

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Systemes de Télécommunications**

**Etude et évaluation des performances d'un système de communication
par lumière visible dans les applications Indoor**

Présenté par :

- **NABLI Wissal Nor Eddoudja**
- **HALLACI Aya**

Sous la direction de :

Dr . GRAINI Leila

Juin 2024

Remerciement

*Premièrement, Nous remercions **Allah** le tout puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser notre projet de fin d'études.*

*Le grand merci à notre directrice de mémoire **Mme GRAINI Leila** pour avoir d'abord proposé ce thème, et d'avoir mis à notre disposition tous les moyens qui nous ont permis de mener à terme cette étude et pour la gentillesse, la compréhension et la patience et aussi pour ses précieux conseils et ses encouragements.*

*Je remercie vivement **les membres du jury** qui ont aimablement accepté de prendre part à ce modeste travail.*

*Nous remercions en fin **nos familles** pour leur soutien sans faille durant ces années, Nous remercions également tous **nos amis et collègues**.*

Dédicace

*Tous les mots du monde ne peuvent expliquer mon appréciation, mon amour,
Mon respect et ma reconnaissance ; tout ce que peux dire,
C'est que je vous dédie ce modeste travail :*

A ma chère mère Fella

*Ma source d'inspiration et ma plus grande supportrice. Tu as été la lumière qui
A éclairé mon chemin et le palier sur lequel je me suis appuyé tout au long de
Ma vie Mémé si les mots ne peuvent pas exprimer pleinement ma gratitude, j'espère que
Cette dédicace témoigne de l'amour et du respect que j'ai pour toi, ma chère mère.*

A mon chère père Mounir

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect
Que j'ai toujours eu pour toi, ce travail est le fruit des sacrifices que tu as
Consentis pour mon éducation et ma formation je le dédie ce travail en témoignage
De mon profond amour.*

A mes chers frères

*A mes chers frères « Kader » et « Siraj » en témoignage de l'attachement, de l'amour
Et de l'affection que je porte pour vous, vous êtes toujours dans mon cœur
Je veux remercier d'être l'épaule sur lequel je peux toujours compter. Je vous dédie
Ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

A mes chers amis

*A mes chers amis « Lina », « Malek », « Rania » et « Inès » vous êtes pour moi des sœurs
Sur qui je peux compter, en témoignage de l'amitié et des souvenirs de tous les
Moments que nous avons passés ensemble je vous dédie ce travail et je vous souhaite une
Vie pleine de santé et de bonheur*

A mon cher binôme

Sans oublier mon binôme « Aya » pour son soutien moral tout au long de ce travail

Je vous aime beaucoup

Nabli Wissal

Dédicace

Je dédie ce mémoire

*A ma maman * **Habiba** * qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

*A ma sœur * **Imen khadidja** **

*A mon mari * **Imed** **

*A **ma famille**, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

*A mes amis * **Jouhaina** et **Manal** * qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus
de succès.*

*Ainsi je le dédie également à ma collègue de travail * **Wissal** * qu'elle
trouve ici mon respect le plus profond.*

Aya

الملخص

أصبحت أنظمة الاتصالات عبر الضوء المرئي (VLC: Visible Light Communications) تهدف بشكل خاص في السنوات الأخيرة كحل لخدمات الشبكات الضوئية اللاسلكية عالية السرعة في البيئات الداخلية (Indoor). يستخدم VLC البنية التحتية الضوئية التي تستند إلى الثنائيات الباعثة للضوء (LED) كمرسل للإشارات الضوئية، لتوفير الوصول إلى البيانات بأسعار منخفضة. يتم استخدام الثنائيات الضوئية (PD) كأجهزة استقبال للكشف عن الإشارة الضوئية. ومع ذلك، فإن التحديات والقيود الرئيسية المتعلقة بإنشاء ارسال VLC في هذا السياق هي متطلبات قناة VLC، يتضمن ذلك وضع أجهزة الإرسال (LED) وأجهزة الاستقبال (PD) في المواقع المثالية في الغرفة، وتحديد اتجاهاتهم وتوجيهاتهم، تحديد قوة الإشارة الضوئية المستقبلية ومستوى الضوضاء والتي يمكن لهم أن يؤثرها على جودة الاتصال.

الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة تأثير مختلف القيود على نقل اشارة البيانات المعدلة (NRZ-OOK) عبر قناة VLC بواسطة البرنامج الحاسوبي. Optisystem. بدأنا بدراسة الاستجابة النبضية لقناة VLC. بعد ذلك قمنا بتقييم إشارة VLC باستخدام LED بطول موجي 750 نانومتر كمصدر ضوئي، مع الأخذ في الاعتبار بشكل خاص وجود الضوضاء المحيطة. بالإضافة إلى ذلك، تم تحليل أداء قناة VLC من حيث معامل الجودة (Q)، ومعدل الخطأ (BER)، نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) وقوة الإشارة الضوئية المستقبلية، تحت تأثير معلمات وخصائص جهازي الإرسال والاستقبال.

الكلمات المفتاحية: الاتصالات عبر الضوء المرئي (VLC)، الثنائيات الباعثة للضوء (LED)، الثنائيات المستقبلية للضوء (PD)، معامل الجودة (Q)، معدل الخطأ (BER)، نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR).

Abstract

Visible Light Communications (VLC) systems have attracted significant attention in recent years as a promising solution for ultra-high-speed wireless optical networks in indoor environments. VLC exploits lighting infrastructure based on light-emitting diodes (LEDs) as optical signal transmitters, to provide low-cost data access. At the receivers, photodiodes (PD) are used to detect the optical signal. However, the main limitations to establish a VLC transmission system in this context are the requirements of the VLC channel. It involves positioning the transmitters (LED) and receivers (PD) at optimal locations in a room, to determine their orientation and their directivities, and to determine the distribution of the optical powers received and the noise level, which can express the quality of the communication.

The objective of this work is to study and simulate the impact of different limitations on the transmission of intensity-modulated signal (NRZ-OOK) via a VLC link, using the OptiSystem software. We have started by studying the impulse response of the VLC channel. We then evaluated the VLC signal using a LED with 750 nm wavelength as optical source, taking into account the presence of ambient noise. Additionally, the performance of the VLC link is analyzed by evaluating the quality factor (Q factor), the bit error rate (BER), the signal-to-noise ratio (SNR) and the received power, under the impact of the parameters of the transmitter-receiver and their characteristics.

Keywords: visible light communications (VLC), light emitting diode (LED), photodiode (PD), Q factor, BER, SNR.

Résumé

Les systèmes de communication par lumière visible (VLC : Visible Light Communications) ont attiré une attention particulière ces dernières années en tant qu'une solution prometteuse pour les réseaux optiques sans fil à très haut-débit dans les environnements internes (Indoor). VLC exploite l'infrastructure d'éclairage basée sur les diodes électroluminescentes (LED) comme émetteurs du signal optique, pour fournir un accès aux données à faible coût. Au niveau des récepteurs, les photodiodes (PD) sont utilisées pour détecter le signal optique. Néanmoins, les principales contraintes liées à l'établissement d'une transmission VLC dans ce contexte sont les exigences du canal VLC. Il s'agit de positionner les émetteurs (LED) et les récepteurs (PD) à des emplacements optimaux dans une pièce, de déterminer leur orientation et leurs directivités, ainsi de déterminer la distribution des puissances optiques reçues et le niveau de bruit, qui peuvent exprimer la qualité de la communication.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier et simuler l'impact de différentes contraintes sur la transmission des signaux de données modulés en intensité (NRZ-OOK) via une liaison VLC, utilisant le logiciel de simulation OptiSystem. Nous avons commencé par étudier la réponse impulsionnelle du canal VLC. Ensuite, le signal VLC a été évalué utilisant une LED de longueur d'onde 750 nm comme source optique, en prenant particulièrement en compte la présence de bruit ambiant. En plus, les performances de la liaison VLC sont analysées en termes du facteur de qualité (Q factor), du taux d'erreurs binaire (BER), du rapport signal/bruit (SNR) et de puissance reçue au niveau du récepteur, sous l'impact des paramètres de l'émetteur-récepteur et leurs caractéristiques.

Mots clé : communications par lumière visible (VLC), diode électroluminescente (LED), photodiode (PD), facteur de qualité (Q), BER, SNR.

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Table des matières	I
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VI
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la communication par lumière visible (VLC)	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralité	3
I.3 Historique des communications par lumière visible	4
I.3.1 Les débuts	4
I.3.2 Le développement du Li-Fi.....	4
I.4 Les avantages et les inconvénients de système VLC	5
I.4.1 Les avantages	5
I.4.2 Les inconvénients.....	6
I.5 Principe de fonctionnement.....	6
I.6 Architecture du système VLC.....	7
I.6.1 Emetteur VLC.....	8
I.6.1.1 Description.....	8
I.6.1.2 LED et VLC.....	8
I.6.1.3 Types et structures des LEDs.....	9
I.6.1.4 Mode de rayonnement.....	11
I.6.2 Récepteur VLC.....	12
I.6.2.1 Les Caractéristiques d'une photodiode (PD).....	13
I.6.3 Canal de transmission	13
I.7 Les modulations associées aux communications VLC.....	14
I.7.1 La Modulation OOK.....	14
I.7.2 La modulation VPPM.....	14
I.7.3 La modulation OFDM.....	15
I.7.4 La modulation CSK (Color shift keying).....	15

I.8 Les domaines d'application de VLC.....	16
I.8.1 Systèmes VLC Indoor.....	16
I.8.2 Systèmes VLC Outdoor.....	19
I.9 Conclusion.....	20
Chapitre II : Modélisation du canal VLC	
II.1 Introduction.....	21
II.2 Canal VLC.....	21
II.2.1 Topologies.....	21
II.2.2 Modélisation d'un canal VLC.....	22
II.2.3 La réponse impulsionnelle $h(t)$	24
II.2.4 Gain statique.....	25
II.2.5 La réponse fréquentielle $H(f)$	26
II.3 Les sources de bruits.....	26
II.3.1 Bruit de courant d'obscurité.....	26
II.3.2 Bruit ambiant.....	27
II.3.3 Bruit de la photodiode.....	29
II.3.4 SNR dans VLC.....	29
II.4 Conclusion.....	30
Chapitre III : Résultats de la simulation	
III.1 Introduction.....	31
III.2 Présentation du logiciel OptiSystem.....	31
III.2.1 Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem.....	31
III.2.2 Applications du logiciel OptiSystem.....	32
III.2.3 Avantages du logiciel OptiSystem.....	32
III.3 Les principaux critères d'évaluation d'une transmission optique.....	32
III.3.1 Le diagramme de l'œil.....	32
III.3.2 Facteur de qualité Q	33
III.3.3 Taux d'erreur binaire (BER).....	33
III.4 Présentation de l'architecture du système VLC.....	33
III.4.1 Schéma fonctionnel du système VLC.....	33
III.4.2 Présentation de la liaison VLC sous l'OptiSystem.....	34
III.4.2.1 L'émetteur optique.....	34
III.4.2.2 Le canal LOS.....	35
III.4.2.3 Le récepteur optique.....	35

III.4.3 Résultats de la simulation	36
III.5 Etude des performances du système VLC.....	39
III.5.1 Performances liées aux paramètres globaux du système.....	39
III.5.2 Performances liées aux paramètres du canal VLC.....	41
III.5.3 Performances liées aux paramètres Emetteur/Récepteur.....	41
III.5.4 Performances liées à la distribution de la puissance optique reçue.....	44
III.5.5 Performances liées au SNR	45
III.6 Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	47
Références bibliographiques.....	49

Liste des Figures

Chapitre I : Généralités sur la communication par lumière visible (VLC)

Figure I.1 : Spectre électromagnétique.....	4
Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'un système VLC.....	6
Figure I.3 : Schéma fonctionnel d'un système VLC	7
Figure I.4 : Principe d'une LED blanche à base de phosphore.....	9
Figure I.5 : Génération d'une lumière blanche avec : (a) une LED rouge-vert-bleu, (b) une LED bleue avec phosphore	10
Figure I.6 : Illustration de l'ordre de rayonnement m d'une source LED.....	13
Figure I.7: Modulation OOK.....	14
Figure I.8: Modulation VPPM.....	14
Figure I.9: Modulation OFDM.....	15
Figure I.10: Modulation CSK.....	16
Figure I.11 : Illustration de la communication VLC à bord d'un avion.....	17
Figure I.12 : Utilisation du VLC pour la localisation intérieure.....	17
Figure I.13 : Illustration de la communication VLC à bord d'un hôpital.....	18
Figure I.14 : Système d'éclairage intelligent compatible avec VLC.....	18
Figure I.15 : Communication de véhicule-véhicule (V2V).....	19
Figure I.16 : Illustration du VLC dans la communication sous-marine.....	19

Chapitre II : Modélisation du canal VLC

Figure II.1 : Modèles de canal VLC.....	21
Figure II.2 : Modèle équivalent en bande de base d'un système optique sans fil IM/DD...	23
Figure II.3 : Illustration des paramètres des modèles LOS et NLOS.....	24
Figure II.4: Spectres de puissance optique des différentes sources courantes de bruit.....	27

Chapitre III : Résultats de la simulation

Figure III.1 : Diagramme de l'œil d'une transmission optique.....	32
Figure III.2 : Schéma fonctionnel du système VLC.....	34
Figure III.3 : L'architecture générale de la liaison VLC simulé par Optisystem.....	34
Figure III.4 : Model de simulation d'émetteur VLC (LED).....	35
Figure III.5 : Le model de simulation d'un canal LOS.....	35
Figure III.6 : Le model de simulation d'un récepteur optique.....	36
Figure III.7 : Le signal binaire d'origine.....	37

Figure III.8: La porteuse optique générée par LED.....	37
Figure III.9 : Signal optique modélisé par la LED.....	38
Figure III.10 : Signal optique à la sortie du canal LOS.....	38
Figure III.11 : Signal à la sortie de la photodiode.....	38
Figure III.12 : Signal électrique reçu.....	39
Figure III.13 : Diagramme de l'œil d'un signal reçu.....	40
Figure III.14 : BER en fonction de SNR.....	40
Figure III. 15 : La réponse impulsionnelle du canal VLC.....	41
Figure III.16 : Variation de la puissance optique reçue en fonction de l'angle à mi puissance (transmitter half-angle)($\psi_{1/2}$).....	42
Figure III.17 : Variation de la puissance optique reçue de l'angle à mi-irradiance (irradiance half-angle $\phi_{1/2}$) pour $\Theta_{1/2} = 60^\circ$ et $\psi_{1/2}=20^\circ$	43
Figure III.18 : Variation de la puissance optique reçue en fonction de l'angle à mi- incidence (incidence half-angle $\psi_{1/2}$) pour $\Theta_{1/2} = 60^\circ$ et $\phi = 20^\circ$	43
Figure III.19 : La variation de la puissance optique reçue en fonction de la distance.....	44
Figure III.20 : Distribution de la puissance optique reçue pour une LED (pour $\theta_{1/2} = 60^\circ$).....	45
Figure III.21: Distribution du SNR dans une pièce	45

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralités sur la communication par lumière visible (VLC)

Tab I.1 : Caractéristiques de la LED.....	8
Tab I.2: Liaisons VLC basées sur des LED blanches à base de phosphore.....	11
Tab I.3: Liaisons VLC basées sur des LED multi-puces.....	12
Tab I.4: Liaisons VLC à base de LED organique (OLED).....	12
Tab I.6: Modulation CSK.....	16

Chapitre III : Résultats de la simulation

Tab III.1 : Les caractéristiques de la LED.....	35
Tab III.2 : Les caractéristiques du canal LOS.....	35
Tab III.3 : Les caractéristiques du récepteur.....	36

Introduction générale

Introduction générale

Les systèmes de communication sans fil sont parmi les technologies les plus couramment employées à l'échelle mondiale pour différentes applications et contextes. Ainsi, la demande de connectivité sans fil continue de croître, ce qui pose des défis en raison de la croissance du débit liée aux nouveaux services et usages, notamment pour l'internet des objets (IoT ou « internet of things ») qui se développe rapidement. En 2025, il est prévu que le nombre d'appareils connectés atteigne 34,2 milliards, dont 21,5 milliards d'objets IoT [1]. En réalité, la connexion sans fil joue un rôle essentiel dans de nombreux domaines, tels que les loisirs, le sport, le bien-être ou encore la maison. Elle est également utilisée dans les domaines médicaux, militaires et spatiaux, ainsi que dans le transport et la ville intelligente. La majorité des systèmes de communication sans fil actuels s'appuient sur les technologies de radiofréquence (RF) pour transmettre des informations. En conséquence, le spectre RF est de plus en plus utilisé ne sera pas suffisant pour l'avenir des communications sans fil. Il est donc de plus en plus nécessaire d'avoir un spectre supplémentaire. L'une des solutions proposées est l'emploi de la communication sans fil optique notamment par lumière visible ou VLC (Visible Light Communications).

La communication par lumière visible (VLC) est une technologie de communication sans fil qui utilise des signaux lumineux pour transférer des données au dispositif récepteur [2]. L'intérêt de la VLC réside dans son incompatibilité avec les signaux RF et sa capacité à être utilisée en toute sécurité dans des zones à radio fréquence limitée comme les avions, les hôpitaux, la communication sous-marine, satellitaires, de véhicule à véhicule et de nombreuses autres applications. De plus, les LED puissantes et abordables qui peuvent être utilisées à des fréquences élevées sont des caractéristiques technologiques essentielles qui permettent de réaliser VLC. L'infrastructure VLC est déjà en place, il est nécessaire de substituer les ampoules classiques par les lumières LED. Cela permettra donc de bonnes performances techniques et énergétiques ainsi qu'un coût de déploiement contenu.

L'utilisation de lumières à LED pour la communication VLC permet d'accéder à un haut débit. Elle convient spécifiquement aux environnements intérieurs (Indoor) comme les salles intelligentes à haute sécurité, où les données à haut débit sont transmises en ajustant l'intensité lumineuse de manière imperceptible à l'œil humain. La lumière visible offre une bande passante de centaines de Téra-hertz et n'est pas soumise à licence ni à réglementation, ce qui en fait une option viable qui peut être intégrée à l'infrastructure existante [3].

Cependant, comme toute technologie, le VLC rencontre à son tour des contraintes et des limites. Il est important de prendre en considération certains paramètres lors de la mise en place du système VLC. La première chose à prendre en compte est la ligne de vue. Ensuite, il est essentiel de prendre en compte la distance entre l'émetteur et le récepteur lors de la conception d'un système VLC. Alors, l'objectif de notre travail est d'étudier l'impact de ces contraintes sur la transmission des données via une liaison VLC dans le contexte indoor dans une pièce, prenant en compte les exigences du canal VLC, tel que le positionnement des émetteurs et les récepteurs, ainsi que leurs orientation et directivités, en plus de la distribution des puissances optiques reçues, et les niveaux de bruit qui peuvent exprimer la qualité de la communication.

Le travail réalisé au cours de ce mémoire est subdivisé en trois chapitres, où :

Dans le premier chapitre, nous commençons par présenter la définition de la communication par lumière visible, suivie d'un bref historique, puis son principe de fonctionnement, nous citons ensuite quelques avantages, inconvénients, suivi de l'architecture d'un système VLC : émetteur, récepteurs, canal de transmission optique, ainsi que les techniques de modulation et les domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les fondements théoriques du canal VLC. Nous décrivons d'abord la modélisation d'un canal VLC. Ensuite, nous décrivons les différentes sources de bruit existantes dans un système VLC.

Le troisième chapitre de ce mémoire se concentre sur les résultats de la simulation et la conception d'un système VLC pour les applications Indoor (dans une pièce), utilisons le logiciel OptiSystem. Nous commençons par une brève présentation de logiciel et les critères de qualité utilisés pour évaluer les performances du système VLC, suivi par une description détaillé de l'architecture du système VLC proposé, ainsi que les paramètres de simulation utilisés. Ensuite, nous étudions la transmission des signaux numériques de type NRZ-OOK prenant en compte l'influence des paramètres de l'émetteur-récepteur et de leurs caractéristiques. La qualité du signal reçu est évaluée en fonction du diagramme de l'œil, du facteur de qualité (Q), du taux d'erreurs binaires (BER - Bit Error Rate), du rapport signal sur bruit (SNR - Signal-to-Noise Ratio), et de puissance reçue au niveau du récepteur.

Finalement, nous finalisons notre mémoire par une conclusion générale avec des perspectives.

Chapitre I :

Généralités sur la communication par lumière visible (VLC)

I.1 Introduction

Dans le domaine des communications sans fil, la communication par lumière visible (VLC) est un domaine de recherche en plein essor. Le fonctionnement du système est similaire à celui des systèmes de communication à fibre optique. Pendant ce temps, le système VLC se sert de l'espace libre comme moyen de communication. Grâce à l'apparition de la diode électroluminescente (LED: Light Emitting Diodes), les systèmes de communication contemporains ont considérablement progressé technologiquement. La LED joue le rôle d'émetteur dans VLC et envoie des données sous forme de lumière à grande vitesse, ce qui rend difficile leur identification par l'œil humain. L'un des principaux atouts du système VLC par rapport aux autres systèmes de communication est sa facilité d'utilisation avec une LED et une photodiode ou un phototransistor. Le système présente des caractéristiques économiques, compactes, abordables, petites et de faible puissance, qui permettent de prévenir et d'éliminer les interférences radio, les droits de diffusion et les câbles enterrés [1].

Dans ce chapitre, on apprend les concepts fondamentaux liés aux technologies VLC afin de comprendre la portée du travail. On présente les principes généraux, les bénéfices, les désavantages et les caractéristiques des communications par lumière visible. Il y a également une description détaillée des principes physiques et de l'architecture des liaisons de communication par la lumière visible VLC, ainsi que des techniques de modulation pour les communications optiques sans fil utilisées dans les standards publiés. On décrit également les différents domaines d'applications tels que les systèmes VLC Indoor et Outdoor.

I.2 Généralité

Contrairement au Wi-Fi, qui utilise des ondes radio, la VLC utilise des LED pour moduler la lumière à des vitesses invisibles à l'œil nu. Cette modulation permet de transmettre des informations binaires, tout comme le fait le Wi-Fi avec les ondes radio.

La technologie de la VLC est en plein essor dans le domaine des éclairages à LED. La communication optique sans fil (OWC) est une forme de communication optique qui ne peut être transmise que sur des distances de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Elle a deux fonctions : éclairer et communiquer des données/électronique. La partie visible du spectre de longueurs d'onde comprise entre 380 et 750 nm, c'est-à-dire un spectre de fréquences de 430 THz à 790 THz, est couvert par VLC, comme le montre la figure I.1. La capacité de commutation

de la LED offre la possibilité de transmettre des informations à un débit élevé (1 Gb/s) [2, 3,4].

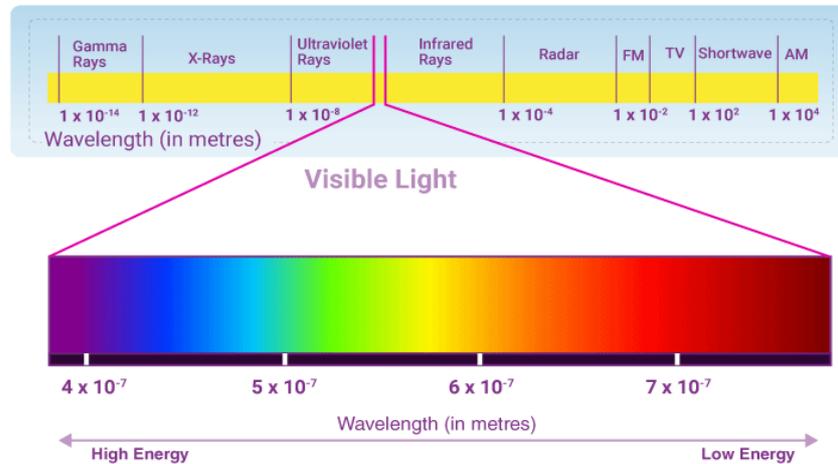


Figure I.1 : Spectre électromagnétique [5].

I.3 Historique des communications par lumière visible

I.3.1 Les débuts

L'idée d'utiliser la lumière pour la communication n'est pas nouvelle. Les premiers exemples remontent à l'Antiquité, lorsque les Grecs et les Romains utilisaient des feux de signalisation pour communiquer entre eux. En 1880, Alexander Graham Bell a inventé le photophone, un appareil qui pouvait transmettre de la voix sur un faisceau de lumière [6].

I.3.2 Le développement du Li-Fi

Les recherches sur les communications par la lumière visible ont connu un essor important au cours des dernières décennies, grâce aux progrès des technologies LED. En 2008, Harald Haas, professeur à l'Université d'Édimbourg, a utilisé le terme «Li-Fi» (Light Fidelity) pour la première fois lors d'une conférence TED. Depuis lors, la technologie Li-Fi a fait l'objet de nombreuses recherches et développements [7].

Les premières applications commerciales du Li-Fi ont été lancées au début des années 2010. Parmi les premiers adoptants figuraient des entreprises telles que Velodyne Lidar et Oledcomm. Ces entreprises ont développé des systèmes Li-Fi pour une variété d'applications, notamment le positionnement intérieur, la signalisation numérique et le transfert de fichiers [8].

Aujourd'hui, la technologie Li-Fi est encore en développement, mais elle est de plus en plus utilisée dans une variété d'applications. Le Li-Fi est utilisé dans des environnements tels que les hôpitaux, les avions et les usines. Il est également utilisé dans des applications grand public, telles que les smartphones et les tablettes [9].

Malgré ses nombreux avantages, le Li-Fi fait face à un certain nombre de défis. L'un des défis est que la portée du Li-Fi est limitée par la ligne de mire. Cela signifie que les systèmes Li-Fi doivent être soigneusement positionnés pour garantir une couverture adéquate. Un autre défi est que le Li-Fi peut être sensible aux interférences de la lumière ambiante [9].

Malgré ces défis, l'avenir du Li-Fi semble prometteur. Les chercheurs travaillent sur de nouvelles technologies pour améliorer la portée et les performances du Li-Fi. Ils travaillent également sur de nouvelles applications pour le Li-Fi, telles que les communications véhicule-à-véhicule et les communications véhicule-infrastructure [9].

I.4 Les avantages et les inconvénients de système VLC :

I.4.1 Les avantages

La technologie VLC offre de nombreux bénéfices, tels qu'une bande passante gratuite avec un taux de données élevé, un spectre sans licence, ainsi que la sécurité pour les personnes et les équipements électroniques de haute précision. Outre ces bénéfices, VLC offre une solution abordable et facile à installer. On remarque notamment les points suivants [10] :

- **Large bande passante :** En raison de la demande croissante de services sans fil à haute vitesse, le spectre RF devient de plus en plus saturé. Le champ d'ondes radio est restreint, allant de 3 kHz à 300 GHz, tandis que le champ d'ondes visible est d'au moins 1000 fois plus étendu que 400 THz à 780 THz. Cette vaste plage de fréquences permet de résoudre les problèmes de congestion du spectre RF.
- **Aucune interférence électromagnétique:** La VLC produit pratiquement aucun rayonnement électromagnétique dans l'espace, ce qui en fait une excellente solution de communication sans fil pour les environnements qui sont soumis à l'immunité aux interférences électromagnétiques (EMI), comme les hôpitaux, les centrales nucléaires et les avions.

- **La sécurité sanitaire** : En utilisant la lumière visible comme moyen de transmission de données, VLC assure une sécurité totale pour la santé des êtres humains. Bien que l'impact négatif des RF sur la santé humaine n'ait pas encore été totalement prouvé, de nombreuses voix du milieu médical mettent en évidence ce fait.
- **Mise en place simple et abordable** : Il est facile et économique de mettre en place un système VLC, car il permet de combiner les fonctions d'éclairage et de communication en ajoutant seulement quelques modules supplémentaires au système d'éclairage existant. En outre, avec l'essor de l'industrie des LED, les dépenses de fabrication des émetteurs-récepteurs VLC ont connu une baisse significative. Cela facilite l'accès et le coût de la technologie VLC à grande échelle.
- **La sécurité des communications RF** : revêt une importance capitale, car les ondes radio peuvent entrer dans les murs, ce qui entraîne des fuites d'informations. À la différence du VLC, les ondes lumineuses ne passent pas par les parois. L'échange de données demeure limité dans l'espace éclairé. C'est un bénéfice qui favorise l'amélioration de la sécurité des informations et garantit des connexions de communication plus sécurisées.

I.4.2 Les inconvénients

Même si la technologie de communication optique sans fil offre de nombreux bénéfices, elle présente également certaines contraintes. La qualité du signal peut être altérée par les obstacles ou les obstructions présentes dans l'environnement, ce qui peut causer des perturbations dans la communication. En outre, les systèmes peuvent être affectés par les sources de bruit optique à proximité, comme la lumière du soleil ou d'autres sources lumineuses. Finalement, la distance de transmission est restreinte, ce qui implique que les signaux optiques ne peuvent pas être transmis sur de grandes distances sans subir de dégradation de qualité.

I.5 Principe de fonctionnement

Étant donné que les LEDs sont des semi-conducteurs, elles peuvent s'éteindre et s'allumer en seulement nanosecondes. Il est possible de transmettre des informations en créant une fréquence en allumant et en éteignant plusieurs

milliers de fois par seconde. En cas d'allumage d'une LED, elle émet un bit 1, tandis qu'en cas d'éteinte, elle émet un bit 0 (voir Figure I.2). Les variations de fréquence sont si rapides que l'œil humain ne voit pas le clignotement et ne voit qu'une lumière fixe. En ce qui concerne le débit, il s'agit de 1 Gbits/s contre 100 Mbit/s pour le Wi-Fi, soit 10 fois plus faible [11].

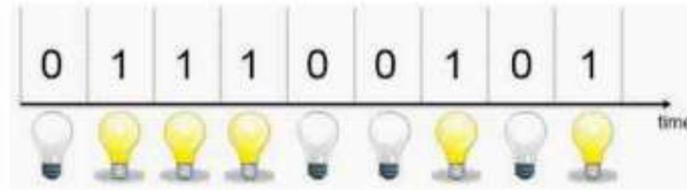


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'un système VLC [12].

I.6 Architecture du système VLC :

La figure I. 3 présente l'architecture complète du système de transmission VLC. Le frontal de l'émetteur (VLC transmitter), le récepteur (VLC receiver) et le canal de propagation (VLC channel) constituent ses trois parties principales.

- **Le dispositif émetteur** : à la capacité de transformer des signaux électriques en puissance optique en les modulant à l'aide d'une LED ou d'une LD (diode laser).
- **Le canal** : le milieu où l'onde se propage (espace ouvert).
- **Le récepteur** : La détection d'une puissance optique par unité de surface par une photodiode (PD) est effectuée par le récepteur, qui la transforme en un signal électrique par démodulation.

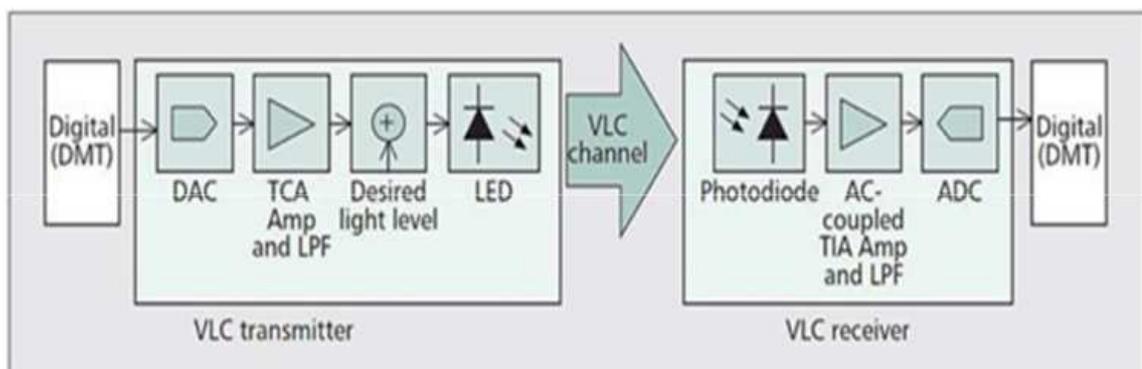


Figure I. 3 : Schéma fonctionnel d'un système VLC [12].

Les particularités de ces éléments ont une influence importante sur le système VLC. Dans ce qui suit, nous exposons chaque partie individuelle en soulignant ses éléments essentiels et ses caractéristiques principales.

I.6.1 Emetteur VLC

I.6.1.1 Description

Un émetteur VLC est un émetteur électro-optique qui transmet des données via un canal de transmission sans fil en utilisant des ondes lumineuses visibles. L'émetteur est constitué d'un convertisseur numérique-analogique (DAC) qui module les bits d'information et les convertit en un signal analogique. L'émetteur est composé d'un amplificateur à transconductance (TCA), de filtres passe-bas (LPF) et de LED haute vitesse. La LED convertit le signal électrique en un signal optique, ce qui permet d'éclairer et de communiquer. Les données sont enregistrées et modulées en ligne par le DAC avant d'être transmises au signal optique, ce qui implique de modifier l'amplitude ou toute autre qualité de la lumière de la LED [13].

I.6.1.2 LED et VLC

Les LED sont souvent choisies en VLC en raison de leur prix abordable et de leur large surface d'émission, ce qui permet de générer des faisceaux optiques plus diffus, ce qui facilite le respect des contraintes d'éclairage et de la sécurité oculaire. La bande passante et le rendement des LD sont supérieurs à ceux des LED, mais elles émettent généralement des faisceaux très étroits, ce qui nécessite de respecter des contraintes de sécurité oculaire. Les LD sont généralement employées dans des applications plus particulières, telles que les connexions point-à-point à très haut débit. Les deux composants sont comparés dans le tableau I-1 [14].

Le tableau suivant montre les caractéristiques de la LED :

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 AlGaN

Tab I.1 : Caractéristiques de la LED [14].

I.6.1.3 Types et structures des LEDs

Différents types de LED peuvent être considérés comme des candidats potentiels pour la VLC.

- **LED blanche**

La LED blanche est le type de LED le plus fréquemment employé pour l'éclairage général. Elle est composée d'une puce LED bleue recouverte d'un phosphore jaune qui absorbe une partie des photons bleus et réémet des photons jaunes, comme illustré dans la figure I.4. Les photons jaunes se combinent directement avec les photons bleus afin de générer de la lumière blanche. Toutefois, en raison de la lenteur de relaxation du phosphore, la plage de modulation est restreinte à quelques MHz.

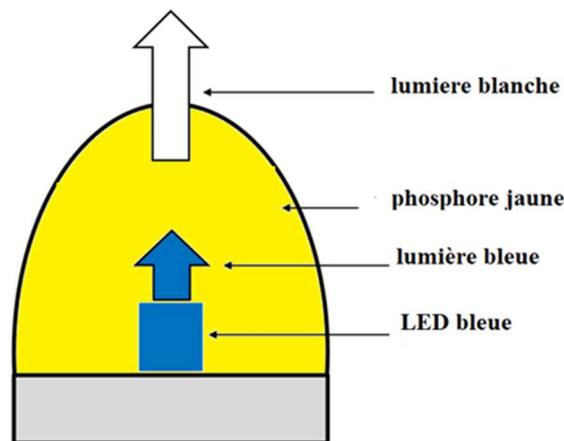


Figure I. 4 : Principe d'une LED blanche à base de phosphore.

- **LED rouge-vert-bleu (LED RVB)**

La LED RVB est un autre type de LED utilisé pour l'éclairage intérieur, qui est constitué de trois matrices de LED, offrant ainsi une plus grande souplesse dans le réglage des couleurs.

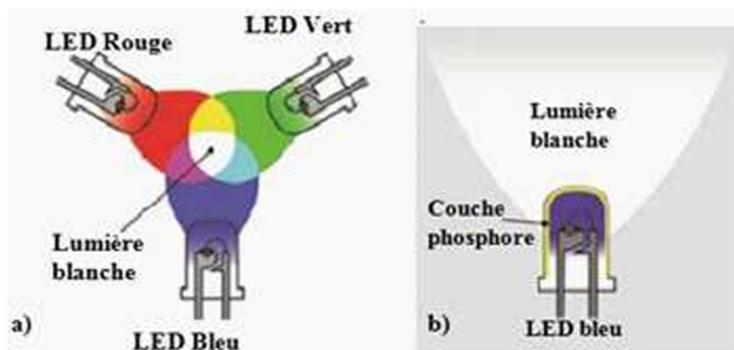


Figure I.5 : Génération d'une lumière blanche avec : (a) une LED rouge-vert-bleu, (b) une LED bleue avec phosphore [10]

Au cours des dernières années, les LED RVB ont été très intéressantes dans le domaine de la VLC : l'absence de couche de phosphore permet à ces LED d'avoir une largeur de bande de modulation d'environ 10 MHz. De plus, on a expérimentalement mis en place des liaisons VLC à haut débit en utilisant la technique du multiplexage en longueur d'onde (WDM), qui implique de moduler indépendamment les trois sources LED afin d'augmenter le débit [6 - 9].

• LED organique (OLED)

Des études récentes ont également examiné l'opportunité des OLED pour VLC. Ce genre de LED est fabriqué à partir de matériaux organiques et est initialement destiné aux technologies d'affichage, où ils émettent une lumière blanche similairement à celle des LED RVB. Les OLED présentent l'avantage de pouvoir être utilisés sous la forme d'une unité de grande surface, c'est-à-dire un grand panneau, à un coût très abordable. De cette manière, les luminaires utilisant les OLED peuvent offrir une grande efficacité énergétique, ce qui permet d'offrir un éclairage adéquat pour satisfaire les besoins d'éclairage [11,12 ,13]. Ainsi, la littérature rapporte que les débits de données obtenus ne dépassent pas quelques Mbps [14 - 17].

• Diode laser (LD)

Les LD ont récemment suscité un vif intérêt pour leur possibilité d'utilisation dans VLC, car ils ont une bande passante de modulation plus élevée dans la gamme GHz par rapport aux LED. La lumière blanche peut être produite de la même façon qu'avec les LED, soit en plaçant un film de phosphore jaune devant un LD de lumière bleue, soit en combinant des faisceaux lumineux rouge, vert et bleu produits par trois LD différents, même si des débits de données très élevés de plusieurs dizaines de Gbps ont été rapportés dans la littérature [18,19]. Les LD sont encore peu couramment employés dans VLC en raison de leurs désavantages par rapport à la fonction d'éclairage concurrente. Un faisceau lumineux étroit très intense est émis par un LD, ce qui suscite des préoccupations quant à la sécurité des yeux et à une luminosité homogène. Par conséquent, il est nécessaire d'inclure un diffuseur recouvert de phosphore afin d'élargir le spectre et de faire diverger spatialement une lumière laser bleue, même si cela entraîne une diminution significative du débit [20,21]. La mise en place d'un diffuseur permet de réduire la contrainte de puissance de lancement à l'émetteur imposée par les règles de sécurité oculaire, mais elle demeure restreinte par rapport aux LED [22]. Il en découle que ces derniers conviennent mieux à l'éclairage intérieur et ne peuvent être exploités pleinement que si des composants électroniques à large bande passante, tels

que des amplificateurs et des photodétecteurs, sont employés, ce qui entraîne une augmentation du coût du système et pourrait compromettre la viabilité d'un produit industriel. Étant donné que le débit de transmission des données est généralement perçu comme le critère le plus crucial pour évaluer les performances d'un système de communication. Les VLC à base de LED ont connu une nette augmentation du débit de transmission de données au cours des deux dernières décennies, passant de quelques Mbps à plusieurs dizaines de Gbps. Selon le type de LED utilisé, on peut trouver un résumé des divers systèmes VLC déjà démontrés dans les tableaux 2 à 4 [23].

Année	Emetteur	Récepteur	Modulation	Distance	Débit de données
2020	LED blanche	PIN	DMT	1 m	3 Gbps
2018	LED blanche	APD	OOK	1.2 m	2 Mbps
2015	LED blanche	PIN	OFDM	1.5 m	2 Gbps
2015	LED blanche	PIN	OFDM	1 m	1.6 Gbps

Tab I.2: Liaisons VLC basées sur des LED blanches à base de phosphore

Année	Emetteur	Récepteur	Modulation	Distance	Débit de données
2019	RGBY LEDs	PIN	OFDM	1.6 m	15.73 Gbps
2019	RGBY LEDs	PIN	DMT	1.2 m	15.17 Mbps
2017	RGB LEDs	PIN	OFDM	1 m	3.36 Gbps

Tab I.3: Liaisons VLC basées sur des LED multi-puces .

Année	Emetteur	Récepteur	Modulation	Distance	Débit de données
2020	OLED	APS	OFDM	2 m	1.13 Gbps
2020	OLED	PIN	OOK	0.05 m	2.2 Mbps
2015	OLED	Organic-PD	OOK	0.05 m	55 Mbps

Tab I.4: Liaisons VLC à base de LED organique (OLED)

I.6.1.4 Mode de rayonnement

Les systèmes de communication par lumière visible peuvent utiliser différents modèles de rayonnement, tels que le modèle purement diffus, les modèles expérimentaux et le modèle d'émetteur Luxon Rebel de Lumileds Philips. Le modèle Lambertien généralisé est cependant le modèle le plus fréquemment employé dans les environnements de communication en intérieur (Indoor) [21].

Ce modèle offre la possibilité de représenter des émetteurs diffus et directifs qui présentent une symétrie uni-axiale autour de la normale.

Dans un schéma Lambertien, l'intensité lumineuse émise par unité d'angle solide est calculée. ($mW.sr^{-1}$)

$$I_e(\varphi) = I_0 \cos^m(\varphi) \quad \text{I.1}$$

Ou : φ est l'angle d'irradiance par rapport à la normale à la source.

I_0 ($mW.sr^{-1}$) est l'intensité maximale pour $\varphi = 0$.

Le nombre m représente l'ordre Lambertien de la directivité. Il dépend de l'angle à mi-puissance $\varphi_{1/2}$ correspondant à l'angle pour lequel on a la moitié de l'intensité rayonnée. Il est relié à $\varphi_{1/2}$ par :

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\varphi_{1/2}))} \quad \text{I.2}$$

On observe que plus la valeur de m est grande, plus la directivité de la source est importante, et inversement. Par exemple, pour $\varphi_{1/2} = 60^\circ$ on a $m=1$ alors que pour $\varphi_{1/2} = 10^\circ$ on a $m=45$.

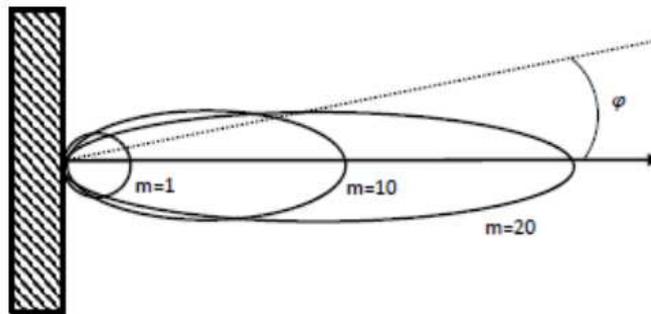


Figure I.6 : Illustration de l'ordre de rayonnement m d'une source LED

I.6.2 Récepteur VLC

La photodiode transforme la puissance optique reçue en un signal électrique au niveau du récepteur, qui est amplifié, démodulé et décodé par un amplificateur transimpédance (TIA, Transimpedance Amplifier) puis un filtre passe-bas (LPF). L'ADC (Analog to Digital Convertor) est un dispositif qui permet de convertir le signal du courant analogique en un signal numérique pour récupérer les bits du message de l'utilisateur [15]. En raison de leur petite taille, de leur sensibilité élevée et de leur réponse rapide, les photodiodes sont les appareils les plus couramment employés comme photodétecteur [16]. Deux catégories de photodiodes sont disponibles : les photodiodes PIN (Positive Intrinsic Negative) et les photodiodes à avalanche (APD). Les photodiodes PIN sont les plus répandues car elles sont plus linéaires et moins chères que les photodiodes PIN.

I.6.2.1 Les Caractéristiques d'une photodiode (PD)

Le composant le plus couramment employé pour transformer un signal optique en un signal électrique est la photodiode PIN. Il s'agit d'un semi-conducteur traditionnellement inversement polarisé. La puissance optique est alors convertie en courant électrique grâce à la détection du flux de photons qui se déplacent sur la surface du composant [14]. La caractéristique principale de la photodiode est sa sensibilité et le courant établi dans la photodiode, comme indiqué dans l'expression suivante :

$$i_{ph} = R \cdot p + i_{obs} \quad \text{I.3}$$

La puissance optique est représentée par P, la sensibilité de la PD est représentée par R, et le courant d'obscurité qui circule dans la jonction en l'absence d'éclairage est appelé i_{obs} . Il est issu à la fois de courants de fuite et de génération thermique, et il augmente avec la température et la tension de polarisation [17].

Par ailleurs, la concentration des rayons recueillis dépend de deux éléments essentiels pour les performances de la PD : le schéma de rayonnement et la surface physique A. Chaque rayon incident qui se présente à un angle spécifique sera atténué de manière différente. Considérons l'angle du rayon incident par rapport à la normale à la surface, ce qui permet d'exprimer la surface effective de collecte comme suit [21] :

$$A_{eff} = \begin{cases} A \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq FoV \\ 0 & \psi \geq FoV \end{cases} \quad \text{I.4}$$

Où FoV (« field of view ») représente le champ de vision du récepteur (semi-angle). Celui-ci peut dépendre d'éventuels concentrateurs optiques.

Le gain du concentrateur optique au niveau du récepteur est défini par [21] :

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_{con}} & 0 \leq \psi \leq \psi_{con} \\ 0 & \psi \geq \psi_{con} \end{cases} \quad \text{I.5}$$

Où n est l'indice de réfraction, et ψ_{con} est le FoV.

I.6.3 Canal de transmission

En général, il existe deux types de liaisons VLC. L'une est une liaison point à point et l'autre est une liaison de diffusion. Les détails du canal de transmission seront présentés dans le chapitre suivant.

I.7 Les modulations associées aux communications VLC

On retrouve différentes méthodes de modulation liées aux VLC.

I.7.1 La Modulation OOK

Il s'agit d'une méthode de modulation simple où le « 1 » numérique est représenté par la présence du signal, ou l'état « ON », tandis que la donnée « 0 » est représentée par un signal de valeur nulle, ou l'état « Off ». Le « On » et le « Off » sont deux niveaux d'amplitude différents, indispensables à la communication, et ne signifient pas forcément que la source de lumière soit totalement éteinte [23].

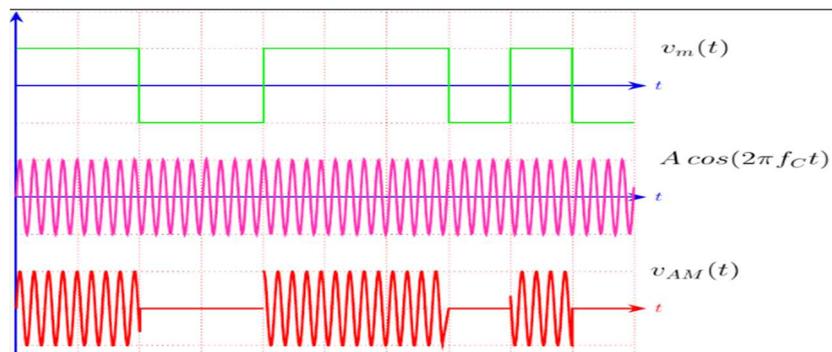


Figure I.7: Modulation OOK

I.7.2 La modulation VPPM

La modulation VPPM est une version de la modulation de position de pulse (PPM), conçue pour les communications VLC. En modulation PPM, la position de l'impulsion dans le temps est utilisée pour représenter l'information. Dans la variante VPPM, on peut également observer la modification de la largeur d'impulsion (PWM, Modulation de la largeur d'impulsion) en fonction du niveau d'intensité lumineuse (Figure I.8). C'est une modulation Manchester OOK à laquelle un rapport cyclique variable est appliqué. Les problèmes de scintillement peuvent être résolus grâce à la modulation VPPM, qui élimine les longues suites de symboles « 0 » et permet de contrôler l'intensité lumineuse [24].

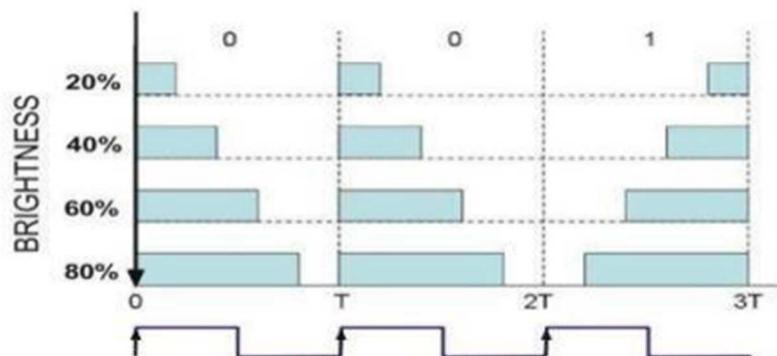


Figure I.8: Modulation VPPM .

I.7.3 La modulation OFDM

Pour les applications à haut débit, les problèmes de limitation de la bande passante des sources et de génération de l'IES (Interférence Entre Symboles) se présentent rapidement. Pour répondre au mieux à ces problèmes, il est possible d'utiliser une modulation de type OFDM (multiplexage de division de fréquence orthogonale). Cette modulation repose sur le principe selon lequel les données sont transmises sur plusieurs canaux simultanément en utilisant différentes sous-porteuses. Par conséquent, la durée de chaque symbole correspondant à chaque sous-porteuse est considérablement supérieure à celle de son équivalent pour une porteuse unique, ce qui permet de réduire considérablement l'impact de l'IES tout en optimisant la bande passante. La mise en place d'un temps de garde permet aussi de réduire l'interférence entre les sous-porteuses. L'avantage majeur réside donc dans la possibilité de réaliser une égalisation très simple lors de la réception [25].

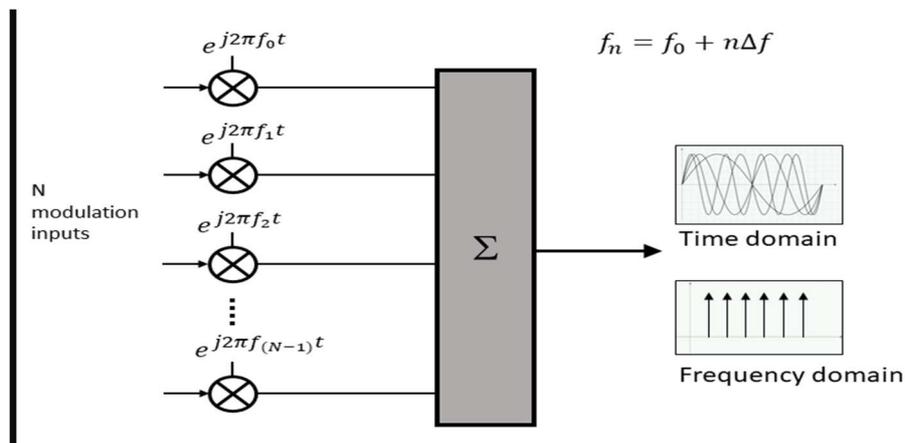


Figure I.9: Modulation OFDM

I.7.4 La modulation CSK (Color shift keying)

Comme la modulation VPPM, la modulation CSK «Color Shift-Keying» est propre aux VLC. La norme IEEE 802.15.7 a été suggérée afin d'améliorer le débit de données qui était limité dans d'autres types de modulation. En utilisant du phosphore jaune et des LEDs bleues, on ralentit la capacité de commutation en produisant une lumière blanche (voir Figure I.10). Ainsi, une autre méthode pour générer de la lumière blanche est d'utiliser trois LEDs différents, à savoir le vert, le bleu et le rouge. On la détermine principalement en fonction de l'intensité des trois couleurs d'une source LED RGB (Red Green Blue). Selon le diagramme de chromaticité de l'espace colorimétrique, la modulation CSK est influencée. Les sept bandes de longueur d'onde visibles par l'œil décrites dans le Tableau I.5 sont représentées dans la Figure I.10, avec leurs centres représentés sur le diagramme [25].

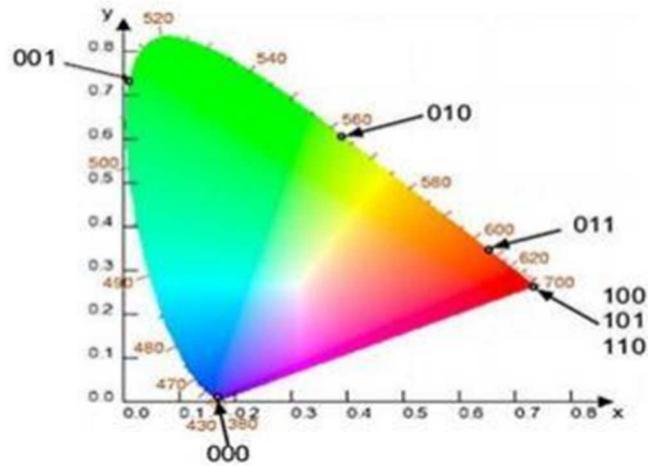


Figure I.10: Modulation CSK

Band (nm)	Code	Center (nm)	(x,y)
380-478	000	429	(0.169, 0.007)
478-540	001	509	(0.011, 0.733)
540-588	010	564	(0.402, 0.597)
588-633	011	611	(0.669,0.331)
633-679	100	656	(0.729, 0.271)
679-726	101	703	(0.734, 0.265)
726-780	110	753	(0.734, 0.265)

Tab I.6: Modulation CSK

I.8 Les domaines d'application de VLC

Grâce aux bénéfices de cette technologie, de nombreuses utilisations sont réalisées dans divers secteurs. Il arrive parfois qu'elle soit la seule option et parfois une solution supplémentaire pour la communication radiofréquence. Voici certaines de ses utilisations :

I.8.1 Systèmes VLC Indoor

- **Dans le domaine de l'aviation :** il est interdit aux passagers d'utiliser des ondes radio. Cependant, les cabines d'aéronefs sont déjà équipées d'éclairages à base de LED, et chacun de ces éclairages pourrait être un émetteur VLC potentiel qui offre à la fois des services d'éclairage et des services multimédias aux passagers. En outre, cela permettra de diminuer les dépenses de construction de l'avion et son poids [3].



Figure I.11 : Illustration de la communication VLC à bord d'un avion

- **Localisation** : Grâce à ses multiples bénéfices, la technologie VLC présente une solution prometteuse pour résoudre le problème de la localisation et de la navigation intérieure. Actuellement, les techniques traditionnelles de triangulation, de trilatération ou de finger-printing liées aux VLC permettent d'obtenir des précisions de localisation d'environ un centimètre.

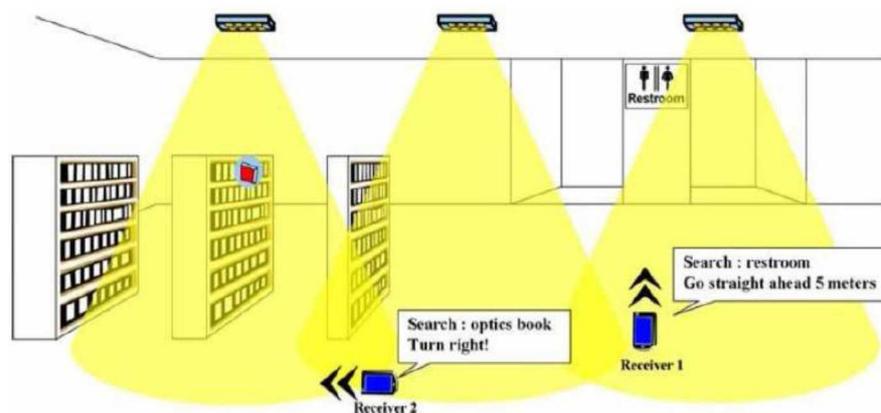


Figure I.12 : Utilisation du VLC pour la localisation intérieure [26]

- **Secteur médical** : Étant donné que les ondes optiques ne perturbent pas les appareils à radiofréquence RF, le VLC peut être utilisé en toute sécurité dans de multiples situations médicales. Par exemple, en utilisant la technologie VLC dans les couloirs, les salles d'attente, les chambres de patients et les blocs opératoires, il sera possible d'établir un réseau de communication léger, ce qui permettra de résoudre les problèmes d'interférences électromagnétiques causés par les smartphones et l'utilisation du Wi-Fi dans les hôpitaux. Il est également

possible d'utiliser un réseau VLC pour surveiller en temps réel et transmettre les mouvements et les signes vitaux du patient sans nécessiter de câbles [3].



Figure I.13 : Illustration de la communication VLC à bord d'un hôpital

- **Les zones dangereuses** : Les industries comme les usines pétrochimiques et les mines sont vulnérables en raison du risque d'explosion, ce qui rend la communication complexe. Toutefois, l'utilisation de la technologie VLC constitue une solution envisageable car elle permet non seulement de communiquer, mais aussi d'éclairer, sans risque de fréquences radio [3].

- **Transmission de données (Li-Fi) :**

Le Li-Fi (Light-Fidelity) est l'une des principales applications du VLC. Grâce aux grandes capacités de bande passante, la VLC permet d'accéder à Internet à haut débit à partir des LEDs installés au plafond. Ce logiciel convient mieux aux petites distances (distance entre le plafond et le bureau) [23].



Figure I.14 : Système d'éclairage intelligent compatible avec VLC

I.8.2 Systèmes VLC Outdoor

• **Communications V2V:** pourrait être extrêmement bénéfique dans les systèmes de transport intelligent (STI). Afin de faciliter la communication entre les véhicules (V2V) et les infrastructures (I2V), il est possible de transmettre les informations à la voiture avant grâce au phare et à la voiture derrière grâce aux feux rouges. Les informations se répandent donc sur l'autoroute. Un exemple est illustré dans la Figure I.15 [27].

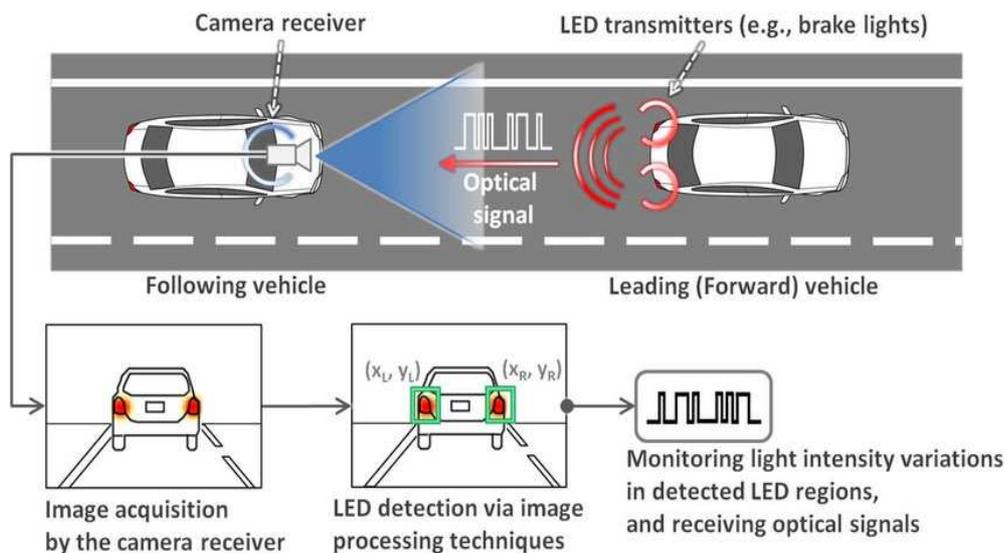


Figure I.15 : Communication de véhicule-véhicule (V2V) [27]

• **Communications sous-marines :** VLC est capable de supporter des débits de données élevés sous l'eau, ce qui est impossible avec d'autres technologies sans fil telles que les RF. Il est donc envisageable d'établir des communications entre les plongeurs ou les véhicules télécommandés [28].

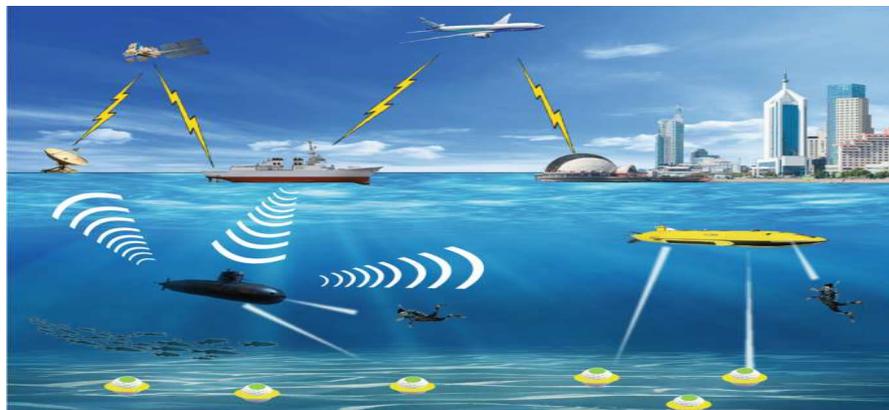


Figure I.16 : Illustration du VLC dans la communication sous-marine [28]

I.9 Conclusion

Les principes fondamentaux des communications par lumière visible VLC sont décrits dans ce chapitre. De plus, les avantages et les contraintes et les limites de cette technologie innovante ont été mis en évidence. On a abordé également l'architecture et les divers éléments liée à la technologie VLC. On a exposé également les méthodes de modulation utilisées dans les standards publiés pour les communications optiques sans fil, ainsi les divers domaines d'applications tels que les systèmes VLC Indoor et les systèmes VLC Indoor.

Chapitre II :

Modélisation du canal VLC

II.1 Introduction

Au cours des dernières années, les activités de recherche sur la communication de la lumière visible (VLC) ont connu une croissance notable dans les universités et l'industrie. La montée en puissance de l'intérêt pour cette technologie a entraîné de nombreuses études et actions de recherche [1-8]. Comme dans tout système de communication sans fil, les performances d'un système VLC sont grandement déterminées par les caractéristiques du canal de propagation et de l'extrémité avant émetteur/récepteur. Il est donc crucial d'avoir des modèles de canaux précis afin de planifier, évaluer et tester de manière adéquate les systèmes VLC. Dans ce chapitre, notre attention sera portée sur les modèles de canaux de propagation utilisés dans les systèmes VLC.

II.2 Canal VLC

II.2.1 Topologies

Il existe différentes configurations pour créer un lien de communication VLC entre un émetteur et un récepteur. Dans le cas où l'éclairage intérieur (Indoor) est considéré comme une caractéristique essentielle du système VLC, deux configurations sont fréquemment utilisées dans les environnements intérieurs et largement étudiées dans VLC : les liaisons de visibilité entre l'émetteur et le récepteur : directes et/ou indirectes (LOS ; line of sight ou NLOS ; non line of sight).

Les classifications de configuration de liaison mentionnées ci-dessus sont les suivantes : illustrées à la figure II.1 [9].

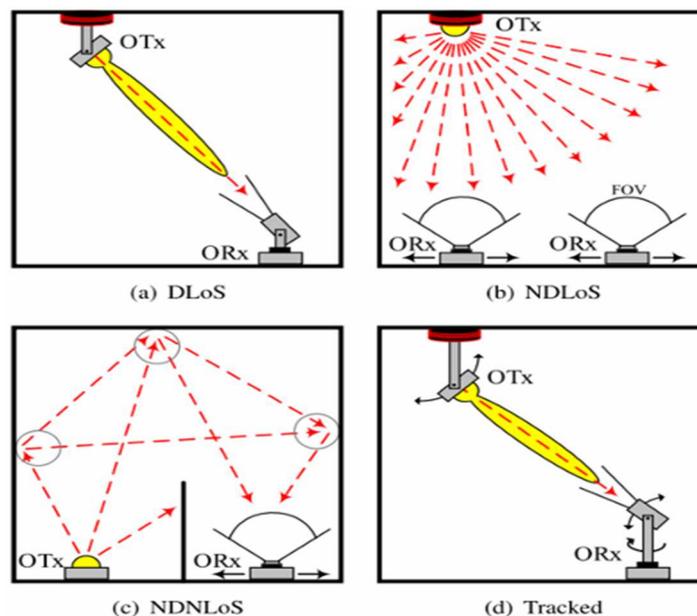


Figure II.1. Modèles de canal VLC

- **Liaison LOS directionnelle (DLoS) :** Cette liaison est appelée «line of sight » (LOS) lorsque l'émetteur et le récepteur sont reliés par un lien direct [10]. Les connexions LOS présentent les meilleures performances en ce qui concerne le gain visibilité. Cependant, il est compliqué d'assurer un alignement constant des deux systèmes en cas de mouvements. En outre, une configuration de LOS entraîne une réduction de la zone de couverture et une grande sensibilité aux blocages dès qu'un obstacle se présente entre l'émetteur et le récepteur.

- **Liaison LOS non-directionnelle (NDLoS) :** Les liens de ligne de vision non directionnelle (NDLoS), aussi appelés liens LoS larges [11]. Les liens optiques diffus établissent une connexion entre l'émetteur et le récepteur en utilisant au moins une réflexion sur une paroi de l'environnement intérieur. Ils utilisent des angles d'ouverture élevés pour l'émetteur et un large FoV pour le récepteur. Cette topologie présente une plus grande résistance aux phénomènes de blocage que les liens LOS. Grâce à ces connexions, il est possible d'obtenir un niveau de mobilité élevé tout en réduisant la réduction de puissance optique reçue [12].

- **Liaison non LOS non-directionnelle (NDNLoS) :** La conception de la liaison NDNLoS ne requiert pas de connexion LoS entre l'émetteur et le récepteur. Dans cette configuration, un émetteur à large divergence de faisceau est dirigé vers le plafond et les réflexions diffuses du plafond, des murs et des objets sont utilisés pour établir un lien avec un large récepteur FoV qui est également situé face au plafond. Ce lien de diffusion maintient une connexion constante entre l'émetteur et le récepteur, ce qui permet aux utilisateurs de se déplacer facilement et de s'assurer de la résistance contre la perte de lien causée par le blocage [13].

- **Liaison Tracked (de suivi) :** Les systèmes de suivi peuvent être intégrés dans des émetteurs-récepteurs montés au plafond, des terminaux mobiles ou les deux. Le mécanisme de suivi est réalisé à travers trois composants principaux : une unité d'acquisition pour détecter de nouvelles stations mobiles dans une zone spécifique, une unité de suivi pour suivre la station mobile, et une unité de pointage pour diriger le faisceau optique vers la station mobile. Cela permet au faisceau optique d'être placé parallèlement ou sur la station mobile, maintenant ainsi la connexion même lorsque l'utilisateur est en mouvement [9].

II.2.2 Modélisation d'un canal VLC

La majorité des systèmes optiques sans fil utilisent la modulation d'intensité et la détection directe, communément appelés Intensité Modulation/Direct Détection (IM/DD). L'information n'est pas transmise par la fréquence ou la phase dans un système IM/DD, mais

par l'intensité du signal optique. Une LED effectue la conversion entre le signal électrique et l'intensité optique $x(t)$. On propage alors l'onde optique sur le canal optique sans fil. Lors de la réception, il faut effectuer la conversion inverse afin de revenir au domaine électrique. La photodiode (PD) est chargée de cette fonction. La photodiode effectue une détection directe, c'est-à-dire qu'elle génère un courant photoélectrique $y(t)$ qui est proportionnel à l'intensité optique reçue. Le principal objectif du récepteur est de saisir l'information présente dans $x(t)$ à partir du signal reçu $y(t)$ [12]. Un modèle simplifié d'une liaison optique sans fil IM/DD, en particulier le VLC, est présenté dans la figure II.2.

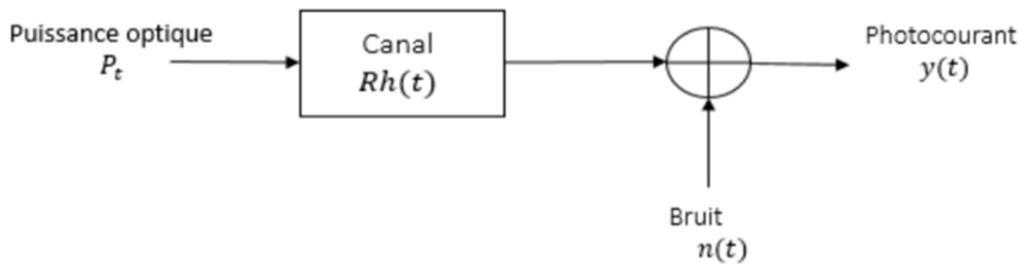


Figure II.2 : Modèle équivalent en bande de base d'un système optique sans fil IM/DD.

Malgré les conséquences d'évanouissement des liaisons OWC indoor causées par les trajets, elles présentent également des effets de dispersion, qui se traduisent pratiquement par des interférences entre les symboles. Le modèle de cette dispersion est représenté par le canal en bande de base linéaire de la réponse impulsionnelle $h(t)$. En mathématiques, ce modèle peut être représenté par :

$$y(t) = R(h(t) \otimes P_t) + n(t) \quad (\text{II.1})$$

Le symbole \otimes représente la convolution, les puissances optiques P_t des symboles à l'entrée du canal, la sensibilité de la photodiode R et le signal du bruit $n(t)$ indépendant du signal utile. La fonction $h(t)$ correspond à la réponse impulsionnelle du canal, dont l'expression varie en fonction de la configuration du système.

Note : La sensibilité de la photodiode (R) est le rapport entre le courant en sortie et la puissance optique d'entrée.

Il est nécessaire de limiter la puissance maximale optique transmise admissible afin de garantir la sécurité de la vision humaine. La puissance P_{max} maximale est de :

$$P_{max} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T X(t) d(t) \quad (\text{II.2})$$

Lors de l'analyse, on limite la puissance moyenne afin de ne pas dépasser P_{max} [14].

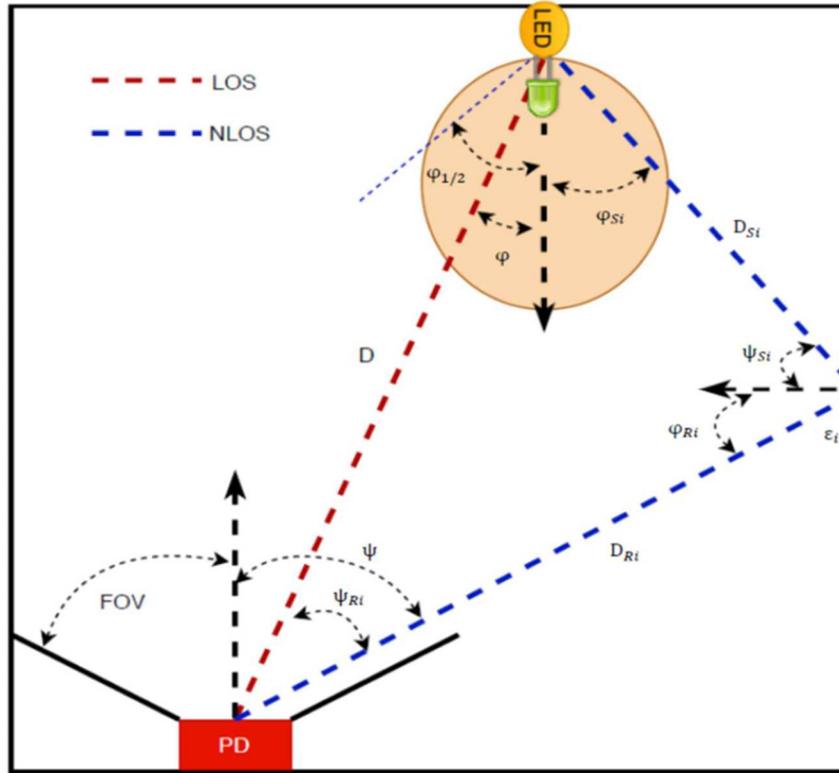


Figure II.3 : Illustration des paramètres des modèles LOS et NLOS [10]

II.2.3 La réponse impulsionnelle $h(t)$

La réponse impulsionnelle du canal correspond à l'évolution du signal reçu au fil du temps lorsque l'émetteur lance une quantité infinie de lumière [15]. Il offre des renseignements exhaustifs sur les caractéristiques du canal [16]. Les dispositions spécifiques de l'émetteur, du récepteur et de tout réflecteur impliqué influencent la réponse impulsionnelle du canal [17].

En mathématiques, la réponse impulsionnelle totale du canal au temps t pour une source lumineuse spécifique S et un récepteur R est la somme des réponses de LOS et de toutes les réflexions des liaisons NLOS (figure II.3), et peut être représentée de la manière suivante [18, 19, 20]:

$$h(t, S, R) = \sum_{k=0}^{\infty} h^{(k)}(t, S, R) \quad (\text{II.3})$$

Où $h^{(0)}(t, S, R)$ est la réponse LOS, $h^{(k)}(t, S, R)$ est la réponse de la lumière subissant k réflexions.

L'impulsion LoS peut être décrite de la manière suivante [21] :

$$h^{(0)}(t, S, R) = \frac{1}{(d)^2} S(\Phi, \mathbf{m}, \lambda) A_{eff}(\psi) \delta(t - \frac{d}{c}) \quad (\text{II.4})$$

La puissance de rayonnement de l'émetteur en fonction de la longueur d'onde (λ) est représentée par $S(\Phi, m, \lambda)$, δ est une fonction delta de Dirac, m est le numéro de mode de lobe de radiation, d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, C c'est la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s), $A_{\text{eff}}(\psi)$ est la zone de réception effective et ψ est l'angle d'incidence.

En tenant compte d'un modèle Lambertien, la réponse impulsionnelle $h(t)$ pour le trajet LOS est une impulsion de Dirac donnée par la fonction suivante [10] :

$$h(t)_{\text{Los}} = \begin{cases} \frac{A(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\Phi) \cos(\psi) \delta\left(t - \frac{D}{c}\right) & 0 \leq \psi \leq \text{FoV} \\ 0 & \psi \geq \text{FoV} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Où D est la distance entre l'émetteur et le récepteur, φ et ψ sont respectivement les angles d'irradiante et d'incidence des rayons optiques.

La réponse impulsionnelle $h(t)_{\text{NLOS}}$ peut être définie pour une réflexion sur une surface Lambertienne, en tenant compte de toutes les contributions de la première réflexion sur les éléments réfléchissants de l'environnement :

$$h(t)_{\text{Nlos}} = \begin{cases} \sum_{\epsilon i} \Delta A \rho_i \frac{(m+1)}{2\pi d_{si}^2 d_{ri}^2} \cos^m(\Phi) \cos(\Phi_{RI}) \cos(\psi_{si}) \cos(\psi) \delta\left(t - \frac{D_{si} + D_{ri}}{c}\right) & , 0 \leq \psi \leq \text{FoV} \\ 0 & , \psi \geq \text{FoV} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Où ρ_j est la réflectivité de l'élément de surface de taille ΔA .

II.2.4 Gain statique

Le gain statique $H(0)$ du canal en courant continu (DC) est l'une des principales caractéristiques d'un système VLC. Il renvoie le rapport signal/bruit réalisable pour une puissance d'émetteur fixe. En se basant sur la réponse impulsionnelle du canal, le gain statique $H(0)$ du canal optique VLC peut être défini de la manière suivante [22] :

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (\text{II.7})$$

En règle générale, on utilise la valeur $H(0)$ canal afin de détecter les pertes dans le canal, qui combine la puissance optique moyenne reçue P_r avec celle émise P_t , de la manière suivante [23] :

$$P_r = H(0) P_t \quad (\text{II.8})$$

Si l'émetteur est représenté par le modèle Lambertien généralisé dans un canal LOS, on peut obtenir $H(0)$ en utilisant [10] :

$$H(0) \begin{cases} \frac{(m+1)A_{PD}}{2\pi d^2} \cos^m(\Phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & 0 \geq \psi_c \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

La surface de la photodiode (PD) est indiquée par A_{PD} , l'ordre de mode Lambertien est m , l'angle d'incidence au PD est ψ , le FoV (Field of View) à semi-angle du récepteur est ψ_c , l'angle d'irradiance est Φ et la distance entre les LED et le récepteur est d . En outre, $TS(\psi)$ correspond au gain du filtre optique tandis que $g(\psi)$ correspond au gain du concentrateur optique.

II.2.5 La réponse fréquentielle $H(f)$

La réponse de fréquence du canal $H(f)$ représente le comportement du canal en fonction des divers composants de fréquences du signal. On calcule cela en utilisant la transformation de Fourier de la réponse d'impulsion calculée $h(t)$ [24], qui demeure constante pour une pièce spécifique et les positions et configurations de l'émetteur/récepteur.

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp^{-j2\pi ft} \quad (\text{II.10})$$

En pratique, la réponse fréquentielle à -3 dB du canal optique peut être obtenue comme suit [25, 26, 27]:

$$|H(f_{-3dB})|^2 = 0.5 |H(0)|^2 \quad (\text{II.11})$$

En général, on calcule et définit la bande passante de 3 dB comme la fréquence à laquelle l'amplitude de $20\log_{10} H(\pi)$ diminue de 3dB par rapport à celle de la fréquence zéro ou de la composante de charge [19].

II.3 Les sources de bruits

En ce qui concerne les communications VLC, il y a de multiples sources de son. Il est possible qu'elles soient causées par le canal optique, telles que le bruit optique ambiant provenant de sources externes, ou bien produites localement par le récepteur (principalement liées au bruit thermique).

II.3.1 Bruit de courant d'obscurité

Une petite quantité de courant est toujours présente à la sortie de la photodiode, même sans lumière incidente. On désigne ce courant sous le nom de courant d'obscurité et il ne renferme traditionnellement aucune information précieuse. La polarisation inverse entraîne la circulation d'un petit courant de saturation inverse dans le dispositif. La variation du courant est principalement influencée par des éléments tels que la température, la tension de polarisation et le matériau utilisé. De manière générale, le courant d'obscurité varie de 100 pA pour la photodiode Si PIN et de 10 pA pour la photodiode Si APD, respectivement [28].

II.3.2 Bruit ambiant

L'un des principaux obstacles dans le domaine des systèmes VLC est le bruit optique ambiant. Les perturbations de ce bruit proviennent de sources lumineuses autres que le système de transmission présentes dans l'environnement. Ainsi, la photodiode présente dans le récepteur a la capacité de repérer la lumière errante en plus du signal essentiel. On peut observer ce phénomène dans la figure II.4 [29], où nous constatons que, pour les longueurs d'onde visibles, les principales sources de bruit optique sont le soleil et les sources artificielles comme les lampes incandescentes ou fluorescentes. Quand on s'éloigne de l'infrarouge, on remarque que le bruit produit par les lampes fluorescentes est nul.

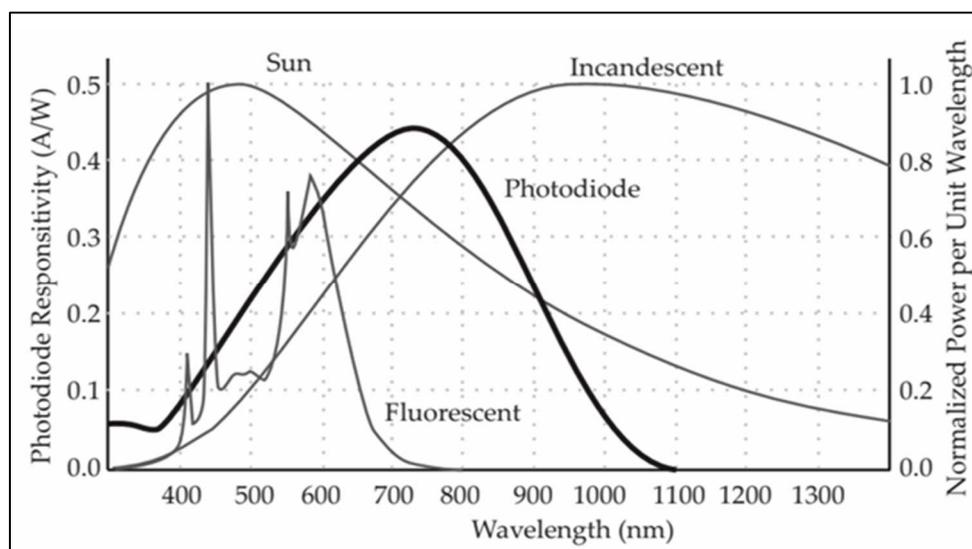


Figure II.4: Spectres de puissance optique des différentes sources courantes de bruit

- **La lumière du soleil :**

La lumière du jour, également connue sous le nom de lumière solaire, présente une large plage spectrale, avec une densité de puissance maximale à environ 500 nm (Figure II.4). Ce type d'interférence ambiante est particulièrement sensible aux liaisons optiques sans fil qui opèrent entre 400 nm et 750 nm. Ce bruit ambiant dépend principalement de l'angle d'incidence des rayons solaires par rapport au photodétecteur. La lumière du soleil peut être particulièrement désagréable pour les terminaux situés près des fenêtres, ce qui peut entraîner une saturation potentielle de la liaison optique sans fil. Malgré leur capacité à réduire ce problème, les filtres passe-bande du récepteur demeurent largement inefficaces en raison de leur large plage spectrale et de leur intensité permanente.

- **Lampes à énergie électrique :**

Outre la lumière naturelle, les lampes à incandescence ou à filament de tungstène constituent une source artificielle de bruit ambiant susceptible d'influencer les communications en optique sans fil. Le spectre de ce genre de source est extrêmement vaste, s'étendant sur les longueurs d'onde du visible et du proche-IR, et atteignant un maximum à environ 1000 nm. Il est possible de réguler le bruit ambiant généré par les lampes à incandescence en utilisant sa source d'alimentation à courant alternatif (50/60 Hz). Il génère un courant photoélectrique à bande étroite dont la largeur est inférieure à 2 kHz. Dans la plupart des applications optiques sans fil, la bande passante du récepteur dépasse largement 2 kHz.

- **Les lampes fluorescentes à fréquence basse :**

Les lampes fluorescentes à basse fréquence, tout comme les lampes à incandescence, produisent généralement une lumière modulée à une fréquence d'alimentation de 50/60 Hz. Les lampes fluorescentes à basse fréquence présentent une bande passante totale de photo courant à la réception, allant jusqu'à 20 kHz. D'après la figure II.4, il est évident que la répartition spectrale de la puissance du bruit pour ce type de lampe se répartit sur la plage de longueurs d'onde allant de 700 nm à 1100 nm. Afin de diminuer l'influence de ce genre de bruit, il est essentiel d'utiliser une combinaison de filtres optiques et de filtres électriques/numériques passe-haut.

- **Un autre type de lampes fluorescentes :**

Ce genre de lampe produit un signal périodique par rapport à son équivalent en basse fréquence, ce qui permet de diminuer la consommation électrique et d'améliorer l'espérance de vie du produit. Les lampes fluorescentes à haute fréquence ont une fréquence de commutation variable d'un fabricant à l'autre, mais se situent généralement entre 20 kHz et 40 kHz. Outre les harmoniques causées par le réseau d'alimentation, similaires à celles des lampes fluorescentes à basse fréquence, les lampes fluorescentes à haute fréquence renferment des harmoniques plus significatives, connues sous le nom de bruit périodique, provenant de la fréquence de commutation. Il est possible que ces harmoniques se prolongent dans la plage du MHz, ce qui restreint l'efficacité du filtrage et entraîne une efficacité beaucoup plus élevée pour les utilisateurs.

II.3.3 Bruit de la photodiode

- **Le bruit quantique (Shot Noise) :**

De nombreux travaux précédents ont démontré que le courant I_b est introduit dans le photo-détecteur grâce à une induction.

On peut modéliser les divers types de bruit, connus sous le nom de « shot-noise » ou « photon-noise » en fonction de la nature quantique des photons qui arrivent de manière aléatoire au niveau du photo-détecteur, en utilisant un bruit blanc Gaussien AWGN, qui est proportionnel à la puissance optique moyenne reçue. Ce son est fréquemment désigné sous le nom de « bruit de l'appareil photo gaussien blanc ». Elle est représentée par:

$$\sigma_{shot}^2 = 2q(I_r + I_b)B \quad (\text{II.12})$$

- **Le bruit thermique :**

L'impact du bruit thermique sur les performances des systèmes optiques sans fil est important. Le bruit est nettement inférieur à celui de l'environnement et est causé par des effets thermiques sur le circuit électronique du récepteur. Effectivement, la capacité de polarisation du préamplificateur joue un rôle essentiel dans la production de bruit et l'intensité de l'impact diffère en fonction du type de préamplificateur employé. Même si le bruit thermique peut être négligé par la conception du circuit par rapport au bruit ambiant, il devient important à des débits de données élevés.

On l'appelle bruit blanc gaussien, avec une densité spectrale de puissance qui n'est pas liée à la fréquence. Elle peut être généralisée par [22] :

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{4KT_e B}{R_L} \quad (\text{II.13})$$

Où K est la constante de Boltzmann, T_e la température absolue du système, R_L la résistance équivalente du circuit.

La variance du bruit total est alors la somme de celles du bruit optique ambiant et du bruit thermique, tous deux correspondant à un bruit blanc gaussien [22] :

$$\sigma_{noise}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 \quad (\text{II.14})$$

II.3.4 SNR dans VLC

La qualité de la transmission sur un canal donné est évaluée par le rapport signal/bruit électrique (SNR) reçu dans VLC. Le SNR est défini comme le rapport entre la puissance

électrique moyenne du signal reçu et la puissance du bruit. Le SNR électrique est défini comme suit [30] :

$$SNR = \frac{R^2 P_r^2}{\sigma^2} = \frac{R^2 H_{DC}^2 P_t^2}{\sigma^2} \quad (\text{II.15})$$

Notons que le SNR électrique reçu est proportionnel au carré de la puissance optique reçue.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les principaux concepts et théories liés au canal sans fil optique, incluant les diverses situations de canal et les données statistiques. Le VLC a également ses propres contraintes et limites. La modélisation du canal de propagation est également traitée en lien avec la technologie VLC. Le but est de faire une analyse du canal en tenant compte des différents modèles et de repérer certains paramètres essentiels tels que la réponse impulsionnelle et fréquentielle, le gain et les sources de bruit. Ce chapitre offre une fondation solide pour comprendre le canal optique sans fil, qui joue un rôle essentiel dans la conception et l'évaluation des performances des systèmes VLC.

Chapitre III :

Résultats de la simulation

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter l'ensemble des résultats de simulation du système VLC pour les applications indoor (dans une pièce), en utilisant le logiciel OptiSystem. Dans cette étude, on suppose que l'utilisateur dispose d'un module de récepteur VLC à PD qui lui permet de communiquer avec un émetteur VLC à LED. L'émetteur est installé au plafond dans un cadre indoor (dans une pièce), alors que le récepteur est supposé placé aléatoire dans la pièce. Nous allons analyser la performance de la transmission des signaux numériques de type NRZ-OOK via une liaison VLC prenant en compte l'influence des paramètres de l'émetteur-récepteur et de leurs caractéristiques. Cette analyse est effectuée en termes de facteur de qualité Q, de BER, de diagramme de l'œil, du SNR, et de puissance reçue au niveau du récepteur. Tout d'abord, nous allons présenter les différentes caractéristiques du logiciel de simulation OptiSystem. Ensuite, on va donner une brève description des principaux critères de qualité. Par la suite, nous allons présenter l'architecture de la liaison VLC étudié et simulée, définir chaque bloc et expliquer son fonctionnement, ainsi que les paramètres de simulation associant. Enfin, nous allons décrire et discuter les résultats de la simulation.

III.2 Présentation du logiciel OptiSystem

OptiSystem est un logiciel développé par une entreprise canadienne appelée Optimale, qui se spécialise dans la conception, la simulation et l'analyse de systèmes de transmission optique. Ce programme offre la possibilité de simuler une telle liaison optique et d'améliorer la qualité de transmission [1].

III.2.1 Principales caractéristiques du logiciel OptiSystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- **Les composants virtuels de la bibliothèque** sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- **La bibliothèque de composants** Les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels peuvent être enregistrés, ces éléments s'intègrent aux équipements de test et de mesure de divers fournisseurs.
- **Les outils de visualisation avancée** Le signal sonore, les graphiques de l'œil, l'état de polarisation sont produits.

III.2.2 Applications du logiciel OptiSystem

Les applications les plus couramment utilisées d'OptiSystem sont les suivantes :

- Au niveau de la couche physique, le système de communication optique du composant est conçu.
- Le taux d'erreur binaire (BER ou TEB) et le bilan de liaison sont calculés.
- Élaboration des réseaux TDM/WDM et des réseaux optiques passifs (PON).
- La disponibilité d'espace pour les systèmes optiques.
- Le développement d'un émetteur de canal et d'un amplificateur.

III.2.3 Avantages du logiciel OptiSystem

Le logiciel OptiSystem présente plusieurs bénéfices :

- Donner une vision des performances du système de fibre optique.
- Offrir une possibilité d'accéder directement à des ensembles de données de description du système.
- Présentation en ligne des différentes possibilités de design.

III.3 Les principaux critères d'évaluation d'une transmission optique

Pour évaluer les performances d'un système de transmission, on utilise le facteur de qualité Q , le taux d'erreurs binaire TEB (BER) et le diagramme de l'œil qui sont des trois principaux critères de qualité.

III.3.1 Le diagramme de l'œil

Le schéma est un outil visuel performant pour évaluer la qualité du signal optique détecté au niveau du récepteur optique. La superposition synchrone de tout symbole binaire de la séquence transmise est représentée par le diagramme de l'œil. En revanche, lorsque le facteur de transmission Q est plus bas, le diagramme de l'œil obtenu est plus fermé. Lorsque la qualité du signal optique détecté est fiable, il est possible de détecter le signal sans erreur, ce qui entraîne une ouverture plus grande du diagramme de l'œil obtenu [2].

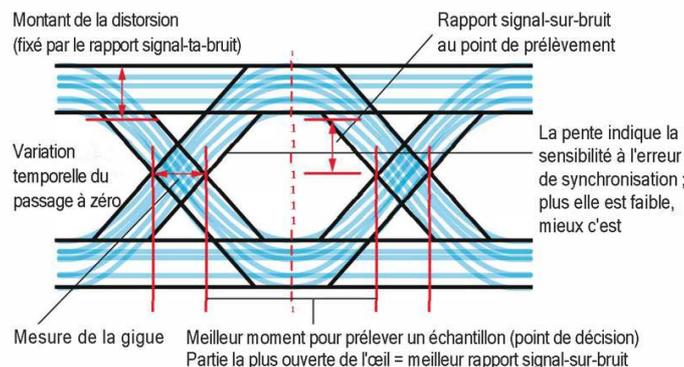


Figure III.1 : Diagramme de l'œil d'une transmission optique

III.3.2 Facteur de qualité Q

Le signal obtenu à l'entrée d'un analyseur de diagramme de l'œil comprend une contribution du signal "utile" ainsi qu'un apport de bruit provenant de tous les éléments de la liaison. Dans le schéma de l'œil qui représente le signal mesuré, les niveaux moyens μ_1 et μ_0 représentent le signal utile. Les déviations des puissances optiques autour de ces niveaux moyens sont représentées par le bruit, qui est mesuré en combinant les écarts-types μ_1 et μ_0 . Le facteur Q est donc défini à partir du relevé du diagramme de l'œil selon [2] :

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{III.1})$$

III.3.3 Taux d'erreur binaire (BER)

Le BER, également connu sous le nom de "Taux d'erreur en bit", est une mesure sans dimension qui permet d'évaluer les performances d'une communication numérique. Le BER correspond à l'écart entre le nombre d'erreurs et le nombre de bits transmis lors du calcul. Il est facile d'évaluer la qualité d'une transmission numérique en comparant la séquence des symboles envoyés à celle des symboles reçus, et en comptant les erreurs (nombre de fois où "0" est détecté pour un "1" émis ou vice-versa) [2].

$$BER = \frac{\text{nombre de bits errones}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (\text{III.2})$$

III.4 Présentation de l'architecture du système VLC

III.4.1 Schéma fonctionnel du système VLC

Le schéma fonctionnel simple de VLC utilise des LED comme source optique, un canal optique en espace libre comme un support et un photodétecteur au niveau du récepteur. Ainsi, dans le système VLC, il y a trois parties principales qui sont utiles pour concevoir un système parfait, adapté, fiable et convivial pour de nombreuses applications. La figure III.2 montre un schéma fonctionnel de base du système VLC. Ce schéma est utilisé pour construire le système VLC dans l'OptiSystem. Ainsi, les entrées fondamentales globales dans un système VLC sont l'émetteur (LED) comme source, les récepteurs (photodétecteurs) comme destination, la modulation optique (OOK) des données, le canal de communication sans fil optique (canal VLC). Il existe plusieurs dispositifs ou éléments entre l'émetteur et de leur récepteur afin de rendre le système VLC plus efficace et pratique, comme le filtre passe bas (P/B) et l'amplificateur électrique.

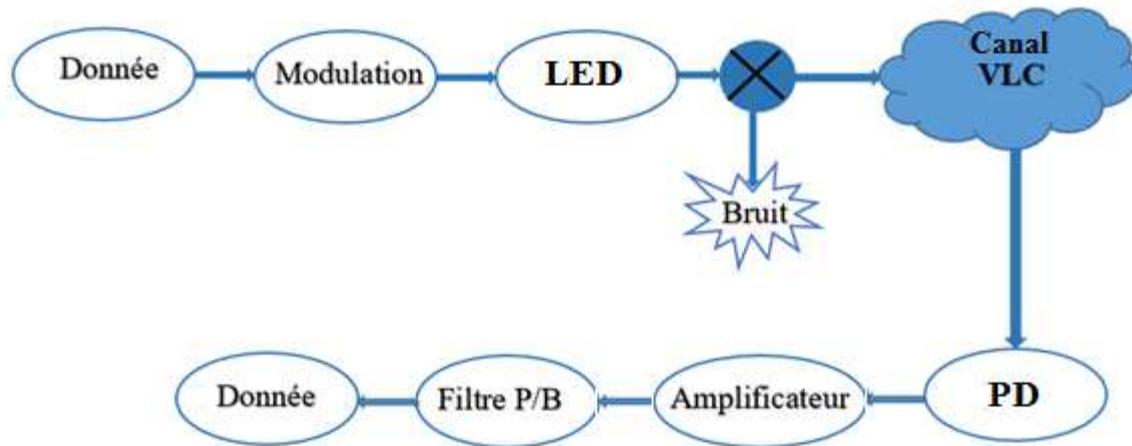


Figure III.2 : Schéma fonctionnel du système VLC

III.4.2 Présentation de la liaison VLC sous l'OptiSystem

Dans cette partie, nous présentons l'architecture du système VLC que nous avons simulé dans le but d'étudier leur performance sous l'influence du bruit. Le schéma ci-dessous (figure III.3) représente le modèle du système VLC sous le logiciel OptiSystem. Le système VLC est composé de trois blocs principaux. L'émetteur, le canal de transmission sans fil (LOS) et le récepteur.

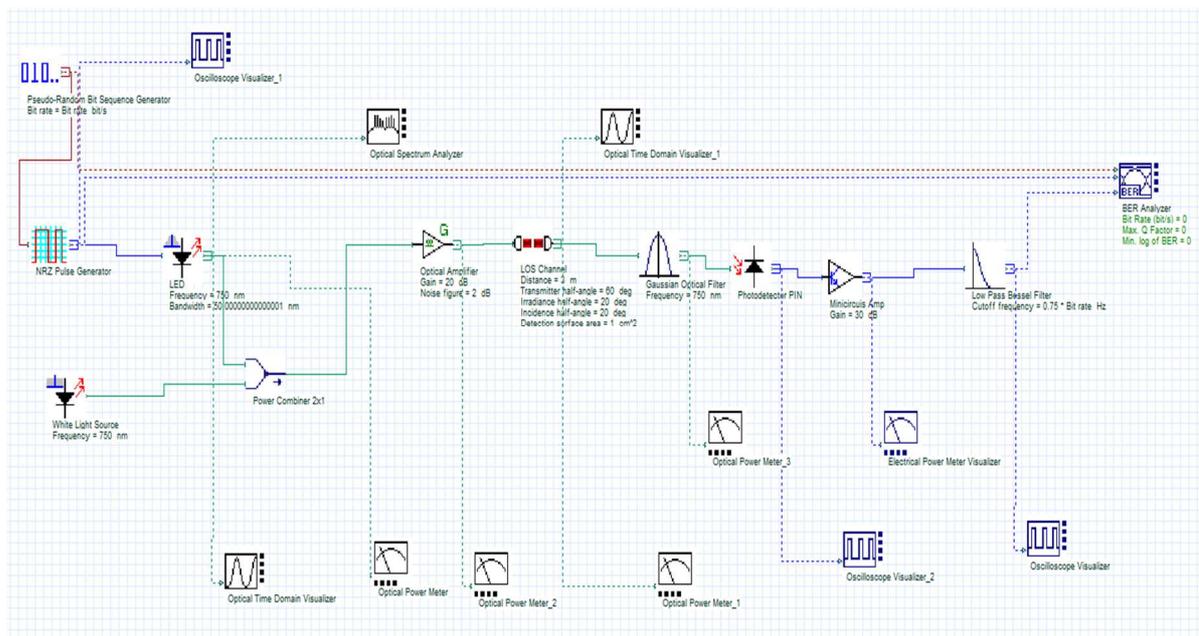


Figure III. 3 : L'architecture générale de la liaison VLC simulé par Optisystem.

III.4.2.1 L'émetteur optique

L'émetteur du système VLC proposé est une source optique de type LED (figure III. 4). Dans le système proposé, ces dispositifs ont de nombreuses caractéristiques importantes qui

le rendent parfait dans ce travail. Lumière LED est capable de transporter des données d'un point à un autre. Le paramétrage de l'émetteur optique est conformé par le tableau III.1.

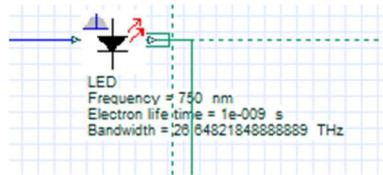


Figure III. 4 : Model de simulation d'émetteur VLC (LED)

Puissance (power)	1 W
Responsivité	1 A/W
Fréquences (longueur d'onde)	750 nm
Bande passante	26,65 THz

Tab III.1 : Les caractéristiques de la LED

III.4.2.2 Le canal LOS

Les données de la source optique sont émises sous un canal LOS présenté par la figure III.5 sous le logiciel OptiSystem. Le tableau suivant illustre les paramètres à configurer.

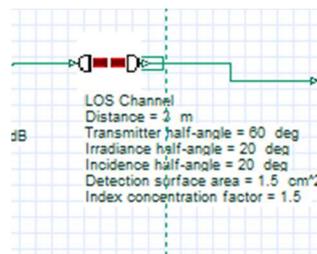


Figure III. 5 : Le model de simulation d'un canal LOS

Distance	3 m
Transmitter half-angle	60 deg
Irradiance half-angle	20 deg
Incidence half-angle	20 deg
Optical concentration factor	90 deg
Index concentration factor	1.5

Tab III.2 : Les caractéristiques du canal LOS

III.4.2.3 Le récepteur optique

À la fin de la liaison VLC suggérée, nous trouverons le récepteur. Il se base essentiellement sur une photodiode de type PIN présenté par la figure III.6, pour détecter les

données qui ont été envoyées par l'émetteur optique (LED). Le paramétrage du récepteur se fait conformément au tableau III.3.

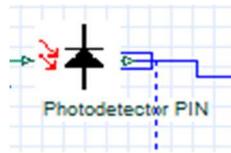


Figure III.6 : Le model de simulation d'un récepteur optique

Courant d'obscurité	1 nA
La fréquence centrale	750 nm
L'air effectif	1.5 cm ²
sensibilité	1A/W

Tab III.3 : Les caractéristiques du récepteur

La source de lumière ambiante (White light source) agit comme une source de bruit et affecte les performances du système VLC. Ainsi, il faut atténuer le bruit généré par la lumière ambiante, donc pour cela on utilise un filtre optique gaussien avant la photodiode. Ce filtre optique fonctionne comme un filtre passe-bande et a une longueur d'onde de bande passante de 750 nm. Un filtre Bessel passe-bas, après la photodiode soit utilisé pour supprimer les composantes de fréquence indésirables du signal transmis. Notons aussi qu'un amplificateur optique de gain $G = 20$ dB et un amplificateur électrique de gain $G = 30$ dB sont utilisés au niveau de l'émetteur et du récepteur pour augmenter la valeur de la puissance émise et la puissance reçue, respectivement. En plus, nous utilisons certains outils d'analyse pour observer les sorties, comme BER analyzer, Oscilloscope visualizer, et Optical power meter.

III.4.3 Résultats de la simulation et discussions

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de la simulation obtenus de la conception d'un système optique VLC à $\lambda = 750$ nm.

Au niveau de l'émetteur de la liaison VLC, les données binaires transmises sont générées par un générateur qui se compose d'un générateur binaire PRBS et d'un générateur d'impulsion NRZ. La séquence de bits générée est transmise à VLC avant d'être transmise par le générateur d'impulsion NRZ. La valeur du débit binaire pour ce système est de 100 Mb/s. La figure III.7 ci-dessus montre le signal binaire d'origine à transmettre.

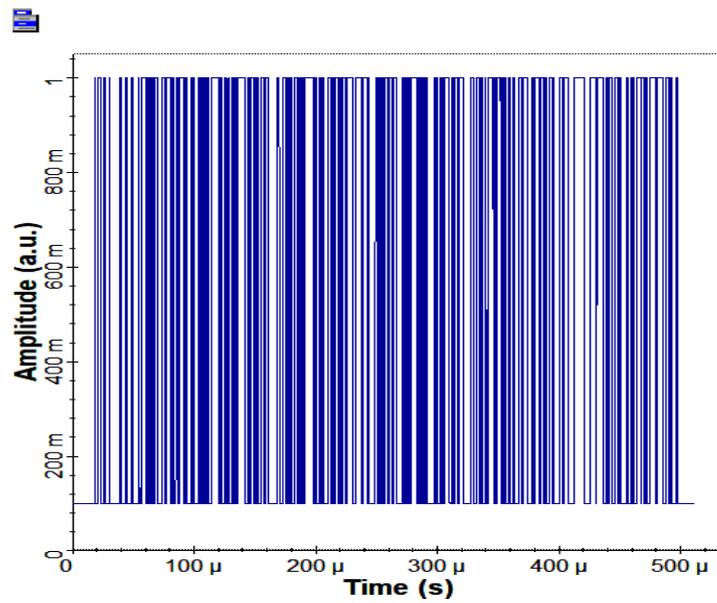


Figure III.7 : Le signal binaire d'origine

Dans la partie VLC de la liaison VLC, une diode LED émettrice de longueur d'onde de 750 nm (193.1 THz) est utilisée pour assurer l'opération de conversion électrique-optique du signal VLC reçu. Le signal VLC obtenu à la sortie de LED et combiné avec un bruit ambiant. Après l'ajout du bruit dans la performance du signal et la qualité du système VLC est dégradée. Le signal résultant est ensuite envoyé dans le canal VLC pour un trajet LOS, comme illustré par les Figure III.8, 9, et 10, respectivement.

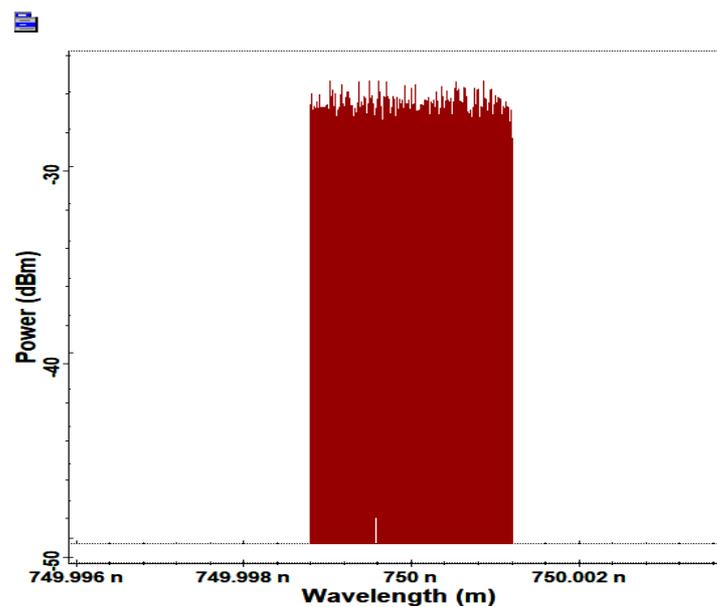


Figure III.8: La porteuse optique généré par LED

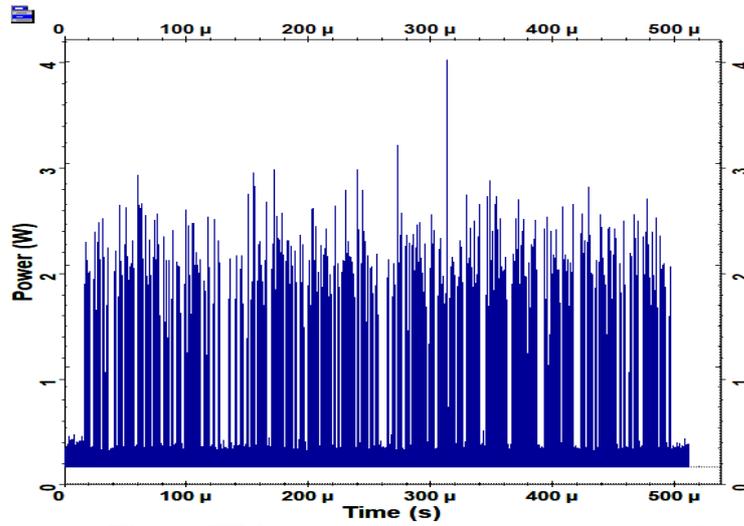


Figure III.9 : Signal optique modelé par la LED

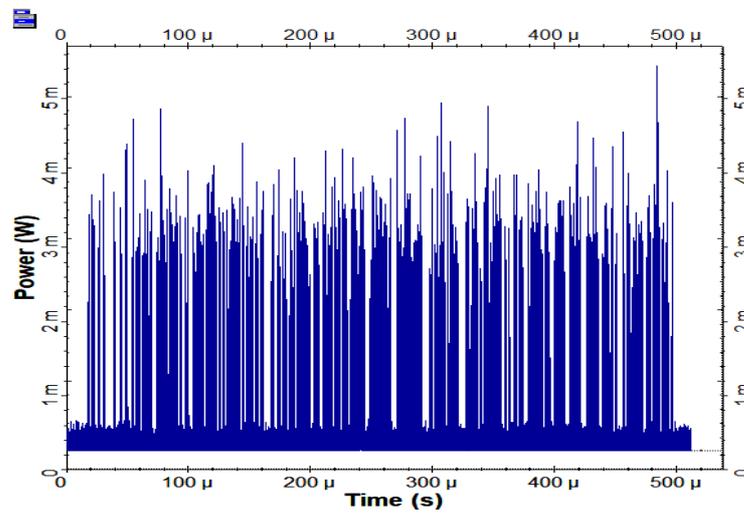


Figure III.10 : Signal optique à la sortie du canal LOS

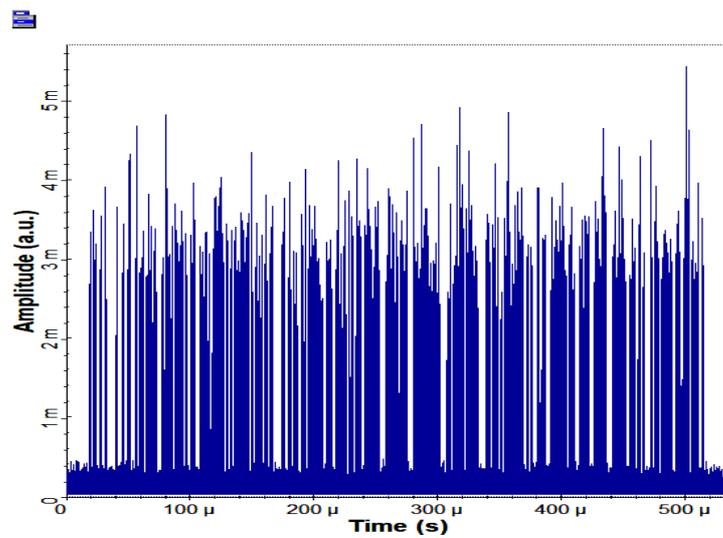


Figure III.11 : Signal à la sortie de la photodiode

Après que le signal propage dans le canal VLC pour un trajet LOS (de longueur 3 m), le signal optique reçu est détecté par la PD puis converti à un signal électrique, comme représenté par la Figure III.11.

À la sortie du système VLC, le signal électrique reçu est montré par la figure III.12 ci-dessus. On peut observer que le signal est bien reçu, mais avec présence de bruit à cause de différente source de bruits, tels que le bruit ambiant et le bruit thermique de la PD.

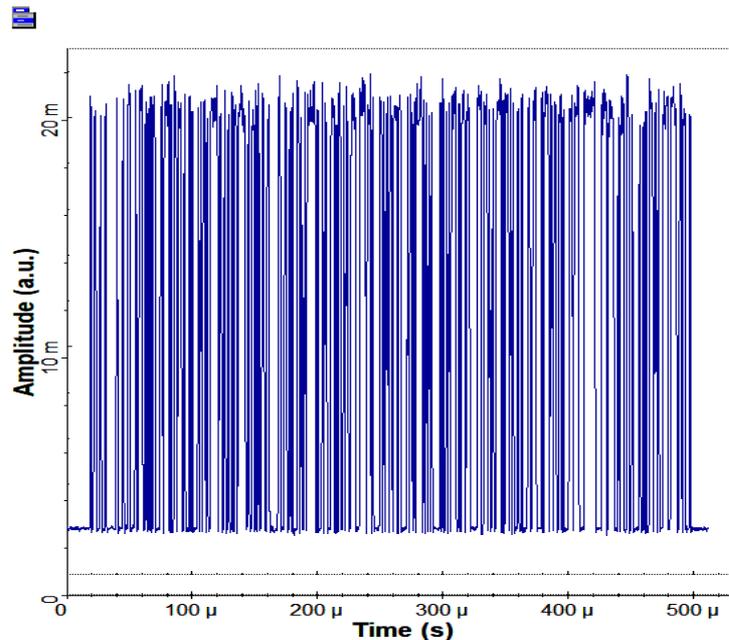


Figure III.12 : Signal électrique reçu

III.5 Etude des performances du système VLC

Les performances de notre système sont analysées en prenant en compte les paramètres globaux du système tels que le diagramme de l'œil, le facteur de qualité Q et le BER, ainsi que les paramètres du canal VLC tels que la réponse impulsionnelle du canal, les directions de l'émetteur/récepteur, la puissance optique reçue, et le SNR.

III.5.1 Performances liées aux paramètres globaux du système

Le facteur Q et la valeur BER sont observés à l'aide de l'analyseur BER. La valeur du taux d'erreur des bits indique le pourcentage de bits qui ont une erreur par rapport au nombre de bit dans les signaux de réception. La figure III.13 montre le diagramme de l'œil d'un signal reçu. Le diagramme de l'œil présente de bon résultat, présenté par la bonne ouverture de diagramme de l'œil, ce qui indique également une meilleure réception du signal, ce qui montre aussi que la perturbation et le bruit sont moindres dans ce système VLC.

La valeur du facteur Q observé dans ce système est de 33,6154 et la valeur du BER est de $3,23665 \times 10^{-248}$, et ces valeurs sont meilleures pour la communication en lumière visible. Le motif oculaire est également obtenu à l'aide d'un analyseur de diagramme oculaire

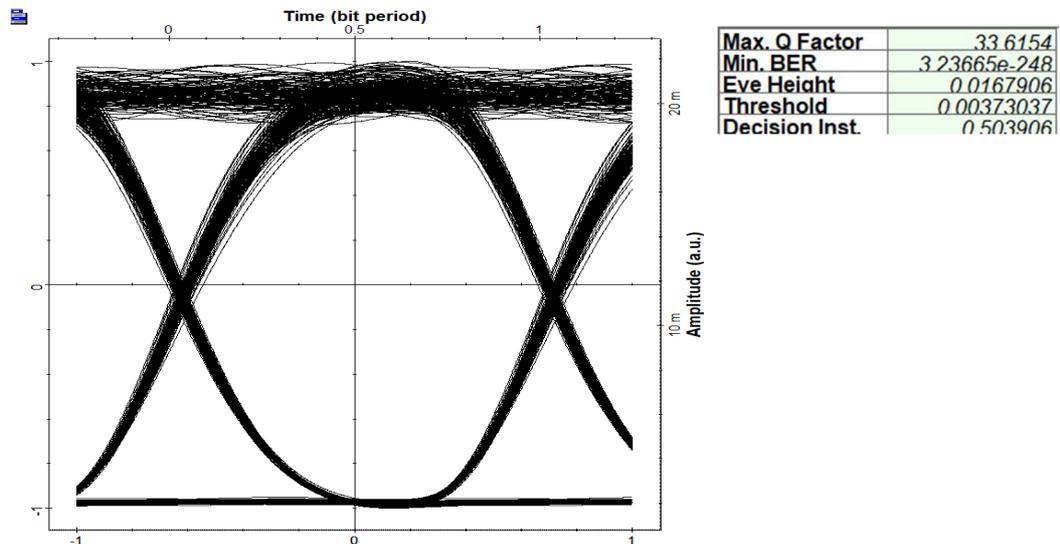


Figure III.13 Diagramme de l'œil d'un signal reçu

La Figure III.14 illustre la variation de BER en fonction du SNR. Il est évident que la qualité du signal se dégrade (BER augmente) lorsque le SNR diminue. D'autre part le BER augmente au fur et à mesure que le bruit devient plus important, tel que le bruit de la lumière ambiante et le bruit de la PD. Donc, afin d'obtenir un BER inférieur à 10^{-4} , il est nécessaire que le rapport SNR dépasse 10 dB.

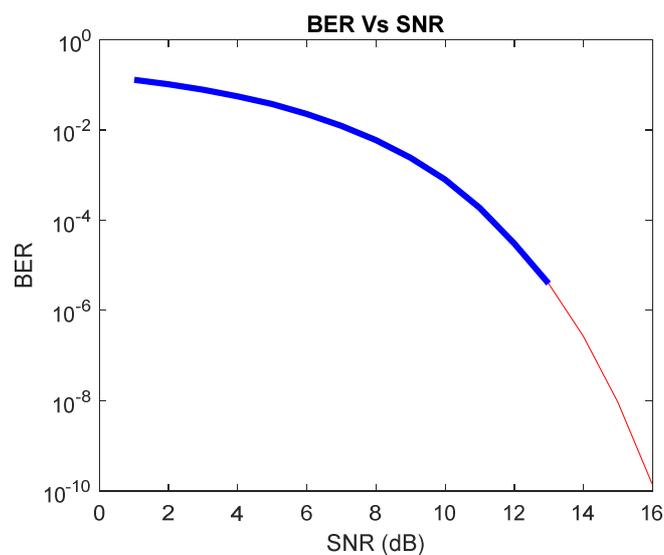


Figure III.14 : BER en fonction de SNR

III.5.2 Performances liées aux paramètres du canal VLC

La réponse impulsionnelle de la source optique LED avec un angle à mi-puissance de 20° est illustrée dans la figure III.15. La réponse du canal $h(t)$ est influencée par la configuration indoor et la position de l'émetteur et du récepteur. Les composantes de la $h(t)$ liées au lien LOS et à chacune des réflexions. La puissance diminue donc avec l'ordre des réflexions, tandis que l'étalement augmente. Effectivement, conformément à l'équation (II.6). En plus de confirmer que la contribution en puissance en réception de chaque réflexion diminue lorsque l'ordre augmente, on constate ici que le lien LOS représente la plupart du signal reçu. Cela implique que la perte possible de ce lien LOS (par exemple en cas de blocage) peut avoir un impact considérable sur la puissance reçue. Sur la figure III.15, il est également possible de constater que plus de 90 % de la puissance reçue est concentrée dans les trajets d'ordre 0 et 1. Ainsi, le comportement de la liaison est grandement influencé par angle de transmission à mi-puissance des sources LED.

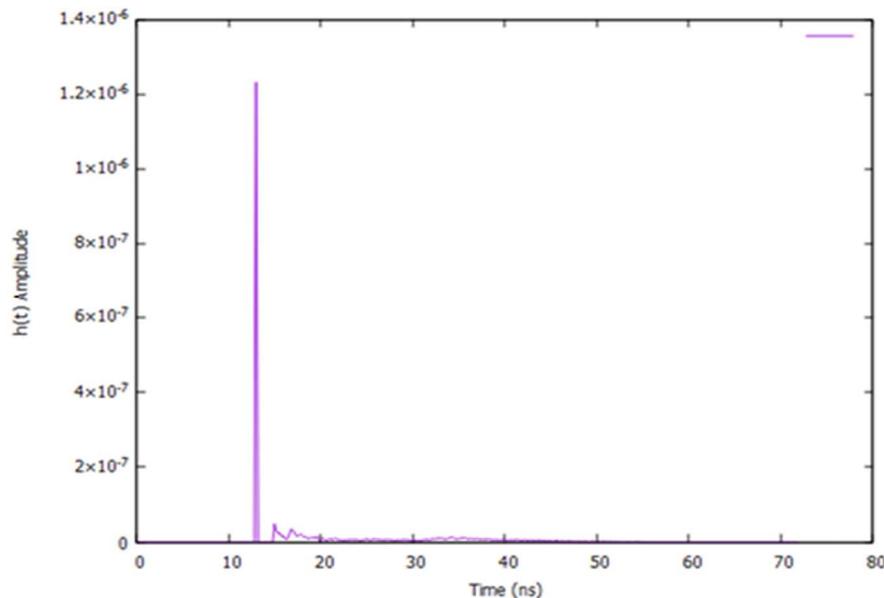


Figure III. 15 : La réponse impulsionnelle du canal VLC

III.5.3 Performances liées aux paramètres Emetteur/Récepteur

On peut également étudier les performances du système VLC en étudiant la puissance reçue en fonction de divers paramètres. Les résultats sont illustrés par les figures ci-dessous, qui illustrent les demi-angles de l'émetteur et du récepteur optique pour une distance fixée entre l'émetteur et le récepteur à 3 mètres.

- **En fonction de l'angle à mi-puissance (transmitter half-angle)**

La figure III.16 est représentée pour diverses valeurs de l'angle à mi- puissance $\theta_{1/2}$, c'est-à-dire en fonction de la direction des émetteurs. Il est observé que plus le demi-angle d'ouverture de l'émetteur est élevé, plus la puissance reçue est réduite. Cela s'explique par le fait que la lumière émise par l'émetteur est répandue sur une région plus vaste, ce qui diminue la densité de puissance lumineuse par unité de surface capable d'atteindre la photodiode.

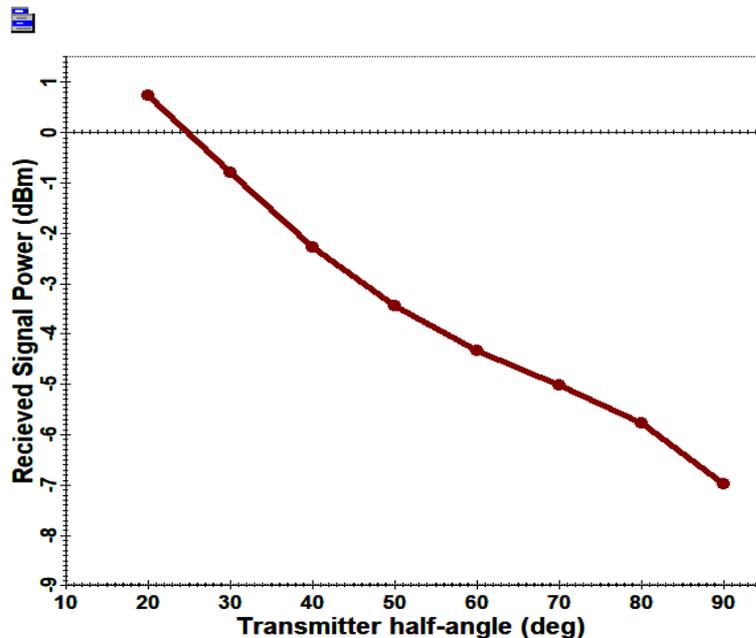


Figure III.16 Variation de la puissance optique reçue en fonction de l'angle à mi-puissance (transmitter half-angle)($\theta_{1/2}$)

- **En fonction de l'angle à mi-irradiance (irradiante half-angle)**

La figure III.17 présente la puissance reçu du système pour différentes valeurs de l'angle à mi- irradiance $\phi_{1/2}$, avec un angle à mi-puissance $\theta_{1/2}=60^\circ$. On peut observer que chaque fois que l'angle à mi-irradiance et augmente, la puissance reçue diminue. En d'autres termes, lorsque l'angle à mi-irradiance est faible, le récepteur optique reçoit un faisceau de lumière concentré, ce qui lui permet de concentrer la lumière de manière active. Cependant, à mesure que l'angle à mi-irradiance augmente, la lumière se propage davantage et le faisceau devient plus large, ce qui rend plus compliqué pour le récepteur optique de capter efficacement la lumière.

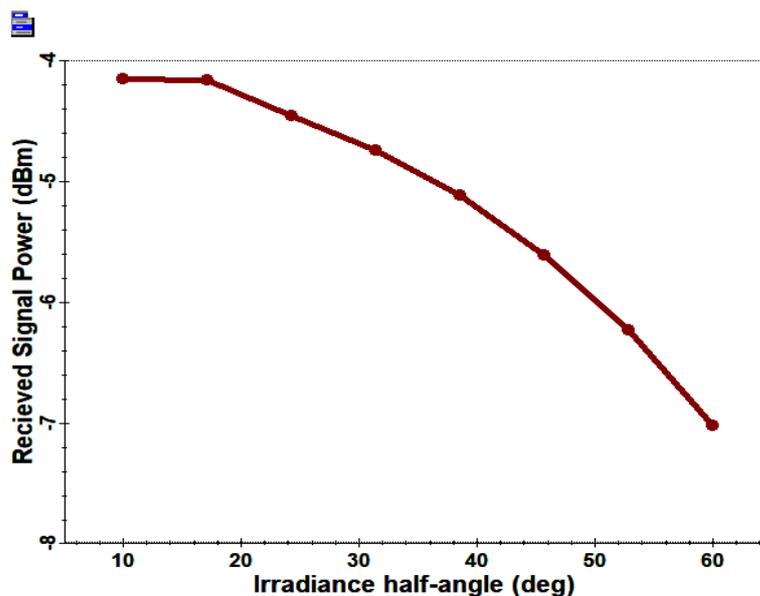


Figure III.17 Variation de la puissance optique reçue de l'angle à mi-irradiance (irradiance half-angle $\phi_{1/2}$) pour $\Theta_{1/2} = 60^\circ$ et $\psi_{1/2}=20^\circ$

- **En fonction de l'angle à mi- incidence (incidence half-angle)**

Selon la figure III.18, la puissance du système peut être observée pour diverses valeurs de l'angle à mi- incidence, avec un angle à mi-puissance $\Theta_{1/2}=60^\circ$. Il est possible de constater que chaque fois que l'angle à mi- incidence augmente, la puissance reçue diminue. En effet, lorsqu'un récepteur optique est exposé à un FoV trop grand, une partie de la lumière ambiante ou de la lumière environnante peut être captée par le détecteur optique, ce qui peut entraîner des erreurs dans la communication et une diminution de la puissance du signal reçu.

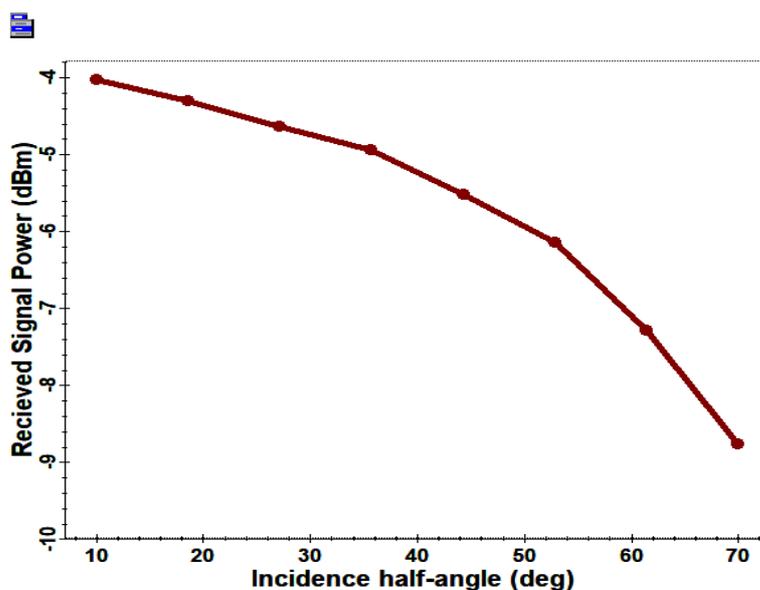


Figure III.18 Variation de la puissance optique reçue en fonction de l'angle à mi-incidence (incidence half-angle $\psi_{1/2}$) pour $\Theta_{1/2} = 60^\circ$ et $\phi = 20^\circ$

- **En fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur**

La figure III.19 représente la variation de la puissance optique reçue en fonction de la distance. On peut observer que chaque augmentation de distance, la puissance reçue est diminuée. Brièvement, lorsque la distance est faible, le récepteur optique reçoit un faisceau de lumière concentré, ce qui lui permet de collecter efficacement la lumière. Mais lorsque la distance devient plus grande, l'atténuation du signal augmente, ce qui rend plus difficile pour le récepteur optique de collecter la lumière de manière efficace. En peut conclure ainsi, que la portée d'une liaison VLC est fortement limitée par l'atténuation du canal de transmission.

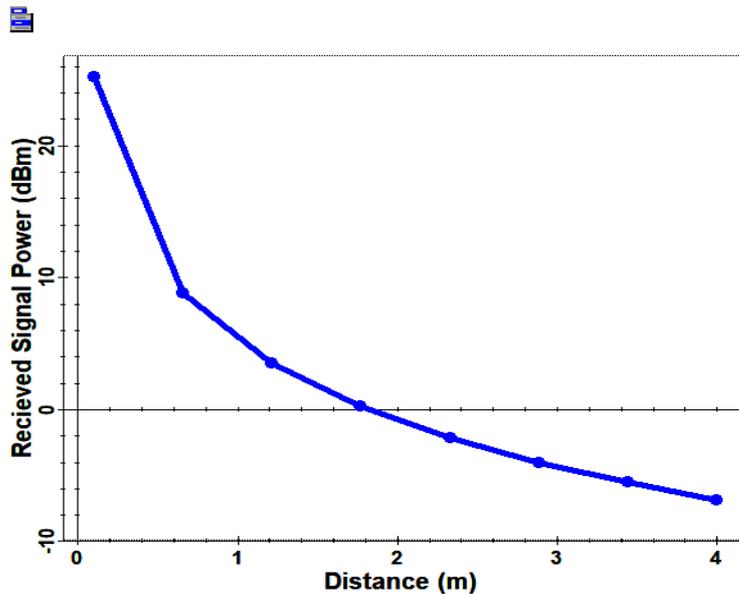


Figure III.19 : La variation de la puissance optique reçue en fonction de la distance

III.5.4 Performances liées à la distribution de la puissance optique reçue

La distribution de la puissance optique dans un trajet LOS pour un demi-angle (l'angle à mi-puissance) de $\theta_{1/2} = 60^\circ$ est illustrée dans la figure III.20. Il est évident que l'utilisation d'une LED entraîne une faible puissance optique aux coins de la pièce (Room), tandis qu'au centre de la pièce, la puissance reçue est élevée. Il y a donc une répartition inégale de la puissance optique reçue, au centre avec une puissance maximale de -3 dBm et une puissance minimale de -28 dBm aux coins de la pièce, donc il existe plus de 25 dB de différence de puissance optique entre un utilisateur situé au centre de la pièce et un autre situé au coin. Par conséquent, cette différence dans la répartition de la puissance reçue qui arrive au récepteur du système VLC pourrait entraîner une différence significative dans les performances du système entre les utilisateurs.

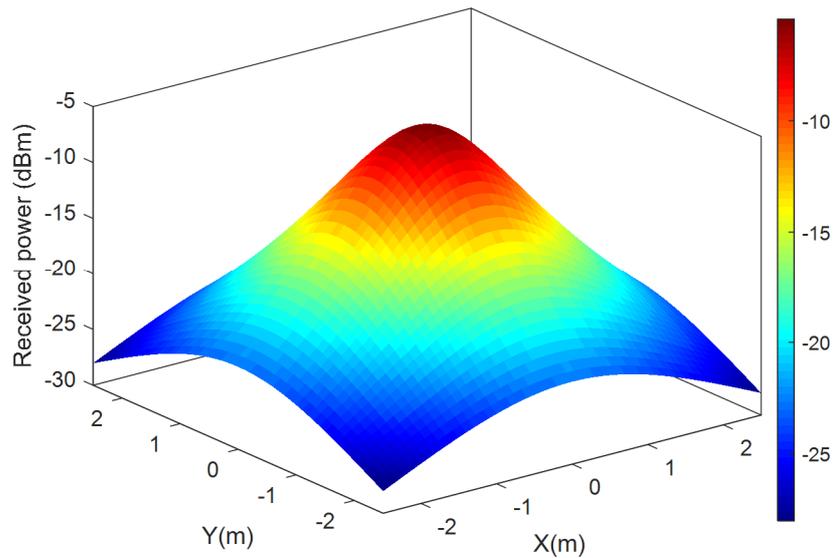


Figure III.20 : Distribution de la puissance optique reçue pour une LED (pour $\theta_{1/2} = 60^\circ$)

III.5.5 Performances liées au SNR

La distribution du SNR dans la pièce pour les dimensions de $\theta_{1/2} = 60^\circ$ est illustrée dans la figure III.21. On peut observer que le signal transmis dans l'angle de la pièce présente un SNR très faible (-5 dB), contrairement au centre de la pièce (35 dB). Si le récepteur se trouve dans l'angle, cela entraîne une zone morte. On constate une disparité de plus de 40 dB entre le niveau minimum et maximum du SNR. La différence de SNR est causée par la répartition inégale de la puissance optique reçue au niveau de la PD.

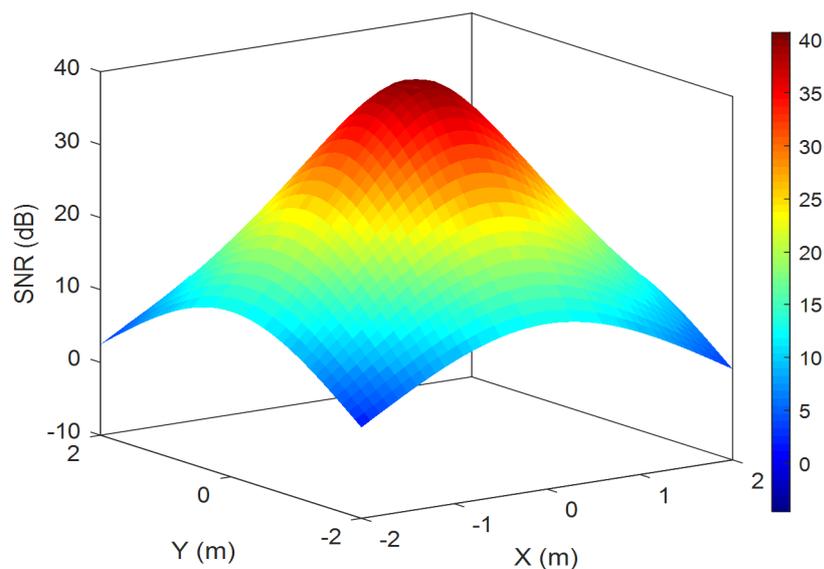


Figure III.21 : Distribution du SNR dans une pièce

III.6 Conclusion

Dans ce travail, nous avons montré les résultats de la simulation du système VLC pour les applications intérieur (indoor) à l'aide de logiciel OptiSystem. Le but principal de cette simulation consiste à évaluer les performances du système en ajustant les divers paramètres. Nous avons étudié l'effet des différents angles sur la puissance reçue, tels que les demi-angles d'émetteur, d'irradiance et d'incidence. Les résultats montrent que la variation de l'irradiance et des angles d'incidence affecte de manière significative la puissance reçue. Ainsi, nous avons étudié plus en détail si la source LED couvrirait toute la pièce sans perdre la puissance reçue et la distribution du SNR. Nous avons trouvé que pour une configuration à 1 LED, il existe une répartition non uniforme de la puissance reçue dans toute la pièce. Par conséquent, cette différence de puissance entraîne un SNR élevé dans certaines zones et une zone morte d'autres zones de la pièce.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les dernières années, la communication par la lumière visible (VLC) a connu une croissance de popularité en tant que solution envisageable pour le transfert de données à grande vitesse et la communication sans fil. Les données sont transmises par VLC en utilisant le spectre de lumière visible et peuvent être aisément intégrées aux systèmes d'éclairage LED déjà en place. Le mémoire présente une étude qui se concentre sur l'utilisation de la technologie VLC dans les espaces indoor. L'objectif consiste à évaluer les performances des systèmes VLC dans ce contexte, en prenant en considération divers contraintes sur la transmission des données via une liaison VLC tels que les paramètres du système et les exigences de canal sans fil. Cela nécessiterait l'analyse des éléments qui impactent la qualité du signal VLC, comme le positionnement des émetteurs et les récepteurs, ainsi que leurs orientation et directivités, la puissance du signal, et les niveaux de bruit.

Le premier chapitre a exploré en détail la communication par lumière visible (VLC), en couvrant l'architecture des systèmes VLC, les composants utilisés, le principe de fonctionnement, les types de modulations et les différentes liaisons optiques utilisées. Cette analyse approfondie permet de mieux comprendre les fondements et les possibilités des systèmes VLC dans le domaine des communications sans fil Indoor et Outdoor.

Après avoir défini les caractéristiques principales des émetteurs et récepteurs optiques, nous avons étudié dans le deuxième chapitre la modélisation du canal VLC. Au début du chapitre, nous avons abordé les diverses catégories de liens VLC, comme les liens LOS (Light of sight) et NLOS (Non line of sight) pouvant s'établir dans l'environnement. Ensuite, il présente les caractéristiques principales du canal de VLC, comme la perte de chemin, la réaction à l'impulsion du canal et le gain de canal.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié l'architecture générale du système VLC proposé. Un aperçu sur le logiciel de simulation OptiSystem a été exposé dans la première partie, ainsi que les critères de qualité utilisés pour évaluer les performances du système. Cette partie aide à approfondir notre compréhension du fonctionnement et de l'organisation de ces blocs à l'architecture globale de la liaison. Dans la seconde partie, on a exposé l'architecture du système simulé par le logiciel OptiSystem, ainsi que la description de chaque sous-bloc. Les résultats de la simulation de la transmission des données via une liaison VLC utilisant la technique de modulation d'intensité (NRZ-OOK) ont été montrés et discutés pour la puissance d'émission, le débit, les spectres des signaux à l'émission et à la réception. En plus de la réponse impulsionnelle de ce canal VLC, et les performances du

système en ce qui concerne le diagramme de l'œil, le BER et le SNR. Par ailleurs, la puissance reçue a été évaluée en fonction des différents demi-angles de l'émetteur et de récepteur optique. D'après nos observations, chaque élévation du demi-angle entraîne une réduction de la puissance reçue. Il a également été observé que la puissance reçue optimale est obtenue lorsque le demi-angle de transmission est de 60 degrés environ. Il convient également de souligner que la détérioration des performances peut résulter de la perte de connexions directes entre l'émetteur optique et le récepteur, ce qui a un impact sur la puissance reçue.

Les résultats des performances démontreront également l'efficacité du système VLC pour la transmission de données, ce qui soulignera le potentiel de la VLC pour des applications en indoor.

Cette étude ouvre la voie pour étudier des systèmes plus complexes se focalisant principalement sur l'emploi de différentes techniques de transmission de signaux, notamment celle de l'OFDM optique (pour Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) afin de garantir des débits de transmission compétitifs avec la RF.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques:

Introduction générale:

- [1] <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/>
- [2] Hayashi, S and Kawase, K. "Terahertz-Wave Parametric Sources". Recent Optical and Photonic Technologies. InTech. 2010.
- [3] Fon, R.C., Ndjiongue, A.R., Ouahada, K. et al. "Fibre optic-VLC versus laser-VLC: a review study". Photon Netw Commun, 45 (4), 2023.

Chapitre I:

- [1] Poulouse, A. « Simulation of an Indoor Visible Light Communication System Using Optisystem ». Signals, 3, 765–793. 2022.
- [2] Jorge GARCIA-MARQUEZ, Suat TOPSU, « Les communications par lumière visible : Le Li-Fi », Photoniques, No 86, Mai-Juin 2017.
- [3] R. U.-R. Sm, « Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande », Union Internationale des Télécommunications, 2018.
- [4] L. U. Khan, « Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges », Digital Communications and Networks, 3 (2), p. 78-88, 2017.
- [5] <https://byjus.com/physics/the-electromagnetic-spectrum-visible-light/>
- [6] Haas, H., et al, « Li-Fi for wireless communications: Optical wireless communication systems and channel modeling », Cambridge University Press., 2012.
- [7] Eltahir, H., et al, "Visible light communication: Theoretical and practical considerations", Springer, 2016.
- [8] Zhecheng Long, " Optical Wireless Systems Channel Modelling ", Journal of Computer and Communications, 10, pp. 66-85, 2022.
- [9] <https://www.lightwaveonline.com/optical-tech/transmission/article/16649781/10g-fso-systems-position-technology-for-the-future>
- [10] H. Abuella et al., « Hybrid RF/VLC Systems: « A Comprehensive Survey on Network Topologies, Performance Analyses, Applications, and Future Directions », in IEEE Access, vol. 9, pp. 160402-160436, 2021,

Références bibliographiques:

- [11] S. Schmid, G. Corbellini, S. Mangold, T. R. Gross, «LED-to-LED Visible Light Communication networks », IEEE Globecom Workshops, Anaheim, CA, pp. 1264-1268, 2012.
- [12] Alin Cailean. «Etude et réalisation d'un système de communications par lumière visible (VLC/LiFi). Application au domaine automobile». Thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, 2014.
- [13] Clement Le Bas. « Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil.». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2017.
- [14] J. VERNEZ, 2003 « Adaptation de la couche MAC du standard IEEE 802.15.4 à une couche physique Ultra Wide Band », rapport de projet, La Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains, Suisse, 30/06/2020.
- [15] T. Cevik et S. Yilmaz, « An Overview of Visible Light Communication Systems », International journal of Computer Networks & Communications, v7, n 6, p. 139 150. 2015.
- [16] I. Hamamdia , « Etude des performances d'un système de communication optique hybride SDM/FSO utilisant la lumière laser à 2 μm » , mémoire de master, université Guelma,2022
- [17] S.Joumessi Demeffo, « Dispositif communicant par optique sans fil pour les transmissions audio à l'intérieur du cockpit d'un avion », Thèse de doctorat, Université de Limoges 2020.
- [18] Nicolas Barbot, «Codage de canal pour les communications optiques sans fil», Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2013.
- [19] A-L.KORODOWOU, «Codage du canal en treillis dans un système de communication VLC »,Thèse de doctorat, Université d'ABOMEY-CALAVI (UAC), 2018.
- [20] Abdeslam Behloui, « Simulation du canal optique sans fil. Applications aux communications optiques sans fil ». Thèse de doctorat, l'université de POITIERS, 2016.
- [21] Zabih Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari. "Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB». CRC Press, Boca Raton, FL, USA, Second edition, 2019.
- [22] A, CHAABNA, « Système de Communication par la Lumière Visible (VLC) : Architecture simplifiée et efficacité énergétique d'un système de positionnement», thèse doctorat, Université Guelma ,2019.

Références bibliographiques:

- [23] M. Falcitelli et P. Pagano, « Visible Light Communication for Cooperative ITS », in *Intelligent Transportation Systems*, vol. 52, p. 19-47. 2016,
- [24] Michael Margolis, Nicholas Weldin. « Arduino Cookbook ». 2ème édition, ISBN9782100727124, 2015, 5 rue Laromiguière, 75005 Paris, 453 pages.
- [25] <https://fr.farnell.com/vishay/bpw34/photodiode/dp/1045425>
- [26] Yann Benoit. « L'évolution du réseau : En route vers la 5G », Colloque du CERIU, Québec. Novembre 2018.
- [27] P. Goswami et M. K. Shukla, "Design of a Li-Fi Transceiver», *Wireless Engineering and Technology*, vol. 08, no 04, p. 71-86, 2017.
- [28] Aboubaker Chedikh Beye , Jean Marc Ribero, « Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou « Small-Cells » pour le standard 5G » ,thèse doctorat, université Côte d'azur, 2019.

Chapitre II:

- [1] Dilukshan Karunatilaka, Fahad Zafar, Vineetha Kalavally, and Rajendran Parthiban. «LED based indoor visible light communications: State of the art». *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3) :1649–1678, 2015.
- [2] Zheng-Guo Sun, Hong-Yi Yu, and Yi-Jun Zhu. «Superposition constellation design for multi-user multi-chip visible light communication systems». *Optics Communications*, 432:27–31, 2019.
- [3] Hossien B Eldeeb, Hossam AI Selmy, Hany MElsayed, and Ragia I Badr. «Co-channel interference cancellation using constraint field of view ADR in VLC channel». In *2017 IEEE Photonics Conference (IPC) Part II*, pages 1–2. IEEE, 2017.
- [4] Alain Richard Ndjiongue, Hendrik C Ferreira, and Telex MN Ngatched. «Visible light communications (VLC) technology». *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, pages 1–15, 1999.
- [5] Ahmed A Abdulhussain Al-Kinani et al. «Channel modelling for visible light communication systems». PhD thesis, Heriot-Watt University, 2018.
- [6] H Joshi, RJ Green, and MS Leeson. «Channel models for optical wireless communication systems». In *11th International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON*, volume 9, pages 1–5, 2009.

Références bibliographiques:

- [7] Zabih Ghassemlooy, Shlomi Arnon, Murat Uysal, Zhengyuan Xu, and Julian Cheng. “Emerging optical wireless communications—advances and challenges”. *IEEE journal on selected areas in communications*, 33(9), 1738–1749, 2015.
- [8] Latif Ullah Khan. «Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges». *Digital Communications and Networks*, 3(2):78–88, 2017.
- [9] Ahmed Al-Kinani, Cheng-Xiang Wang, Li Zhou, and Wensheng Zhang. «Optical wireless communication channel measurements and models». *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3) :1939–1962, 2018.
- [10] A. LAZEREGUE, L. OULD AKLOUCHE, « Etude et simulation de la liaison descendante de la norme 3GPP-LTE en mode MISO », mémoire de master, université de Blida, 2011.
- [11] Olivier Bouchet. «Wireless Optical Communications». John Wiley & Sons, 2013.
- [12] N. OUNOUH, S. SAIHI, « Etude et optimisation des paramètres de base d’un réseau LTE D’ATM, » mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), 2018.
- [13] Yazan A Alqudah and Mohsen Kavehrad. «MIMO characterization of indoor wireless optical link using a diffuse-transmission configuration». *IEEE Transactions on Communications*, 51(9):1554–1560, 2003
- [14] ALEM. Med. A et Med Abdelwahed: « Etude et Simulation d’une liaison de téléphonie mobile 3GPP LTE » mémoire d’ingénieur, Université de Blida , 2010.
- [15] Francisco J Lopez-Hernandez, Rafael Perez-Jimenez, and Asuncion Santamaria. «Ray-tracing algorithms for fast calculation of the channel impulse response on diffuse ir wireless indoor channels». *Optical engineering*, 39(10):2775–2781, 2000.
- [16] Abdul Salam and Mehmet C Vuran. «Em-based wireless underground sensor networks». In *Underground sensing*, pages 247–285. Elsevier, 2018.
- [17] Jeffrey B Carruthers and Joseph M Kahn. «Modeling of nondirected wireless infrared channels». *IEEE transactions on communications*, 45(10):1260–1268, 1997.
- [18] Cheng Chen, Dushyantha A Basnayaka, Xiping Wu, and Harald Haas. «Efficient analytical calculation of non-line-of-sight channel impulse response in visible light communications». *Journal of Lightwave Technology*, 36(9):1666–1682, 2017.

Références bibliographiques:

- [19] Toshihiko Komine and Masao Nakagawa. «Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights». *IEEE transactions on Consumer Electronics*, 50(1):100–107, 2004.
- [20] Yang Qiu, Hsiao-Hwa Chen, and Wei-Xiao Meng. «Channel modeling for visible light communications a survey». *Wireless Communications and Mobile Computing*, 16(14):2016–2034, 2016.
- [21] John R. Barry, Joseph M. Kahn, William J. Krause, Edward A. Lee, and David G. Messerschmitt. «Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels». *IEEE journal on selected areas in communications*, 11(3):367–379, 1993.
- [22] Zabih Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari. «Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB». CRC Press, Boca Raton, FL, USA, Second edition, 2019.
- [23] Ahmed Al-Kinani, Cheng-Xiang Wang, Harald Haas, and Yang Yang. «A geometry based multiple bounce model for visible light communication channels. In 2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), pages 31–37. IEEE, 2016.
- [24] AM Ramirez-Aguilera, JM Luna-Rivera, Victor Guerra, José Rabadán, Rafael Perez-Jimenez, and Francisco J Lopez-Hernandez. «A review of indoor channel modeling techniques for visible light communications». In 2018 IEEE 10th Latin American Conference on Communications (LATINCOM), pages 1–6. IEEE, 2018.
- [25] Jupeng Ding, Zhengyuan Xu, and Lajos Hanzo. «Accuracy of the point-source model of a multi-LED array in high-speed visible light communication channel characterization». *IEEE Photonics Journal*, 7(4):1–14, 2015.
- [26] Shihe Long, Mohammad Ali Khalighi, Mike Wolf, Salah Bourennane, and Zabih Ghassemlooy. «Investigating channel frequency selectivity in indoor visible-light communication systems». *Optoelectronics*, 10(3):80–88, 2016.
- [27] Jelena Grubor, Sebastian Randel, Klaus-Dieter Langer, and Joachim W Walewski. «Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting». *Journal of Lightwave technology*, 26(24):3883–3892, 2008.
- [28] Philip Mark. «Ethernet over light». PhD thesis, University of British Columbia, 2014.

Références bibliographiques:

[29] Hany Elgala, Raed Mesleh, and Harald Haas. «Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art». IEEE Communications Magazine, 49(9):56–62, 2011.

[30] Nuttapol PRAYONGPUN, «Modélisation et étude de la capacité du canal pour un système multi-antennes avancé exploitant la diversité de polarisation», Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble 1, 2009.

Chapitre III :

[1] <https://optiwave.com/optisystem-overview/>

[2] Yassine HARICHANE, Ilyas BENKRAOUDA, «Étude et évaluation des performances ; un système de communication sans fil optique en espace libre (FSO) », mémoire de master Université Hassiba Ben Bouali-Chlef, 2019.

Liste des acronymes

VLC	Visible Light Communication
BER	bit error rate
Li-Fi	Light Fidelity
LoS	Line of Sight
NLOS	No Line of Sight Orthogonal
OFDM	Frequency Division Multiplexing
OOK	On Off Keying
SNR	Signal to Noise Ratio
RF	Radio Frequency
PD	PhotoDiode
PIN	Positive Intrinsic Negative
APD	Avalanche Photodiode
FoV	Field of View
VPPM	Variable Pulse Position Modulation
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
OWC	Optical Wireless Communications
NRZ	No Return to Zero