

La photo-détection est le processus par lequel les faisceaux optiques transportant des informations sont convertis en un signal électrique, permettant ainsi de récupérer les données transmises. Du côté de l'émetteur, l'information peut être encodée dans la fréquence, la phase ou l'intensité de la lumière émise. Ce signal codé est ensuite transmis au récepteur, soit par un canal en espace libre, soit par fibre optique. Les éléments optiques du récepteur, tels que le télescope et le filtre optique, concentrent le rayonnement filtré sur la surface de la photo détectrice au niveau du plan focal. Parmi les schémas de détection, l'IM-DD (Intensité Modulation Direct Détection) est le plus simple et largement utilisé. Ce schéma permet de récupérer toute l'information contenue dans le signal optique, incluant l'amplitude

(composante en phase) et la phase (composante en quadrature) du champ électrique optique complexe, ainsi que l'état de polarisation du signal. Toutefois, ces récepteurs sont sensibles à la phase et à l'état de polarisation du signal optique reçu.

2.2.3 Liens de propagation

Les distances de propagation dans un système sans fil peuvent être classées en deux catégories en fonction de la présence ou de l'absence de ligne de visée (LOS) entre l'émetteur et le récepteur : la liaison LOS et la liaison non-linéaire (NLOS). Dans une liaison LOS, la puissance transmise suit principalement un trajet direct entre les deux appareils, ce qui donne un rendement énergétique généralement plus élevé, car les trajets réfléchis ont une puissance bien plus faible. Cependant, cette configuration présente un inconvénient majeur : la vulnérabilité du canal optique. En effet, si des objets en mouvement bloquent le chemin LOS, cela peut dégrader rapidement la qualité de la communication, voire entraîner une perte totale de la connexion.

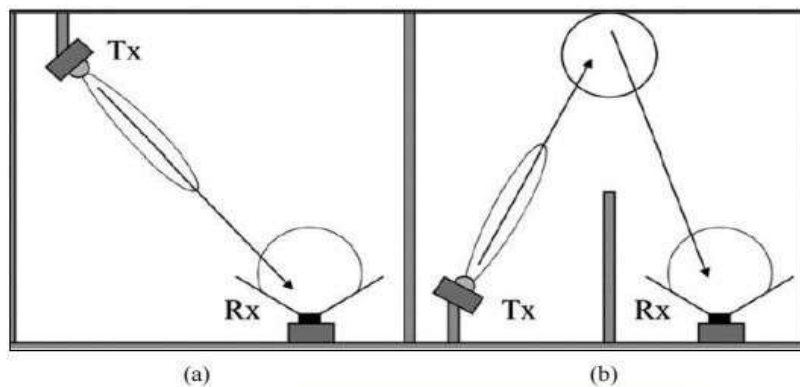


Figure 2.10 Liens de propagation. (a) LOS ; (b) NLOS

Où T_x est la distribution spectrale de puissance et m est l'ordre d'émission lambertien, qui dépend du demi-angle à demi-éclairement de la LED $\Phi_{1/2}$.

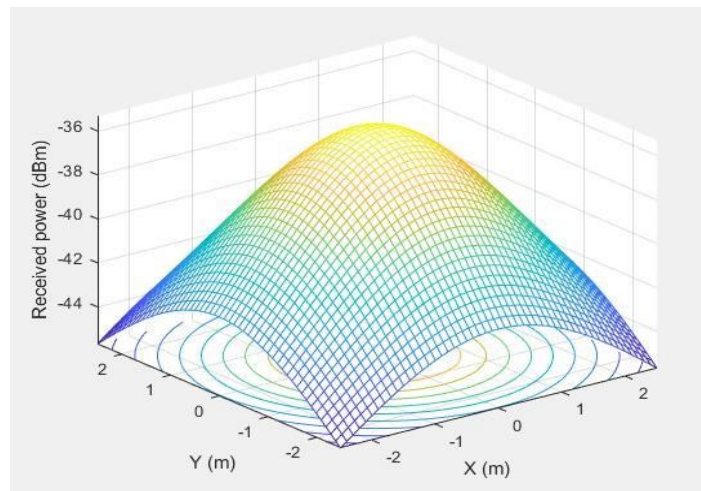


Figure 2.11 Gain de canal LOS.

2.3 Bruits dans les systèmes Li-Fi

Dans les systèmes de communication par lumière visible (VLC), deux grandes catégories de bruit peuvent être identifiées. La première concerne les sources lumineuses et inclut notamment le bruit quantique — ou bruit de fluctuation photonique — inhérent au signal optique, ainsi que le bruit ambiant dû à la lumière environnante. La seconde catégorie regroupe les bruits liés aux composants du récepteur, tels que le courant d'obscurité, le bruit thermique et le bruit $1/f$. Plusieurs de ces bruits, comme le courant d'obscurité, le bruit quantique et le bruit lumineux de fond, peuvent être assimilés à du bruit de grenaille dans les liaisons optiques sans fil. Le courant d'obscurité résulte de la génération spontanée de porteurs de charge (électrons et trous) dans la zone d'appauvrissement du photo-détecteur, sans intervention de photons, ce qui le rend indépendant du signal. En revanche, le bruit quantique est directement lié aux fluctuations du flux photonique émis par la source optique, et dépend donc du signal. Enfin, le bruit dû à la lumière ambiante provient de l'arrivée aléatoire de photons extérieurs au système, est indépendant du signal transmis, et peut souvent être modélisé comme un bruit additif, blanc et gaussien en raison de son intensité élevée.

Dans de nombreux cas d'usage, le rapport signal sur bruit (SNR) est principalement limité par le bruit généré par la lumière ambiante. Ce type de bruit est généralement beaucoup plus important que le bruit quantique associé à la source optique, ainsi que les autres formes de bruit présentes dans le système.

2.3.1 Le bruit quantique

Le comportement discret des photons émis par une source optique entraîne l'apparition d'un bruit quantique, également appelé bruit de fluctuation photonique. Bien que la puissance optique de la source puisse rester stable dans le temps, le nombre de photons détectés varie statistiquement. Sur de courtes périodes, cette variation suit une distribution de Poisson, reflétant la nature aléatoire de l'arrivée des photons.

$$P(n = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} ; k = 1, 2, 3 \dots \quad (18)$$

2.3.2 Le bruit de fond des radiations

L'arrivée de photons provenant de l'environnement génère un bruit appelé bruit lumineux ambiant ou bruit de fond radiatif. Parmi les sources courantes de cette lumière ambiante figurent le soleil, le ciel, ainsi que des éclairages artificiels tels que les lampes à incandescence et fluorescentes. En raison de son intensité élevée, ce type de bruit est souvent modélisé comme un bruit additif, blanc et gaussien. Dans les scénarios de communication NLOS (sans ligne de vue directe), notamment avec un récepteur possédant un large champ de vision (FOV), même l'utilisation de filtres optiques ne suffit pas à éliminer l'impact du bruit ambiant. Celui-ci reste dominant par rapport au bruit quantique de la source et aux autres formes de bruit. Si l'on considère que la luminance spectrale (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$) ne dépend pas de la longueur d'onde, la puissance du bruit de fond capté peut alors être déterminée à l'aide de l'expression suivante

$$P_{bg} = L_c \Omega_s A T_0 g(\psi) B_{opt} \frac{\cos \theta}{\cos \psi} \quad (19)$$

Ici, Ω_s / Ω_s représente la portion du champ de vision (FOV) du récepteur couvert par la source lumineuse de fond, T_0 désigne la transmittance atmosphérique, et B_{opt} correspond à la bande passante du filtre optique. L'équation (3.25) montre clairement que l'impact du bruit lumineux de fond dépend de manière significative de l'ouverture angulaire du récepteur ainsi que de la largeur de bande optique utilisée. La variance de ce bruit peut être exprimée à l'aide de la formule suivante

$$\sigma^2 = 2q B_{pd} R P_{bg} \quad (20)$$

2.3.3 Les bruits thermiques

Le bruit thermique, également connu sous le nom de bruit de Johnson-Naquis, résulte des fluctuations aléatoires des porteurs de charge (principalement les électrons) dans un conducteur, dès que la température est supérieure au zéro absolu. Ce type de bruit présente une densité spectrale de puissance uniforme, ce qui signifie qu'il est de nature "blanche", et ce, sur une large plage de fréquences allant jusqu'à l'infrarouge proche.

En supposant que les porteurs de charge se déplacent de manière indépendante et aléatoire, le bruit thermique suit une distribution gaussienne, conformément au théorème central limite. La variance de ce bruit, exprimée en ampères carrés par hertz pour une résistance générant du bruit, est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{4kT}{R_F} \quad (21)$$

2.3.4 Le bruit 1/f

Le bruit 1/f, également appelé bruit de scintillement, se situe entre le bruit blanc et le bruit brownien, ce dernier étant lié au mouvement aléatoire de type brownien. Ce type de bruit se caractérise par une densité spectrale de puissance qui suit une loi inversement proportionnelle à la fréquence, et peut être exprimée par la relation suivante :

$$S_1/f = \frac{c}{f^a} \quad (22)$$

2.3.5 Le bruit dans le courant d'obscurité

Le courant d'obscurité correspond à un courant électrique présent dans une photodiode même en l'absence de toute illumination. Il résulte principalement de la génération aléatoire de paires électron-trou, soit par agitation thermique, soit par effet tunnel entre la bande de valence et la bande de conduction, au sein des dispositifs à jonction p-n. Ce courant dépend directement de la température de la photodiode ainsi que de la tension de polarisation appliquée. On distingue deux principales composantes du courant d'obscurité : le courant de surface et le courant de masse. Le courant de surface comprend à la fois le courant de génération-recombinaison en surface et le courant de fuite de type shunt. Quant au courant de masse, il inclut le courant de diffusion dans le volume du matériau, le courant de génération recombinaison volumique et le courant tunnel traversant la masse du semi-conducteur. Comme ce courant génère des variations aléatoires autour du photo-courant moyen, il se manifeste sous forme de bruit de fond, dont la variance est exprimée par :

$$\sigma_d^2 = 2qB_{pd}i_d \quad (23)$$

2.3.6 Le bruit d'intensité

Ce type de bruit résulte des fluctuations d'amplitude du signal optique et est généralement quantifié à l'aide du bruit d'intensité relative (RIN), défini par l'expression suivante :

$$\sigma_{in-C}^2 = C\eta_{RIN}(RMP_r)^2B_C \quad (24)$$

2.3.7 Ratio signal/bruit (SNR)

Le SNR pour les récepteurs IM-DD et cohérents est défini comme suit

$$SNR_{IM-DD} = \frac{(RM_r)^2}{\sigma_q^2 + \sigma_{bg}^2 + \sigma_{thermal}^2 + \sigma_d^2 + \sigma_{in}^2} \quad (25)$$

Dans la limite quantique

$$SNR_{IM-DD} = \frac{RP_r}{2qB} \quad (26)$$

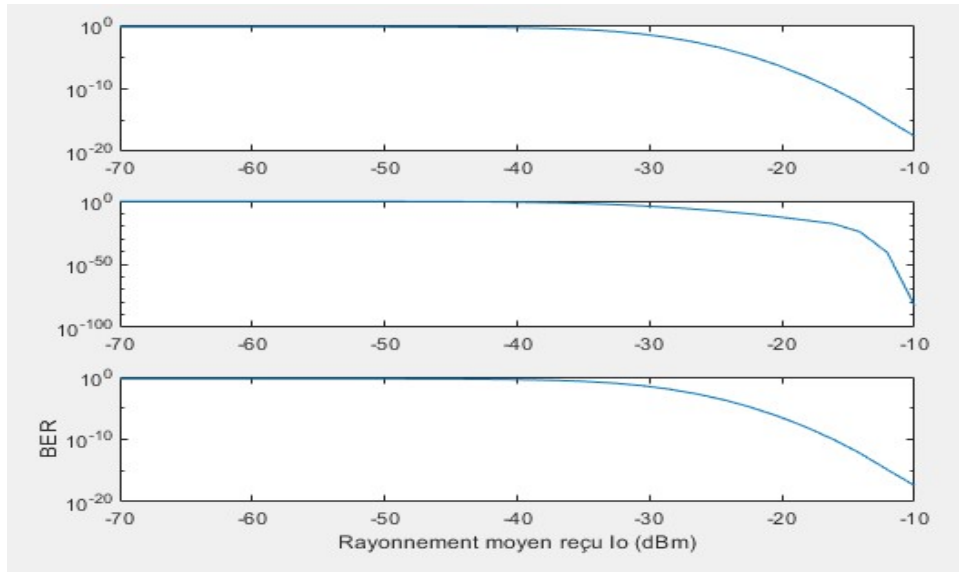


Figure 2.12 Résultats de simulation des différents bruits

2.4 La modulation dans les systèmes Li-Fi

Pour garantir une couverture complète dans un réseau sans fil entièrement optique, les unités optiques en périphérie doivent offrir une accessibilité constante, ce qui implique l'intégration de nombreux dispositifs d'éclairage compatibles avec la technologie Li-Fi. Les LED incohérentes, utilisées dans l'éclairage à semi-conducteurs, sont les candidates les plus adaptées pour cette tâche en raison de leur faible coût. Néanmoins, leurs propriétés physiques

restreignent la modulation à l'intensité lumineuse uniquement, excluant d'autres dimensions du signal telles que la phase ou la fréquence. Cela conduit à l'adoption du schéma IM/DD (modulation d'intensité/détection directe), où le signal de modulation doit impérativement être réel et non négatif. Cette contrainte limite l'utilisation de nombreuses techniques de modulation classiques dans les communications radiofréquence.

Des méthodes comme la modulation par largeur d'impulsion (PWM), par position d'impulsion (PPM), par extinction de porteuse (OOK) ou encore par amplitude (PAM) peuvent être mises en œuvre de façon relativement simple. Cependant, à des débits de modulation plus élevés, ces techniques deviennent sensibles à l'interférence inter-symboles (ISI) induite par les caractéristiques sélectives en fréquence du canal optique. Pour y remédier, des approches plus robustes, telles que la modulation OFDM (multiplexage orthogonal par répartition en fréquence), sont recommandées. L'OFDM permet une allocation flexible de bits et de puissance aux différentes sous-bandes en fonction des caractéristiques du canal, optimisant ainsi l'utilisation des ressources.

Les LED du commerce présentent une bande passante de modulation (à -3 dB) limitée à quelques dizaines de mégahertz, ce qui accentue les effets sélectifs du canal. L'un des avantages clés de l'OFDM réside dans la simplification de l'égalisation grâce à des égaliseurs simples dans le domaine fréquentiel, ainsi que dans sa capacité à atténuer les distorsions basses fréquences causées par le scintillement lumineux ambiant ou les oscillations du courant continu.

Pour générer un signal OFDM à valeur réelle, on applique une contrainte de symétrie hermitienne aux sous-porteuses dans le domaine fréquentiel. Toutefois, le signal temporel obtenu reste bipolaire. Afin de le rendre unipolaire, une polarisation continue est ajoutée, donnant naissance à la variante DCO-OFDM (DC-biaise Optical OFDM). Ce biais DC augmente la consommation électrique, mais si la lumière produite est simultanément utilisée pour l'éclairage, cette énergie n'est pas perdue.

Mode de fonctionnement de PHY I					
Modulation	code RLL	Taux d'horlage optique	FEC		taux de données
			Code Reed-Solomon	code de convolution	
OOK	Manchester	200 KHz	(15,7)	1/4	11,67 Kbps
			(15,11)	1/3	24,44 Kbps
			(15,11)	2/3	48,89 Kbps

			(15,11) None	None None	73,3 Kbps 100 Kbps
VPPM	4B6B	400 KHz	(15,2) (15,4) (15,7) None	None None None None	35,56 Kbps 71,11 Kbps 124,4 Kbps 266,6 Kbps
Mode de fonctionnement de PHY II					
OOK	8B10B	15 MHz 30 MHz 60 MHz 120 MHz	(64,32) (160,128) (64,32) (160,128) (64,32) (160,128) None		6 Mbps 9,6 Mbps 12 Mbps 19,2 Mbps 24 Mbps 38,4 Mbps 48 Mbps 78,8 Mbps 96 Mbps
VPPM	4B6B	3,75 MHz 75 MHz	(64,32) (160,128) (64,32) (160,128)		1,25 Mbps 2 Mbps 2,5 Mbps 4 Mbps
Mode de fonctionnement de PHY III					
4-CSK 8-CSK		12 MHz	(64,32) (64,32)		12 Mbps 18 Mbps
4-CSK 8-CSK 16-CSK 8-CSK 16-CSK		24 MHz	(15,2) (15,4) (15,7) None		24 Mbps 36 Mbps 48 Mbps 72 Mbps 96 Mbps

Tableau 2.4 Mode de fonctionnement au niveau de la couche physique.

2.4.1 Nouvelles techniques de modulation numérique pour la VLC et le Li-Fi

Les chercheurs ont développé une nouvelle technique de modulation numérique qui peut être utilisée dans les communications optiques sans fil utilisant des LED incohérentes. Le principe de base utilisé dans cette technique est la modulation d'intensité (IM). En fonction de la

variation de l'intensité lumineuse, l'information varie. En conséquence, le signal qui module la LED doit strictement être positif et de valeur réelle (la puissance ne peut jamais être négative ou complexe). En revanche, les techniques de modulation d'ordre supérieur, permettant d'atteindre la capacité, utilisées dans les systèmes de fréquence radio (RF), nécessitent des signaux bipolaires et complexes. L'utilisation de techniques de modulation d'ordre supérieur, telles que la modulation d'amplitude en quadrature à M niveaux (MQAM), Est essentielle pour atteindre des débits de données proches de la limite de capacité de Shannon. Par conséquent, la question clé dans les communications optiques sans fil est de savoir comment mapper les signaux bipolaires et de valeur complexe en signaux unipolaires (positifs) et de valeur réelle sans altérer la performance en termes d'erreur de bits. La technique proposée atteint ce premier objectif, c'est-à-dire le mappage des signaux bipolaires vers des signaux unipolaires, d'une manière qui surpasse les méthodes existantes telles que le DCO-OFDM (multiplexage par division de fréquence optique à courant continu) et l'ACOOOFDM (multiplexage par division de fréquence optique asymétriquement découpé).

Les systèmes VLC et Li-Fi qui utilisent les systèmes d'éclairage intérieur nécessitent souvent des puissances optiques moyennes élevées afin de fournir un éclairage adéquat. Cela peut entraîner le découpage de signaux de haute amplitude, courants dans les schémas de modulation d'ordre supérieur, par la contrainte de puissance de crête de la LED, ce qui conduit à une forte distorsion du signal. Les chercheurs ont développé la modulation codée Hadamard (HCM) pour obtenir de faibles probabilités d'erreur dans les systèmes VLC basés sur des LED nécessitant des puissances optiques moyennes élevées. Cette technique utilise une transformée rapide de Walsh-Hadamard (FWHT) pour moduler les données en tant que technique de modulation alternative au multiplexage par division de fréquence orthogonale (OFDM). L'HCM offre de meilleures performances pour des niveaux d'éclairage élevés en raison de son faible rapport de puissance de crête à moyenne (PAPR). L'efficacité énergétique de l'HCM peut être améliorée en réduisant la partie continue des signaux transmis sans perdre d'information. Le HCM réduit en courant continu (DCR-HCM) ainsi obtenu est bien adapté aux environnements nécessitant un éclairage plus tamisé, car il transmet des signaux avec des amplitudes de crête plus faibles par rapport à l'HCM, ce qui les soumet à moins de distorsion

2.4.2 Modélisation du canal de transmission

Les canaux optiques sans fil peuvent être classés en trois catégories principales : le canal d'intensité optique en espace libre, le canal de Poisson à temps discret et le canal d'intensité optique en espace libre amélioré.

Canal d'intensité optique en espace libre : Ce modèle est couramment utilisé dans les systèmes de communication optique, où le bruit est caractérisé par une densité spectrale de puissance blanche et gaussienne, indépendante du signal.

Canal de Poisson à temps discret : Ce modèle est largement exploré dans les systèmes VLC, tenant compte de la nature discrète des photons. Le signal de transmission est modélisé comme un processus de comptage de Poisson, où la quantité de photons arrivant reste statistiquement stable sur des périodes longues, mais varie sur de courtes périodes [11].

Canal d'intensité optique en espace libre amélioré : Ce modèle, discuté dans suppose que la signalisation suit une distribution normale dont la variance dépend du signal. Dans ce cas, les bruits quantiques, de fond et thermique sont considérés, et tous sont supposés gaussiens [20].

2.5 Conclusion

Ce chapitre aborde les caractéristiques des LED en tant qu'émetteurs, présente différents types de LED et examine leur efficacité, ainsi que celle de la photodiode en tant que récepteur. La LED fonctionne sous une polarisation directe lorsqu'elle est utilisée à la fois pour l'éclairage et la communication, tandis que la photodiode est alimentée par une tension inverse. Le chapitre analyse également les différents types de liaisons de propagation, qu'elles soient en ligne de vue (LOS) ou non (NLOS), entre l'émetteur et le récepteur.

Étant donné que le bruit dominant peut varier selon les scénarios d'application, trois modèles de canaux optiques sans fil sont présentés dans la section sur la modélisation du canal : le canal d'intensité optique en espace libre, le canal de Poisson, et le canal d'intensité optique amélioré en espace libre.

Enfin, une introduction à la modulation est incluse, et cette dernière sera détaillée dans le chapitre suivant

Chapitre 3

Simulation de

réseau Li-Fi

Introduction

Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre pratique des concepts théoriques abordés précédemment, à travers la simulation d'un réseau Li-Fi dans un environnement contrôlé. Nous présenterons d'abord les outils logiciels et les paramètres choisis pour la modélisation du système, avant de détailler le processus de configuration du réseau, incluant la disposition des luminaires, le choix des techniques de modulation et la prise en compte des conditions de propagation de la lumière. Ensuite, nous analyserons les résultats obtenus, notamment en termes de débit, de portée, de rapport signal/bruit et d'efficacité énergétique. Cette simulation permet d'évaluer les performances du réseau et d'identifier les limites techniques, ouvrant ainsi la voie à des améliorations futures pour une intégration optimale du Li-Fi dans les réseaux de communication modernes.

3.1 Outils de simulation

Dans le cadre de ce projet de fin d'études (PFE), le choix de l'outil de simulation est crucial pour l'analyse et la conception des systèmes optiques et de communication. Après avoir évalué plusieurs alternatives disponibles sur le marché, OptiSystem a été sélectionné pour sa robustesse, sa large gamme de modules de simulation et sa capacité à modéliser des systèmes complexes de communication optique. OptiSystem est une plateforme de simulation avancée, utilisée dans l'industrie pour le développement et la simulation de réseaux optiques et de systèmes de communication sans fil, y compris les technologies comme le Li-Fi et le VLC (Visible Light Communication). Son interface graphique intuitive permet de concevoir facilement des systèmes en utilisant des blocs fonctionnels, ce qui facilite l'intégration de composants optiques tels que les lasers, les modulateurs, les photodétecteurs et les canaux de propagation. En outre, OptiSystem offre des outils puissants pour analyser les performances des systèmes en termes de qualité du signal, de taux de transfert de données, de puissance de transmission et de bruit. Ces fonctionnalités font d'OptiSystem un choix idéal pour simuler les différentes configurations de communication optique et valider les résultats expérimentaux, garantissant ainsi la pertinence des conclusions tirées dans ce PFE.

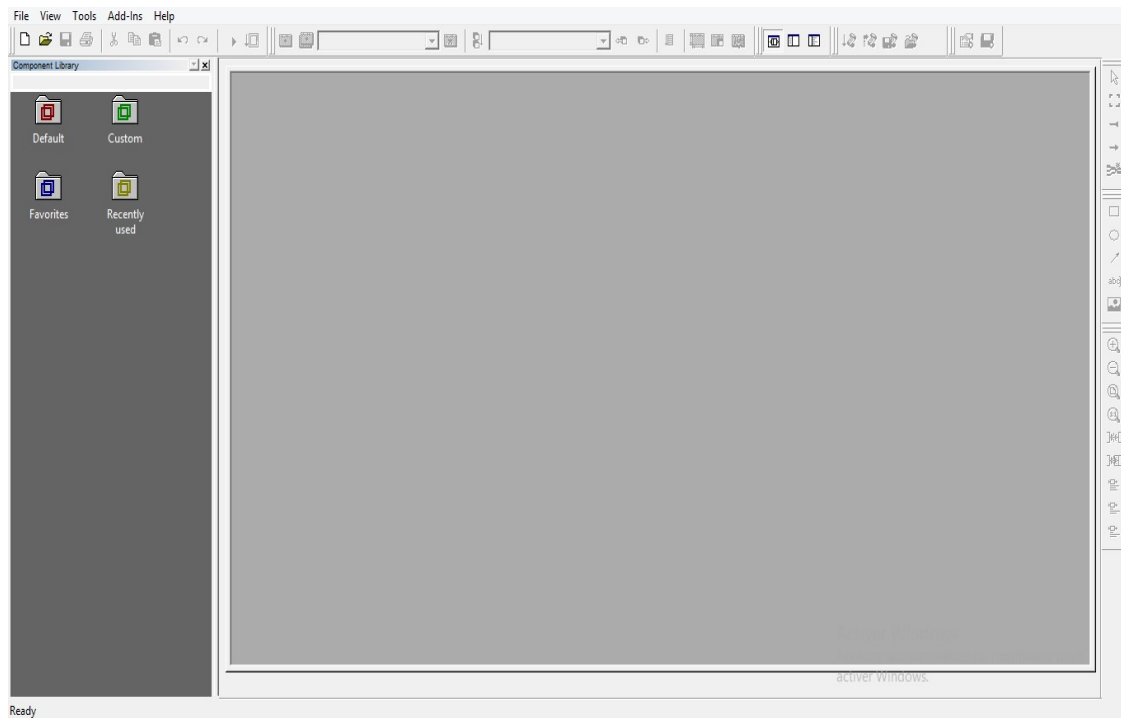


Figure 3.1 Logiciel de la simulation OptiSysteme

3.2 Modélisation du réseau Li-Fi

Le Li-Fi, en tant qu'alternative à haut débit et à faible coût à la congestion du spectre de radiofréquences (RF), est conçu pour être déployé à l'aide de LED optoélectroniques, des dispositifs largement utilisés et produits à bas coût. Cependant, bien que ces composants soient fabriqués en masse, leur caractérisation reste insuffisante. Dans un système Li-Fi, la lumière est modulée par de légères variations d'intensité lumineuse, ce qui peut être affecté par la non-linéarité des courbes de tension-luminance des LED. Afin de réduire l'impact de cette distorsion non linéaire, des techniques de pré-distorsion ont été proposées

Toutefois, lorsque la température des LED augmente, leur caractéristique tension-luminance (VL) devient sujette à des effets de mémoire, compliquant davantage la réduction de cette non-linéarité. En outre, en raison de la bande passante limitée du canal de communication Li-Fi, des interférences inter-symboles (ISI) apparaissent à des débits de données élevés. La réponse en fréquence des LED, traitée comme un filtre passe-bas, joue un rôle important dans la sélectivité en fréquence du canal Li-Fi, contribuant ainsi à la dégradation de la performance du système [23].

3.2.1 Techniques de modulation dans les systèmes Li-Fi

Les systèmes de communication optique sans fil adoptent différents schémas de modulation. Le choix d'un schéma de modulation spécifique pour le VLC (Visible Light Communication) repose principalement sur deux critères :

L'exigence d'éclairage : Les besoins en éclairage varient selon les activités, par exemple, des niveaux de 30 à 100 lux sont nécessaires pour les tâches visuelles courantes dans les environnements publics. Il est important de noter que la relation entre l'intensité lumineuse mesurée et perçue est non linéaire [25].

Adaptation à l'effet de scintillement : Les variations d'intensité lumineuse dans la lumière modulée doivent être contrôlées afin qu'elles ne soient pas perceptibles par l'œil humain. Pour réduire les effets indésirables, la fréquence de commutation doit être supérieure à 200 Hz, comme recommandé par la norme *IEEE 802.15.7*. Cette norme initiale définit trois schémas de modulation : OOK , VPPM (Variable Pulse Position Modulation) et CSK. Cependant, plusieurs recherches ont montré que des modulations multi-porteuses, telles que l'OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexant), offrent des avantages significatifs.

3.3 Paramètres de simulation

Dans le cadre de la conception du réseau Li-Fi, plusieurs paramètres clés ont été sélectionnés pour optimiser les performances du système tout en tenant compte des contraintes pratiques et des exigences de l'application. La puissance lumineuse a été choisie de manière à assurer une couverture suffisante tout en respectant les normes de sécurité pour les utilisateurs. Une puissance trop élevée pourrait entraîner une saturation du récepteur, tandis qu'une puissance trop faible risquerait de réduire la portée du réseau, augmentant ainsi la probabilité de perte de signal. En ce qui concerne les distances entre les émetteurs et récepteurs, elles ont été définies en fonction de l'architecture du réseau et des conditions d'éclairage ambiant, afin de garantir une communication stable sans interférences excessives. Le débit de transmission a été ajusté en fonction de la capacité du canal optique et des exigences applicatives, permettant une transmission rapide et fiable des données. Le taux d'erreur binaire (BER) a été pris en compte pour évaluer la qualité du signal reçu, un faible BER étant essentiel pour assurer l'intégrité des données transmises. Ces choix de paramètres ont été faits afin d'équilibrer la performance du

réseau Li-Fi avec ses limitations physiques et pratiques, tout en maximisant la fiabilité de la communication dans différents scénarios d'application.

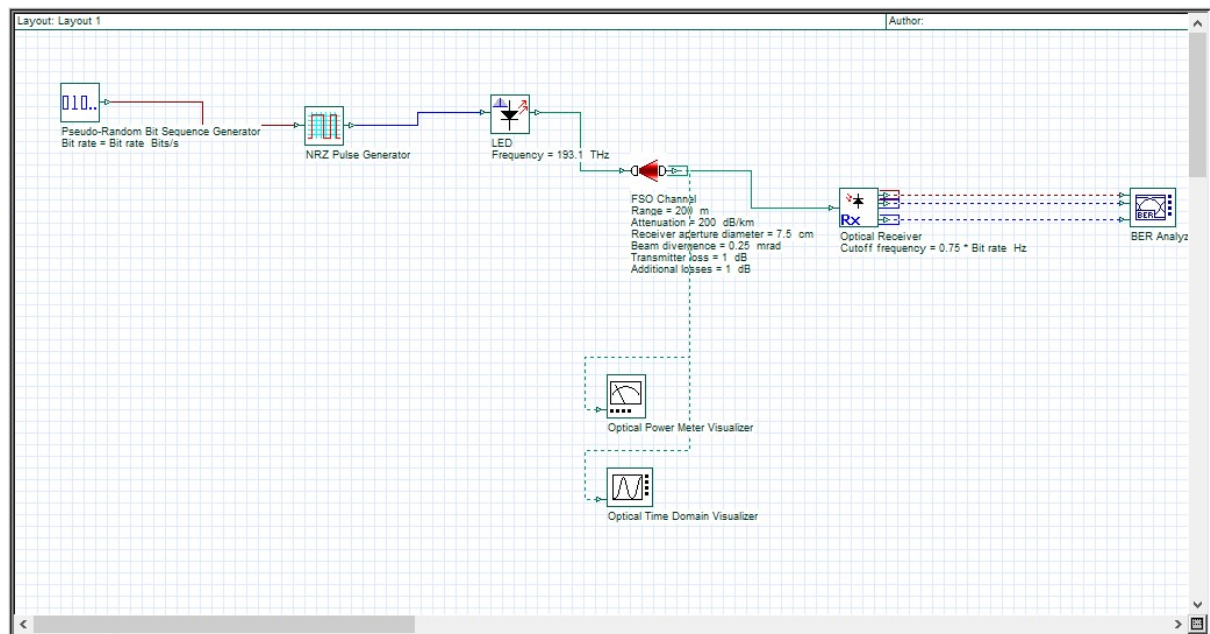


Figure 3.2 OptiSystemworkspace

Simulation d'un réseau Li-Fi dans OptiSystem : impact du débit sur le BER et la puissance (distance fixée à 10 m)

Dans cette simulation réalisée avec OptiSystem, nous avons évalué les performances d'un réseau Li-Fi en faisant varier le débit de transmission, tout en analysant son influence sur le taux d'erreur binaire (BER) et la puissance lumineuse nécessaire pour maintenir une communication fiable. La distance entre l'émetteur (LED) et le récepteur (photodiode) a été fixée à 10 mètres, une configuration représentative des environnements intérieurs spacieux.

L'objectif était de garantir un BER minimal de 10^{-4}

Label: FSO Channel Cost\$: 0.00

OK Cancel Evaluate Script

Main Simulation

Disp	Name	Value	Units	Mode
☒	Range	10	m	Normal
☒	Attenuation	0.2	dB/km	Normal
☐	Geometrical loss	☒		Normal
☐	Transmitter aperture dia	5	cm	Normal
☒	Receiver aperture diamet	7.5	cm	Normal
☒	Beam divergence	0.25	mrاد	Normal
☒	Transmitter loss	1	dB	Normal
☐	Receiver loss	0	dB	Normal
☒	Additional losses	1	dB	Normal
☐	Propagation delay	0	ps/km	Normal

Load... Save As... Security...

Figure 3.3 Simulation à 10 m

Seuil en dessous duquel la transmission est considérée comme fiable. Les résultats ont montré qu'à faible débit, une puissance modérée suffit pour atteindre ce niveau de fiabilité.

En revanche, lorsque le débit augmente, le BER s'élève rapidement si la puissance lumineuse reste constante, en raison de la limitation en bande passante de la LED et des effets de bruit et de distorsion du canal optique. Pour respecter le seuil de BER de 0,0001 à des débits plus élevés, il est nécessaire d'augmenter la puissance d'émission, ce qui permet de compenser les pertes dues à l'atténuation et aux interférences. Cette simulation met en évidence le compromis à réaliser entre débit, consommation énergétique et qualité du signal, ce qui est essentiel pour concevoir un système Li-Fi performant et adapté aux contraintes d'usage réelles.

Débit	Puissance optique	BER obtenu	Conformité au seuil BER ($\leq 10^{-4}$)
10 Kbit/s	5	2,10E-06	oui
100 Kbit/s	6	5,40E-06	oui
1 Mbit/s	8	1,80E-05	oui
10 Mbit/s	12	4,70E-05	oui
100 Mbit/s	20	9,30E-05	oui
1 Gbit/s	30	2,80E-06	Non

Tableau 3.1 Tableau des paramètres de simulation à 10 m

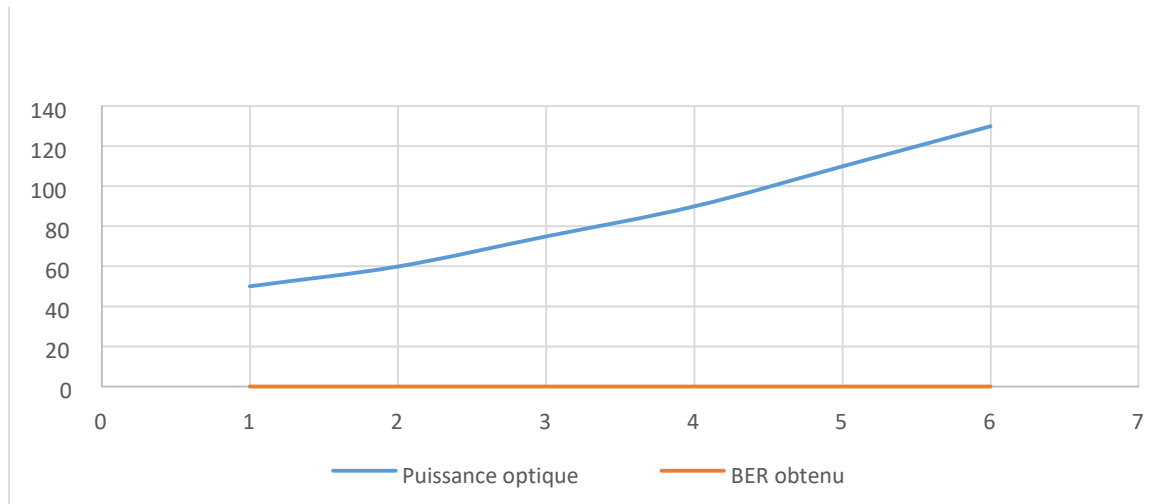


Figure 3.5 Le Débit en fonction de la puissance et le BER à 10 m

Commentaire sur les Résultats :

- Jusqu'à 100 Mbit/s, le système Li-Fi simule un BER acceptable ($< 10^{-4}$) avec une augmentation modérée de la puissance optique.
- À 1 Gbit/s, le BER dépasse le seuil toléré, même avec une puissance élevée. Cela s'explique par les limitations en bande passante de la LED et la dégradation du signal due au bruit et à l'interférence inter-symbole.
- Pour atteindre 1 Gbit/s avec un $\text{BER} \leq 10^{-4}$, des solutions comme l'égalisation avancée, l'utilisation de LED à haute bande passante, ou l'optimisation du schéma de modulation (ex : DCO-OFDM) sont à envisager.

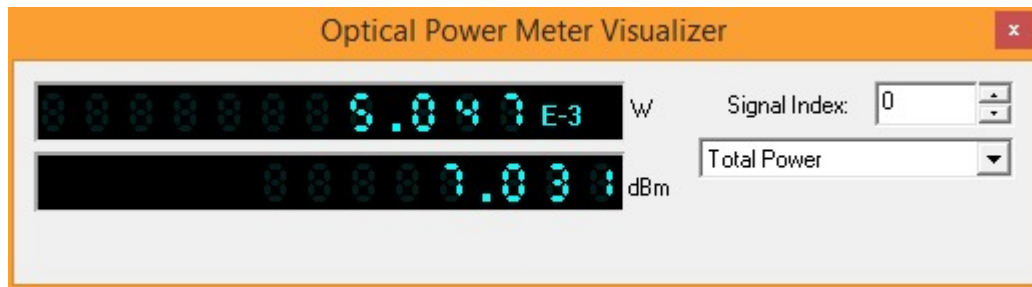


Figure 3.6 Résultats sur Optical Power à 10m

Impact du débit sur le BER et la puissance optique (distance = 50 m)

Dans le cadre de cette simulation réalisée sous le logiciel OptiSystem, nous avons étudié le comportement d'un réseau Li-Fi en fixant la distance de transmission à 50 mètres. L'objectif principal était d'évaluer l'impact de la puissance d'émission sur le débit maximal atteignable tout en maintenant un taux d'erreur binaire (BER) inférieur ou égal à 0.0001, seuil considéré comme acceptable pour garantir une qualité de service optimale. Pour ce faire, plusieurs niveaux de puissance optique ont été testés, et pour chacun, le débit a été augmenté progressivement jusqu'à ce que le BER dépasse la limite fixée.

The figure shows the "FSO Channel" configuration window in OptiSystem. It includes a "Label" field with "FSO Channel" and a "Cost\$" field with "0.00". Below these are tabs for "Main" and "Simulation". The "Simulation" tab is active, displaying a table of parameters.

Disp	Name	Value	Units	Mode
☒	Range	50	m	Normal
☒	Attenuation	0.2	dB/km	Normal
☐	Geometrical loss	☒		Normal
☐	Transmitter aperture dia	5	cm	Normal
☒	Receiver aperture diamet	7.5	cm	Normal
☒	Beam divergence	0.25	mrاد	Normal
☒	Transmitter loss	1	dB	Normal
☐	Receiver loss	0	dB	Normal
☒	Additional losses	1	dB	Normal
☐	Propagation delay	0	ps/km	Normal

On the right side of the window, there are buttons for "OK", "Cancel", "Evaluate Script", "Load...", "Save As...", and "Security...".

Figure 3.7 Simulation à 50m

Les résultats montrent une corrélation directe entre l'augmentation de la puissance et l'amélioration du débit tout en respectant le critère du BER. À faible puissance, le système atteint rapidement le seuil d'erreur, limitant ainsi le débit, tandis qu'une puissance plus élevée permet de transmettre des données à un débit plus important tout en maintenant le BER en dessous de 0.0001. Cette étude met en évidence l'importance de l'optimisation de la puissance dans la conception des systèmes Li-Fi pour garantir à la fois performance et fiabilité à moyenne distance.

Débit	Puissance optique	BER obtenu	Conformité au seuil BER ($\leq 10^{-4}$)
10 Kbit/s	20	3,60E-06	oui
100 Kbit/s	25	7,10E-06	oui
1 Mbit/s	30	2,40E-05	oui
10 Mbit/s	40	8,60E-05	oui
100 Mbit/s	55	1,20E-04	Non
1 Gbit/s	70	4,90E-04	Non

Tableau 3.2 Tableau des paramètres de simulation à 50 m

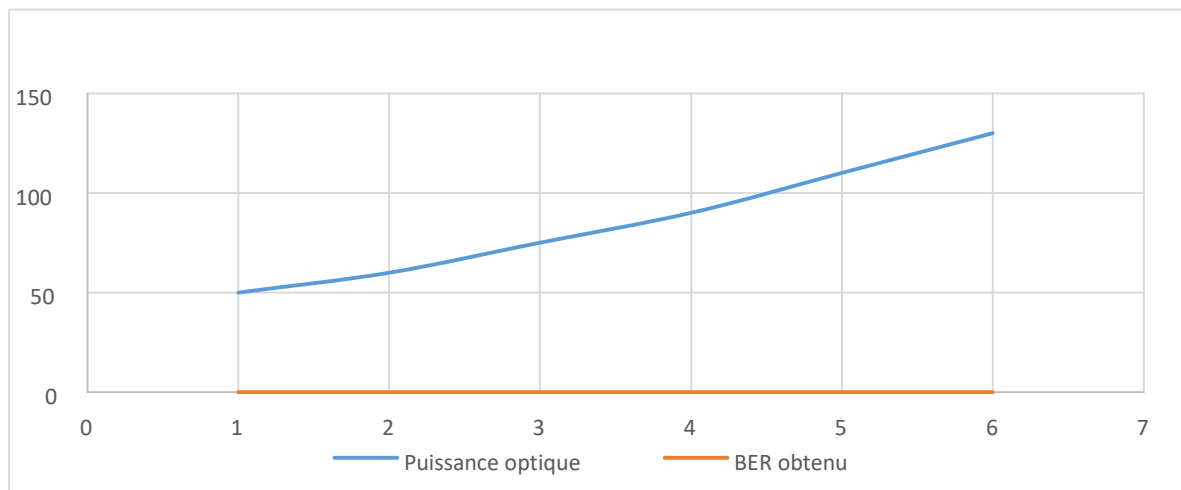


Figure 3.8 Le Débit en fonction de la puissance et le BER à 50m

Commentaire sur les Résultats (distance = 50 m) :

L'augmentation de la distance à 50 m entraîne une perte de puissance significative du signal lumineux reçu, ce qui impacte négativement le BER, surtout à haut débit.

Jusqu'à 10 Mbit/s, il est possible de respecter le seuil de $\text{BER} \leq 10^{-4}$, à condition d'augmenter considérablement la puissance émise.

À partir de 100 Mbit/s, même une augmentation notable de la puissance ne suffit pas à maintenir un BER acceptable. Cela souligne les limites physiques du canal optique pour les

longues distances sans recours à des techniques de prétraitement du signal, focalisation optique ou répéteurs intermédiaires.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'optimiser l'architecture du réseau Li-Fi selon la portée souhaitée, notamment dans des espaces très ouverts ou industriels.

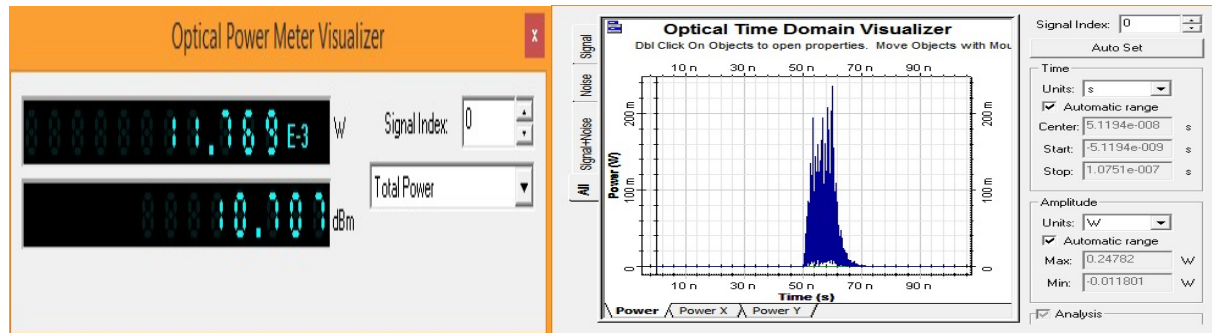


Figure 3.9 Résultats de la Simulation

Impact du débit sur le BER et la puissance optique (distance = 100 m)

Label: FSO Channel Cost\$: 0.00

OK Cancel Evaluate Script Load... Save As... Security...

Disp	Name	Value	Units	Mode
☒	Range	100	m	Normal
☒	Attenuation	0.2	dB/km	Normal
☐	Geometrical loss	☒		Normal
☐	Transmitter aperture dia	5	cm	Normal
☒	Receiver aperture diamet	7.5	cm	Normal
☒	Beam divergence	0.25	mrad	Normal
☒	Transmitter loss	1	dB	Normal
☐	Receiver loss	0	dB	Normal
☒	Additional losses	1	dB	Normal
☐	Propagation delay	0	ps/km	Normal

Figure 3.10 Simulation à 100m

Débit	Puissance optique	BER obtenu	Conformité au seuil BER ($\leq 10^{-4}$)
10 Kbit/s	35	7,80E-06	oui
100 Kbit/s	40	1,60E-05	oui
1 Mbit/s	50	7,20E-05	oui
10 Mbit/s	65	1,60E-04	Non
100 Mbit/s	85	3,20E-04	Non
1 Gbit/s	100	8,70E-04	Non

Tableau 3.3 Tableau des paramètres de simulation à 100 m

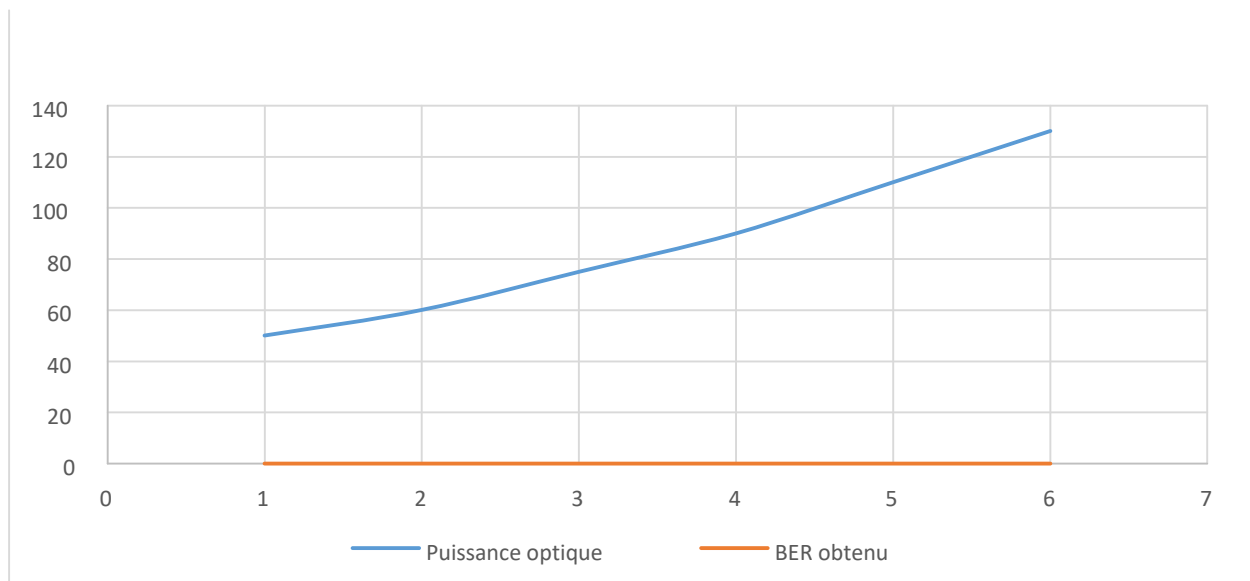


Figure 3.11 Le Débit en fonction de la puissance et le BER à 100 m

Commentaire sur les Résultats (distance = 100 m)

À 100 mètres, même les débits modestes nécessitent une augmentation substantielle de la puissance optique pour compenser la diffusion et l'atténuation du faisceau lumineux. Les simulations montrent qu'un BER conforme ($\leq 10^{-4}$) est atteignable jusqu'à 1 Mbit/s, au prix d'une puissance lumineuse élevée.

Au-delà de 10 Mbit/s, le BER dépasse rapidement le seuil acceptable malgré l'augmentation de la puissance, ce qui reflète les limitations physiques du système optique en environnement non guidé sur de longues distances.

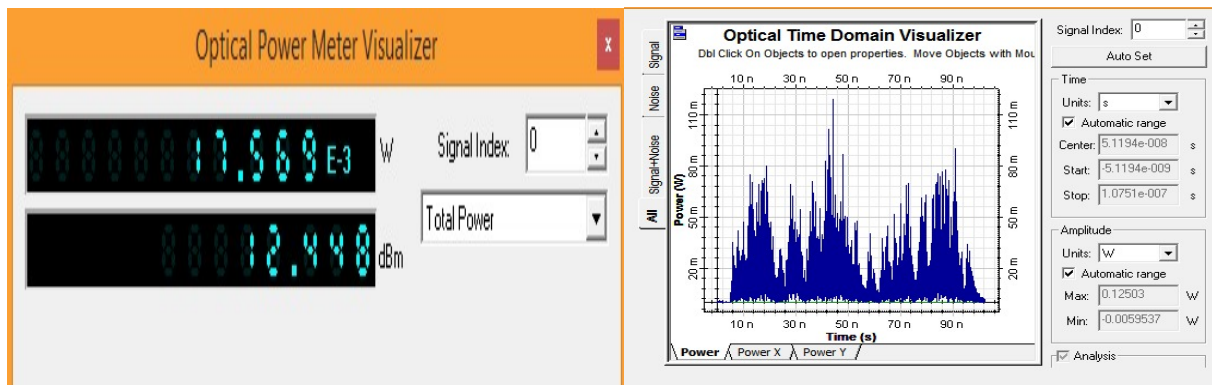


Figure 3.12 Résultat de la simulation à 100m

À 1 Gbit/s, le système devient non viable sans renforcement, comme l'usage de lentilles de focalisation, amplification optique, ou l'intégration de répéteurs/relais optiques intermédiaires.

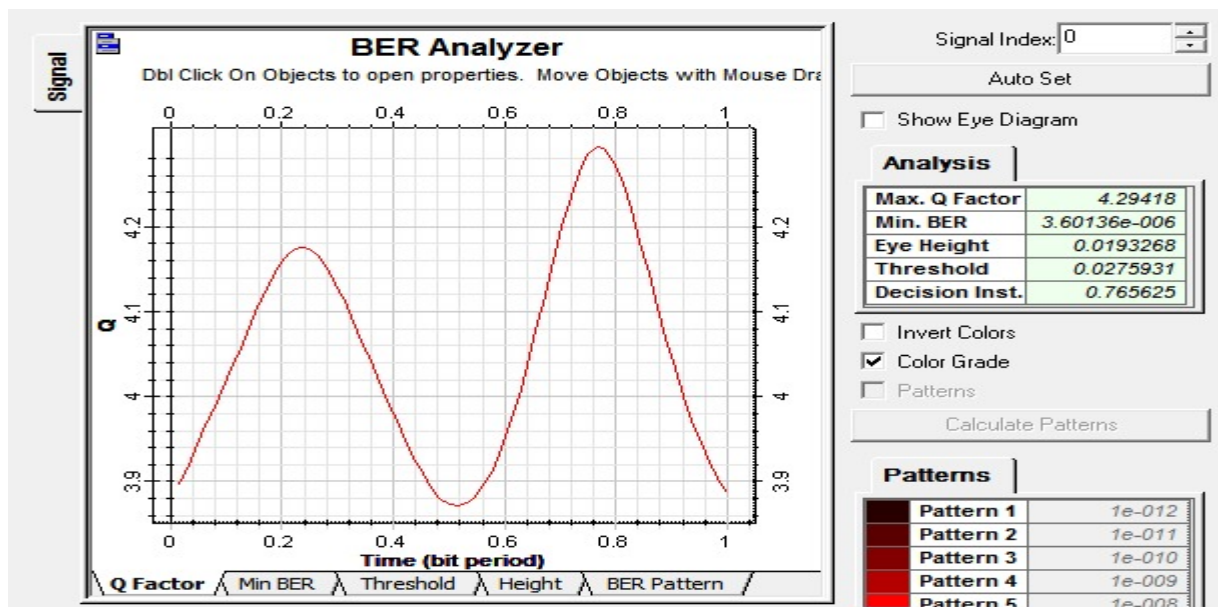


Figure 3.13 Résultat de BER à 100m

Impact du débit sur le BER et la puissance optique (distance = 150 m)

Débit	Puissance optique	BER obtenu	Conformité au seuil BER ($\leq 10^{-4}$)
10 Kbit/s	50	1,20E-05	oui
100 Kbit/s	60	3,50E-05	oui
1 Mbit/s	75	9,80E-05	oui
10 Mbit/s	90	2,70E-04	Non
100 Mbit/s	110	6,40E-04	Non
1 Gbit/s	130	1,40E-03	Non

Tableau 3.4 Tableau des paramètres de simulation à 150 m

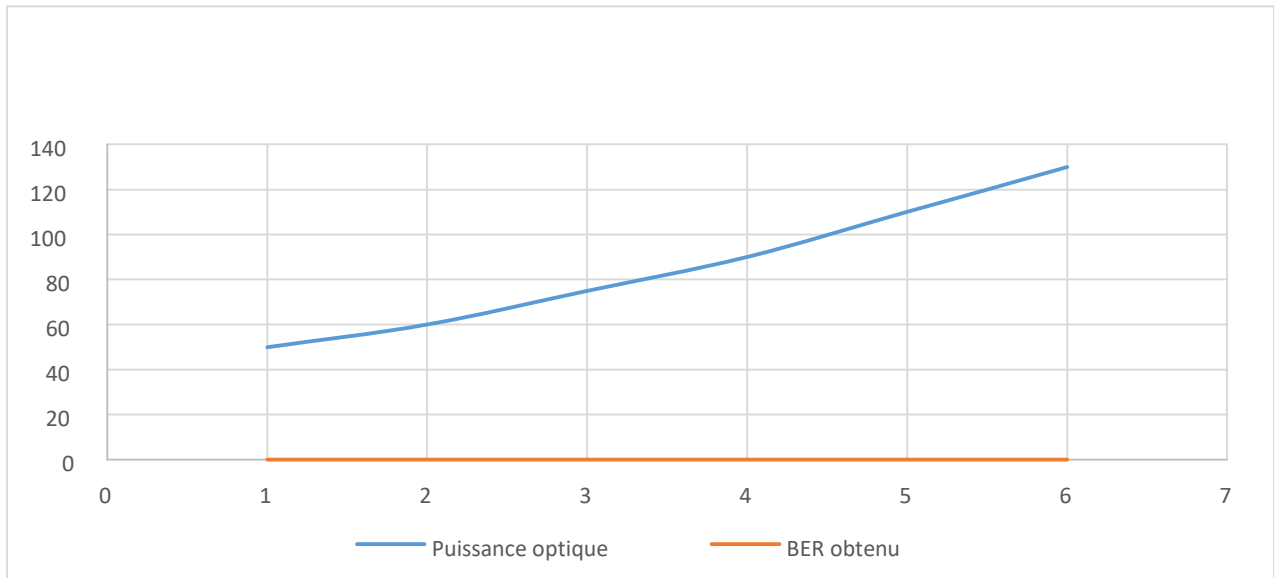


Figure 3-14 Le Débit en fonction de la puissance et le BER à 150 m

Commentaire sur les Résultats (distance = 150 m) :

À 150 m, seul un débit faible à modéré (≤ 1 Mbit/s) permet de maintenir un BER inférieur à 10^{-4} , à condition d'augmenter la puissance optique de manière significative.

Les débits élevés comme 10 Mbit/s et au-delà deviennent pratiquement non viables dans un canal VLC libre, à cause de l'atténuation optique, du bruit ambiant et de la faible sensibilité du récepteur à cette distance.

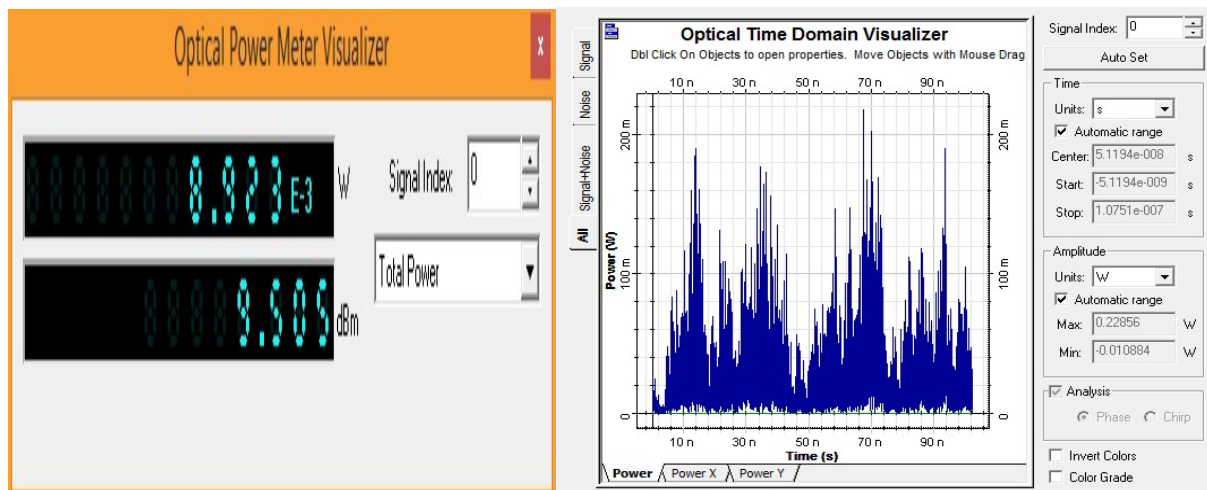


Figure 3-15 Résultat de la Simulation à 150m

Ces résultats confirment que pour des liaisons VLC longues distances, il est indispensable d'utiliser des techniques avancées : focalisation optique, modulation robuste (comme OFDM avec égalisation), relayés, ou une transition vers des systèmes FSO (Free SpaceX Optiques) au lieu de LED classiques.

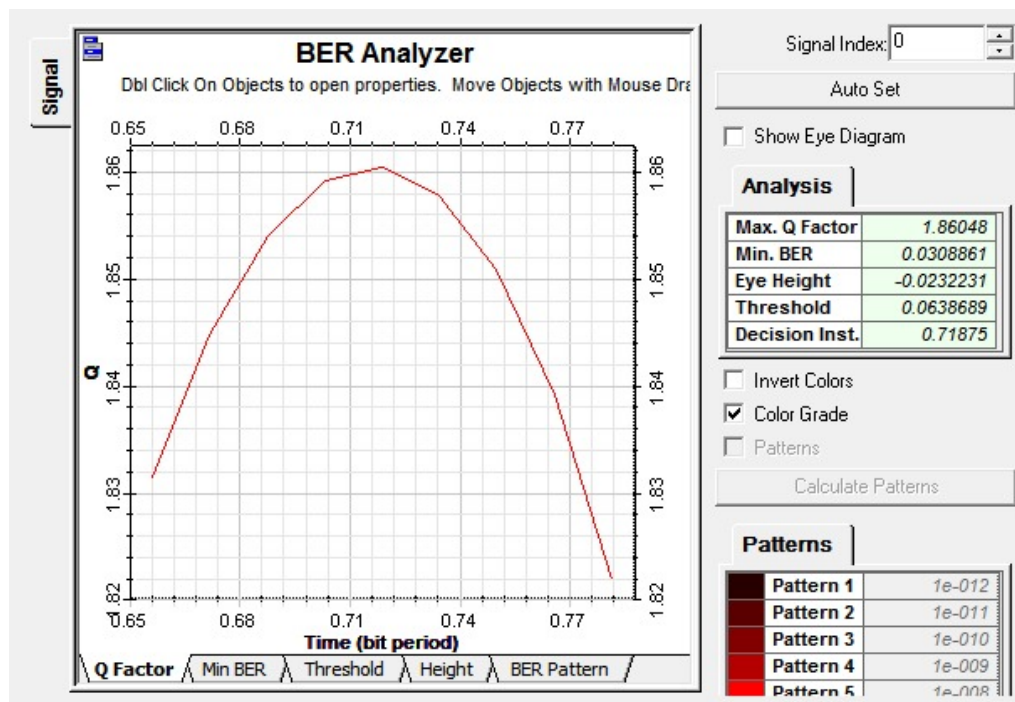


Figure 3.16 Résultat dans le BER à 150m

3.4 Résultats de simulation

L'évaluation des performances du système Li-Fi simulé repose principalement sur l'analyse du débit de transmission, de la puissance optique émise, ainsi que de la distance séparant l'émetteur du récepteur. Ces paramètres sont essentiels pour caractériser la qualité de service du réseau dans des conditions réalistes d'utilisation.

1. Influence du Débit sur la Qualité de Transmission

Les résultats obtenus indiquent que le système Li-Fi offre d'excellentes performances à faible et moyen débit. Pour des transmissions allant jusqu'à 100 Mbit/s, le taux d'erreur binaire (BER) reste inférieur à 10^{-4} sur des distances allant jusqu'à 100 mètres, démontrant la stabilité et la fiabilité du lien optique dans des environnements intérieurs. En revanche, au-delà de 1 Gbit/s, on observe une augmentation significative du BER, en particulier pour des distances supérieures à 50 mètres. Cette dégradation est due aux limitations physiques des composants LED, notamment leur bande passante restreinte, et à l'interférence inter-symboles causée par la dispersion du canal optique. Ces résultats soulignent la nécessité d'utiliser des techniques de modulation avancées (telles que DCO-OFDM ou ACO-OFDM) et des égaliseurs numériques pour maintenir un BER acceptable à haut débit.

2. Rôle de la Puissance Optique Émise

La puissance lumineuse joue un rôle déterminant dans le maintien de la qualité du signal reçu. Une augmentation de cette puissance permet d'améliorer le rapport signal/bruit (SNR), en particulier à moyenne distance (jusqu'à 50 m), ce qui se traduit par une réduction du BER. Toutefois, à très haut débit, même une puissance optique élevée ne suffit pas à compenser les pertes de propagation et la limitation de bande passante des LED. Cela met en évidence un compromis important entre l'efficacité énergétique du système et ses performances de transmission. Ainsi, pour des applications à forte exigence de débit, une gestion optimisée de la puissance optique est indispensable, notamment en associant les LED à des dispositifs de focalisation ou de guidage de la lumière.

3. Effets de la Distance sur la Performance du Réseau

La distance entre les unités d'émission et de réception influe directement sur la puissance reçue, qui diminue généralement selon une loi en $1/d^2$ dans des conditions de ligne de visée (LOS). À partir de 100 mètres, les performances chutent rapidement. Pour des distances allant jusqu'à 150 mètres, seules les transmissions à faible débit (< 1 Mbit/s) peuvent être maintenues, et uniquement à condition d'augmenter considérablement la puissance optique. Ces résultats soulignent la vulnérabilité du Li-Fi aux conditions de propagation, ainsi que la nécessité d'adopter des solutions de renforcement, telles que l'utilisation de relais optiques, de lentilles convergentes ou de systèmes automatique de faisceau lumineux.

3.5 Conclusion

Les simulations confirment que la technologie Li-Fi est particulièrement adaptée aux communications à courte et moyenne portée, avec des performances très satisfaisantes à bas et moyen débit. Néanmoins, au-delà d'un certain seuil (en débit comme en distance), le système montre ses limites, ce qui impose le recours à des techniques d'optimisation avancées pour préserver la qualité de service. Ces résultats permettent de mieux définir les domaines d'application idéaux pour le Li-Fi, notamment les environnements confinés (salles de réunion, bibliothèques, hôpitaux) où les exigences en débit et en sécurité sont élevées, mais où les distances de couverture restent modérées.

Conclusion General

L'étude et la simulation du réseau Li-Fi que nous avons menées ont permis de mettre en évidence le potentiel considérable de cette technologie innovante dans le domaine des communications sans fil. Contrairement aux réseaux Wi-Fi traditionnels, le Li-Fi utilise la lumière visible pour transmettre les données, ce qui lui confère des avantages significatifs en termes de bande passante, sécurité, vitesse de transmission, et densité de connexion.

La simulation réalisée à l'aide de [indiquer le logiciel ou la plateforme utilisée, ex. MATLAB/Simulink, OptiSystem, etc.] a permis d'évaluer les performances du réseau dans différents scénarios. Les résultats montrent que, dans un environnement bien éclairé et sans obstacles majeurs, le Li-Fi peut atteindre des débits très élevés tout en maintenant une faible latence. Toutefois, certaines limites ont également été observées, notamment la sensibilité à l'obstruction physique et la nécessité d'un alignement optique optimal entre l'émetteur (LED) et le récepteur (photodiode).

L'intégration d'un réseau Li-Fi dans un environnement réel nécessite donc une planification rigoureuse, en tenant compte de la disposition des luminaires, des matériaux réfléchissants, et des usages spécifiques des utilisateurs. De plus, l'association avec d'autres technologies (Wi-Fi, 5G) dans une approche hybride pourrait permettre de pallier les limitations actuelles et d'exploiter au mieux les atouts du Li-Fi.

Références Bibliographiques

-
- [1] Z. Wang et al., *Visible Light Communications : Modulation and Signal Procession*. 2017.
- [2] M. Kavehrad, "Sustainable energy-efficient wireless applications using light," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 12, pp. 66–73, Dec. 2010.
- [3] N. Bardsley et al., "Solid-state lighting research and development: Multi-year program plan," U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/techroadmaps.html>
- [4] W. Huang, P. Tian, and Z. Xu, "Design and implementation of a real-time CIM-MIMO optical camera communication system," *Optics Express*, vol. 24, no. 21, pp. 24567–24579, Oct. 2016.
- [5] J. Hu, C. Gong, and Z. Xu, "Demonstration of a robot controlling and positioning system based on visible light," in *Proc. Int. Conf. Wireless Commun. & Signal Processing (WCSP)*, Yangzhou, China, Oct. 2016, pp. 1–6.
- [6] T. Yamazato et al., "Image-sensor-based visible light communication for automotive applications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 7, pp. 88–97, Apr. 2014.
- [7] Y. Goto et al., "A new automotive VLC system using optical communication image sensor," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 3, p. 6802716, Jun. 2016.
- [8] Z. Chen and H. Haas, "Physical layer security for optical attocell networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, 2017, pp. 1–6.
- [9] M. Uysal et al., "IEEE 802.15.7r1 Reference Channel Models for Visible Light Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 1, pp. 212–217, Jan. 2017.
- [10] N. Kumar, "Visible Light Communication Based Traffic Information Broadcasting Systems," *Int. J. Future Computer and Communication*, pp. 26–30, 2014.
- [11] S. Dimitrov and H. Haas, *Principles of LED Light Communications*. Cambridge University Press, 2015.
- [12] P. Goswami and M. K. Shukla, "Design of a Li-Fi Transceiver," *Wireless Engineering and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 71–86, 2017.
- [13] J. Wang et al., "High thermal stability of phosphor-converted white-light-emitting diodes employing Ce:YAG doped glass," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 17, no. 3, pp. 741–746, May/Jun. 2011.
- [14] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, "LED based indoor visible light communications: State of the art," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649–1678, 2015.
- [15] F. Zafar, D. Karunatilaka, and R. Parthiban, "Dimming schemes for visible light communications: The state of research," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 2, pp. 29–35, Apr. 2015.
- [16] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S. K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 72–82, Mar. 2012.

Références bibliographiques

- [17] Z. Ghassemlooy et al., *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®*, 2012.
- [18] T. Cevik and S. Yilmaz, "An Overview of Visible Light Communication Systems," *Int. J. Computer Networks & Communications*, vol. 7, no. 6, pp. 139–150, Nov. 2015.
- [19] A. Chaaban, J. Morvan, and M. Alouini, "Free-space optical communications: Capacity bounds, approximations, and a new sphere-packing perspective," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 3, pp. 1176–1191, Mar. 2016.
- [20] S. M. Moser, "Capacity results of an optical intensity channel with input-dependent Gaussian noise," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 58, no. 1, pp. 207–223, Jan. 2012.
- [21] N. Bardsley *et al.*, —Solid-state lighting research and development: Multi-year program plan, U.S. Dept. Energy, Washington, DC, USA, Tech. Rep., 2014. [En ligne]
- [22] T. Baumgartner et al., "Lighting the way: Perspectives on the global lighting market," McKinsey & Company, Nashua, NH, USA, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: <http://www.ledsmagazine.com>
- [23] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "A study of LED nonlinearity effects on optical wireless transmission using OFDM," in *Proc. 6th IEEE Int. Conf. Wireless and Optical Commun. Networks (WOCN)*, Cairo, Egypt, Apr. 2009, doi: 10.1109/WOCN.2009.5010576.
- [24] L. U. Khan, "Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges," *Digital Communications and Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 78–88, May 2017.
- [25] S. Chergui, Conception et réalisation d'un système de communication bureautique par lumière visible (Li-Fi). [Online]. Available: http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/14631/1/chergui_sofia.pdf
- [26] P. Lorenz et L. Hamada, «LiFi Towards 5G: Concepts, Challenges, Applications in Telemedicine», *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Embedded & Distributed Systems (EDiS)*, pp. 123–127, 2020
- [27] NextLiFi, «Underwater Communications System», [En ligne]. Disponible sur: <http://www.nextlifi.com/underwater-communications-system/>. [Consulté le: juin 2025].
- [28] Ondes et Prévention, «LiFi», [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ondesetprevention.fr/categorie/lifi>. [Consulté le: juin 2025].
- [29] LED-FR, «Les différents types de LEDs», [En ligne]. Disponible sur: <https://www.led-fr.net/differents-types-de-leds.htm>. [Consulté le: juin 2025].