

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 : **Réseaux et Télécommunications**

Intégration du système hybride RF/VLC dans les réseaux d'accès 5G
- Internet de lumière : vers un hôpital intelligent -

Présenté par :
Hamami Bouthaina

Sous la direction de :
Dr . Graini leila

Septembre 2023

Remerciements

À l'issue de ce travail, au moment des dernières relectures avec quelque recul, je mesure tout ce que je dois à la présentation de ce travail au conseil de Mme GRAINI Leila, ma directrice de mémoire. Je lui adresse mes plus sincères remerciements pour la gentillesse, la compréhension et la patience dont elle a su faire preuve pour m'apprendre la rigueur intellectuelle et la ténacité nécessaires à la réalisation de ce travail.

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

Je tiens à exprimer ma gratitude envers certaines personnes, mes amis, qui m'ont permis d'avancer de façon optimiste malgré les obstacles. Merci à vous tous.

Je pense également aux auteurs des ouvrages ou des articles parus qui m'ont guidé de façon pertinente dans cette recherche.

Dédicace

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, La force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve, et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire

" Ya Kayoum "

Je dédie ce modeste travail

A ma mère qui m'a entourée d'amour, d'affection et qui a tout fait pour ma réussite, que dieu la garde.

A mon père, pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordée.

A mes sœurs ' malek assma ' pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, mes plus grandes sources de bonheur j'espère que la vie vous réserve le meilleur.

A mes frères ' fougou islam ' pour son tendresse, et son soutien. Je vous souhaite une vie pleine de réussite et bonheur.

A toute ma famille.

A tous mes collègues et amis ' safa marwa djihan meryem manel aya'

A toute personne qui m'a encouragé de près ou de loin et m'a aidé dans mes études.

المخلص

الهدف من هذا العمل هو تطوير نظام اتصالات عالي السرعة من خلال دمج التقنيات اللاسلكية الضوئية الجديدة مع شبكات الترددات اللاسلكية RF ذات النطاق العريض باستخدام الموجات المليمترية (mmWave) عند 60 جيجا هرتز في شبكة الوصول 5G. وبشكل أكثر تحديداً، في المقام الأول في البيئة الداخلية، يمكن لاتصالات الضوء المرئي (VLC) استغلال البنية التحتية للإضاءة التي تستخدم بشكل أساسي مصابيح LED كمصدر للضوء لتوفير وصول منخفض التكلفة إلى البيانات في المواقع الحساسة، مثل المؤسسات الصحية والمستشفيات، حيث ان استخدام موجات التردد اللاسلكي RF تتسبب في مشاكل خطيرة تتعلق بالسلامة والصحة. ولهذا الغرض، يُستخدم النظام الفرعي البصري (VLC) في البيئة الداخلية (في غرفة المستشفى)، ويستخدم النظام الفرعي للترددات اللاسلكية (عند موجة 60 جيجا هرتز -مليمتر) في البيئة الخارجية. تكمن أهمية النظام الهجين RF/VLC المقترح في الاستفادة من السعة العالية لروابط VLC والاتصال الأفضل لروابط التردد اللاسلكي.

يتم تحليل النظام اللاسلكي الهجين RF/VLC لوضع LED بشكل منتظم في جميع أنحاء الغرفة، حيث يُفترض وضع أجهزة الاستقبال بشكل عشوائي. يتم تقييم أداء النظام من حيث معدل الخطأ (BER)، ونسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) والطاقة المستقبلية عند جهاز الاستقبال، من أجل 1 و 4 LEDs تحت تأثير معلمات المرسل والمستقبل وخصائصهما. وأظهرت نتائج الأداء كفاءة النظام المقترح. حيث يمكن لتقنية RF/VLC نقل إشارات التردد اللاسلكي بتردد 60 جيجا هرتز بسهولة باستخدام ناقلات ضوئية مرئية في البيئة الداخلية، مما يثبت جدوى السيناريو المدروس وبالتالي إمكانية استخدام الاتصالات بالضوء المرئي كبديل للترددات اللاسلكية للتطبيقات الداخلية في المؤسسات الصحية والمستشفيات.

الكلمات المفتاحية: اتصالات الضوء المرئي (VLC)، الموجات المليمترية (mmWave)، شبكة

الوصول G5، الثنائيات الباعثة للضوء (LEDs)

Abstract

The objective of this work is to develop a high-speed communication solution by integrating new optical wireless technologies with the broadband RF networks using millimeter waves (mmWave) at 60 GHz in the 5G access network. More specifically, primarily for Indoor situations, Visible Light Communications (VLC) can exploit the lighting infrastructure that essentially used LEDs as light source to provide low-cost data access in sensitive locations, such as health establishments and hospitals, where the use of RF waves caused very significant safety and dangerous health problems. For this purpose, the optical subsystem (VLC) is used in the Indoor environment (in a hospital room), and the RF subsystem (at 60 GHz-mmWave) is used in the Outdoor environment. The importance of this proposed hybrid RF/VLC system is to take advantage of the high capacity of VLC links and the better connectivity of RF links.

The hybrid RF/VLC wireless system is analyzed for regular placement of LED diodes, where the receivers are assumed randomly placed throughout the room. The system performance is evaluated in terms of bit error rate (BER), signal-to-noise ratio (SNR) and received power at the receiver, for 1 and 4 LEDs configurations under the impact of the transmitter-receiver parameters and their characteristics. The performance results shown the efficiency of the proposed system. Hybrid RF/VLC technology can easily transmit RF signals at 60 GHz using visible optical carriers in the indoor environment, which proves the feasibility of the scenario studied and therefore the potential of VLC as an alternative to RF for indoor applications in health establishments and hospitals.

Keywords: Visible Light Communications (VLC), millimeter waves (mmWave), 5G access network, light emitting diodes (LEDs)

Résumé

L'objectif de ce mémoire est de développer une solution de communication haute débit en intégrant de nouvelles technologies optiques sans fil avec les réseaux sans fil RF à large bande utilisant les ondes millimétriques (mmWave) à 60 GHz dans le réseau d'accès 5G. Plus spécifiquement, principalement pour les situations Indoor, les communications par lumière visible (VLC) peuvent tirer parti de l'infrastructure d'éclairage qui utilise essentiellement une source de lumière LED pour fournir un accès aux données à faible coût dans les lieux sensibles comme les établissements de santé et les hôpitaux, où l'utilisation des ondes RF pose des problèmes de sécurité et de dangerosité sur la santé très importantes. Pour cela, le sous-système optique (VLC) est utilisé dans l'environnement Indoor (dans une pièce de l'hôpital), et le sous-système radio RF (à 60 GHz-mmWave) est utilisé dans l'environnement Outdoor. L'importance de ce système hybride proposé RF/VLC est de tirer parti de la grande capacité des liaisons VLC et d'une meilleure connectivité des liaisons RF.

Le système sans fil hybride RF/VLC est analysé pour un placement régulier de diodes LED, et les récepteurs sont placés au hasard dans la pièce. Les performances du système sont évaluées en termes du taux d'erreurs binaire (BER), du rapport signal/bruit (SNR) et de puissance reçue au niveau du récepteur, pour des configurations à 1 et 4 LED sous l'impact des paramètres de l'émetteur-récepteur et leurs caractéristiques. Les résultats des performances montrent l'efficacité du système proposée. La technologie hybride RF/VLC peut facilement transmettre des signaux RF à 60 GHz à l'aide de porteuses optiques visible dans l'environnement Indoor. Ce qui montre la faisabilité du scénario étudié et donc le potentiel de la VLC en alternative aux RF pour des applications Indoor dans les établissements de santé et les hôpitaux.

Mots clé : communications par lumière visible (VLC), Onde millimétrique (mmWave), réseau d'accès 5G, diode électroluminescente (LED).

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Abstract	
Résumé	
Table des matières	I
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur la technologie 5G	
I.1 Introduction	4
I.2 Evolution des réseaux mobiles	4
I.2.1 La Première Génération (1G)	5
I.2.2 La Deuxième génération (2G)	6
I.2.2.1 Réseau GSM	7
I.2.2.2 GPRS 2.5G	8
I.2.2.3 EDGE 2.75G	9
I.2.3 La troisième génération (3G)	10
I.2.4 La quatrième génération (4G)	13
I.2.4.1 Long Term Evolution-Advanced	15
I.2.4.2 LTE-Advanced pro	15
I.2.5 La cinquième génération (5G)	16
I.2.5.1 Objectifs de la 5G	16
I.2.5.2. Architecture du réseau 5G et ses services]	17

I.2.5.3 Les technologies de la 5G	19
I.2.5.4 Le défi de la 5G et l'optique sans fil	26
I.3 Conclusion	27
Chapitre II: Communications par lumière visible (VLC)	
II.1 Introduction	28
II.2 Généralités	28
II.3 Historique des communications par lumière visible	29
II.4 Les avantages et les inconvénients de système VLC	30
II.4.1 Les avantage	30
II.4.2 Les inconvénients	31
II.5 Principe de fonctionnement	32
II.6 Architecture du système VLC	32
II.6.1 Emetteur VLC	33
II.6.1.1 Description	33
II.6.1.2 LED et VLC	33
II.6.1.3 Mode de rayonnement	34
II.6.2 Récepteur VLC	35
II.6.2.1 Les Caractéristiques d'une photodiode (PD)	36
II.6.3 Canal de transmission	37
II.6.3.1 Topologies	37
II.6.3.2 Modélisation d'un canal VLC	38
II.6.3.3 La réponse impulsionnelle $h(t)$	39
II.6.3.4 Gain statique	40

II.6.3.5 La réponse fréquentielle $H(f)$	41
II.7 Les sources de bruits	41
II.7.1 Bruit ambiant	41
II.7.2 Bruit de la photodiode	43
II.8 SNR dans VLC	44
II.9 Les modulations dans VLC	44
II.9.1 La modulation OOK	45
II.9.2 La modulation VPPM	45
II.9.3 La modulation CSK (Color shift keying)	46
II.9.4 La modulation OFDM	47
II.10 Les domaines d'application de VLC	48
II.10.1 Systèmes VLC Indoor	48
II.10.2 Systèmes VLC Outdoor	50
II.11 Standardisation	51
II.12 Activités relatives aux communications VLC menées dans les pays	52
II.13 Conclusion	53
Chapitre III: Résultats de la simulation	
III.1 Introduction	54
III.2 La transmission RF par onde Millimétrique (à 60 GHz)	54
III.3 L'architecture générale du système hybride RF/VLC	55
III.4 Présentation du logiciel OptiSystem	57
III.5 Description des principaux critères d'évaluation:	58
III.4.1 Diagramme de constellation	58
III.5.2 Taux d'erreurs binaires:	59

III.6	Présentation de la liaison hybride RF/VLC sous l'OptiSystem	59
III.6.1	La station de base (BS)	60
III.6.2	Le canal de transmission:	62
III.6.3	La partie de réception (chez l'utilisateur)	64
III.7	Résultats de la simulation	65
III.8	Etude des performances du système hybride RF/VLC	69
III.8.1	Performances liées aux paramètres globales du système	70
III.8.2	Performances liées aux paramètres du canal VLC	71
III.8	Conclusion	77
	Conclusion générale	78
	Reference bibliographies	80
	Liste des acronymes	85
	Annexe : Guide de projet	

Liste des figures

Chapitre I: Généralités sur la technologie 5G	
Figure I.1 : Architecture avancé des services de téléphonie mobile (AMPS), Téléphonemobile 1G	5
Figure I.2 : Architecture de réseau GSM.	7
Figure I.3 : Hiérarchie des cellules de l'UMTS	10
Figure. I.4 : L'architecture de l'UMTS.	11
Figure I.5 : Architecture générale d'un LTE.	14
Figure I.6 : Architecture de réseau 5G	17
Figure I-7 : Architecture fonctionnelle du réseau 5G.	18
Figure I.8 : Les principales technologies mises en œuvre pour la 5G	19
Figure I.8 : Beamforming	19
Figure I.9 : Un système MIMO traditionnel	20
Figure 1.10 : Système MIMO Massive	20
Figure I.11 : Bande de fréquence utiliser pour la 5G.	21
Figure I.12 : Atténuation spécifique de l'O ₂ , de l'H ₂ O et de la pluie au niveau de la mer	23
Figure I.13 : Répartitions temps et fréquence dans le Half-duplex et le Full-duplex.	24
Figure I.14 : Réseau mobile sans fils illustrant la technologie des Small-cell	25
Figure I.15 : L'accès multiple non orthogonal (NOMA)	26
Figure I.16 : Comparaisons des systèmes optiques (VLC) et RF	27
Chapitre II: Communications par lumière visible (VLC)	
Figure II.1 : Spectre électromagnétique	29
Figure II.2 : Le principe de fonctionnement du photophone par Graham Bell	29
Figure II.3 : Principe de fonctionnement d'un système VLC	32

Figure II.4 : Schéma fonctionnel d'un système VLC	33
Figure II.5 : Illustration de l'ordre de rayonnement m d'une source LED	35
Figure II.6 : Illustration liaisons émetteur-récepteur	37
Figure II.7 : Modèle équivalent en bande de base d'un système optique sans fil IM/DD.	38
Figure II.8 : Spectres de puissance optique des différentes sources courantes de bruit	41
Figure II.9 : La modulation OOK.	45
Figure II.10 : La modulation VPPM	46
Figure II.11 : La modulation CSK	47
Figure II.12 : Utilisation de la VLC dans l'avion	48
Figure II.13 : Utilisation du VLC pour la localisation intérieure	49
Figure II.14 : Illustration des systèmes VLC appliqués au domaine médicale	49
Figure II.15 : Exemple d'un système Li-Fi	50
Figure II.16 : Communication V2V et I2V	51
Figure II.17 : Utilisation de VLC dans la communication sous-marine	51
Chapitre III: Résultats de la simulation	
Figure III. 1 : Spectre ULB pour la bande millimétrique entre 57 et 66 GHz	55
Figure III.2 : Le système hybride RF/VLC à sauts multiples	56
Figure III.3 : L'architecture générale de la liaison RF/VLC proposée.	57
Figure III. 4 : Diagramme de constellation de 16-QAM.	59
Figure III. 5 : L'architecture générale de la liaison RF/VLC simulé par Optisystem.	60
Figure III. 6 : La station de base (BS)	61
Figure III. 7 : Canal de transmission	62
Figure III.8 : La partie de réception	64

Figure III. 9 : Le signal binaire d'origine (a), et le diagramme de constellation du signal codé 16-QAM (b).	66
Figure III. 10 : Le signal OFDM initial	66
Figure III. 11 : Signal OFDM filtré	66
Figure III.12 : Le spectre du signal à la sortie du modulateur en quadrature	67
Figure III.13 : Le spectre du signal à la sortie du multiplicateur	67
Figure III. 14 : Spectre à la sortie de la LED	68
Figure III.15 : Le spectre optique à la sortie du MZM	68
Figure III.16 : Le spectre optique à la sortie de canal VLC	68
Figure III.17 : Le signal reçu à la sortie de la PD	69
Figure III.18 : Le signal à la sortie du démodulateur en quadrature	69
Figure III. 19 : Le signal à la sortie du démodulateur RF	69
Figure III. 20 : Diagrammes de la constellation du signal reçu.	70
Figure III.21 : BER en fonction de SNR	70
Figure III. 22 : La réponse impulsionnelle	71
Figure III. 23 : La réponse fréquentielle	71
Figure III.24 : La puissance reçue en fonction de l'angle à mi- puissance (Transmitter half-angle) ($\phi_{1/2}$)	72
Figure III.25 : La puissance reçue en fonction de l'angle à mi-irradiance (irradiance half-angle) pour $\phi_{1/2} = 45^\circ$, et $\phi_{1/2} = 60^\circ$	73
Figure III.26 : La puissance reçue en fonction de FoV (incidence half-angle) pour $\phi_{1/2} = 45^\circ$, et $\phi_{1/2} = 60^\circ$	73
Figure III.27 : Distribution de la puissance optique reçue pour 1 LED (pour $\phi_{1/2} = 12,5^\circ$)	74
Figure III.28 : Distribution de la puissance optique reçue pour 4 LED : pour $\phi_{1/2}$ (a) $12,5^\circ$ et (b) 60° .	75
Figure III.29 : Distribution du SNR dans la pièce pour $\phi_{1/2}$ (a) $12,5^\circ$ et (b) 60°	76

Liste des Tableaux

Chapitre I: Généralités sur la technologie 5G	
Tableau I. 1 : Les avantages et les inconvénients de 1G	6
Tableau I.2 : Equipements du réseau GSM et leurs fonctions.	8
Tableau I. 3 : Les avantages et les inconvénients de GSM	8
Tableau I. 4 : Les avantages et les inconvénients de GPRS	8
Tableau I. 5 : Les avantages et les inconvénients de EDGE	9
Tableau. I.6 : Caractéristiques de la norme GSM et ses évolutions	9
Tableau I.7 : Les différentes entités de l'architecture UMTS	11
Tableau. I.8 : Caractéristiques de la norme 3G et ses évolutions	12
Tableau I. 9 : Les avantages et les inconvénients de 3G	13
Tableau I.10 : Les entités LTE	14
Tableau I.12 : Description des fonctions du réseau 5G.	18
Tableau I. 12 : Caractéristiques des différents types de cellules	25
Chapitre II: Communications par lumière visible (VLC)	
Tableau II.1 : Comparaison entre LED et LD	34
Tableau II.2 : Caractéristiques de la LED.	34
Chapitre III: Résultats de la simulation	
Tableau III. 1 : Caractéristique du modulateur QAM	61
Tableau III. 2 : Caractéristique du modulateur OFDM	61
Tableau III. 3 : Caractéristique du filtre passe bas	61
Tableau III. 4 : Caractéristique du modulateur quadratique	62
Tableau III.5 : Caractéristique du générateur de sinus	62
Tableau III. 6 : Caractéristique du Mach-Zender	63

Tableau III. 7 : Caractéristique de la LED	63
Tableau III. 8 : Caractéristique de la lumière blanche	63
Tableau III. 9 : Caractéristique du canal VLC	63
Tableau III. 10 : Caractéristique de la photodiode	64
Tableau III. 11 : Caractéristique de l'amplificateur	64
Tableau III. 12 : Caractéristique du démodulateur quadratique	65
Tableau III. 13 : Caractéristique du démodulateur OFDM	65
Tableau III. 14 : Caractéristique du démodulateur QAM	65

Introduction générale

Introduction générale

Depuis le début des années 2000, on observe dans notre vie une augmentation exponentielle de la présence d'objets connectés. L'évolution des réseaux et des techniques de communications ont permis d'étendre le champ des possibles, offrant à chacun un accès de plus en plus rapide aux informations. Cette accessibilité permet aujourd'hui d'améliorer la qualité de vie quotidienne. On peut notamment citer les nombreuses applications et gadgets permettant de suivre son activité physique, commander ses appareils électroménagers à distance depuis son portable ou encore discuter avec des personnes éparpillées dans le monde entier. Cependant, cette avancée se heurte à certaines contraintes au fil du temps. Plus précisément, l'augmentation rapide du nombre d'appareils de communication et la généralisation des services à haut débit conduisent à une saturation du spectre associé aux radiofréquences RF (de quelques kHz à 300 GHz). Cette saturation du spectre RF entraîne une diminution des performances et une augmentation des interférences, limitant ainsi la vitesse de transmission et la capacité des réseaux Wi-Fi, des réseaux cellulaires et d'autres technologies RF traditionnelles à répondre aux besoins croissants des utilisateurs. Par conséquent, les communautés de la recherche et de l'industrie ont commencé à travailler sur la conception d'une toute nouvelle génération de technologie mobile appelée réseau mobile de cinquième génération 5G. Le principal objectif de cette nouvelle norme est d'améliorer la capacité et les performances de transmission de 1000 fois par rapport aux technologies existantes [1]. Les systèmes de 5G intègrent de nombreuses méthodes pour faire face à la montée en charge de la connexion tout en essayant de réduire le coût de l'énergie. Une technologie complémentaire aux fréquences radio supérieures à 300 GHz pourrait être utilisée pour résoudre le problème. C'est le domaine de l'optique sans fil. L'intérêt d'utiliser l'optique sans fil dans le contexte des réseaux 5G est celui des communications par lumière visible VLC (Visible Light Communications).

La communication VLC utilise des luminaires à LED comme points d'accès à haut débit. Elle est particulièrement adaptée aux environnements intérieurs (Indoor) tels que les salles intelligentes à haute sécurité, où les données à haut débit sont transmises en modulant l'intensité lumineuse de manière imperceptible à l'œil humain. Le spectre visible de la lumière offre une bande passante de centaines de Téra-hertz et est sans licence ni réglementation, ce qui en fait une option viable qui peut s'intégrer à l'infrastructure existante [2].

On note également l'importance de l'application de la technologie VLC dans les milieux sensibles comme les établissements de santé et les hôpitaux, où la communication sans fil RF pose des problèmes de sécurité et de dangerosité très importante. Les ondes RF (Wi-Fi) dans

les hôpitaux interfère/bloque les signaux des équipements de surveillance. Par conséquent, cela peut avoir un impact sérieux sur la santé du patient, en raison d'un mauvais fonctionnement du dispositif médical. Pour surmonter cela, comme les ondes optiques n'interfèrent pas avec les appareils à radiofréquence RF, le Li-Fi basé sur la VLC peut être utilisé en toute sécurité pour accéder à Internet ainsi pour contrôler les équipements médicaux, par exemple, dans les chambres de patients, les salles de radiologie et les blocs opératoires. La technologie VLC permettra un réseau de communication léger, ce qui éliminera les problèmes d'interférences électromagnétiques des smartphones et de l'utilisation du Wi-Fi. Un réseau basé sur VLC peut également être utilisé pour la surveillance en temps réel des mouvements et des signes vitaux du patient sans avoir besoin de câbles. Cependant, la VLC autonome a des limites en termes de couverture réseau, tandis que les systèmes RF offrent une couverture omniprésente. C'est pourquoi les systèmes de communication hybrides RF/VLC exploitent la complémentarité de ces deux technologies [3].

Dans ce travail, en combinant la transmission RF qui est basée sur les ondes millimétriques (mmWave) à 60 GHz pour assurer une large couverture avec la technologie VLC, ces systèmes hybrides RF/VLC permettent d'atteindre les objectifs des réseaux d'accès haute débit de la 5G. Ainsi, la technologie des ondes millimétriques améliore la couverture tout en tirant parti des avantages de la VLC, offrant une solution globale performante.

Notre objectif dans cette étude est d'analyser et d'évaluer les performances d'un système hybride RF/VLC. Pour cela, le sous-système optique (VLC) utilisé dans l'environnement Indoor (à l'intérieur de l'hôpital, comme exemple) et le sous-système radio (RF) utilisé dans l'environnement Outdoor. La source RF à 60 GHz/mmWave sert de transmetteur et de source d'information, tandis que l'appareil mobile de l'utilisateur sert de destination finale pour recevoir des données à haute vitesse depuis le canal VLC. Dans ce système, la technique de multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (OFDM) en collaboration à la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est transportée sur la porteuse RF à 60 GHz/mmWave, et ensuite reçu par le canal VLC. Grâce à cette conception hybride, le système est capable de fournir une transmission de données sans fil robuste et fiable, ce qui en fait une solution intéressante pour les applications en communications sans fil Indoor.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous proposons une introduction à la technologie 5G, en commençant par un aperçu concis de l'évolution des réseaux mobiles depuis la 1^{er} génération

(1G) jusqu'à la 5G, les architectures et les différentes normes des réseaux mobiles sont décrites, une comparaison entre les technologies existantes et les contraintes sont également présentées.

Le deuxième chapitre introduit les communications VLC, de l'origine de cette technologie à son développement, un bref historique est abordé. Dans ce chapitre, toutes les principales caractéristiques de ce type de communication, ses avantages et ses inconvénients, ainsi que son fonctionnement sont détaillés. Les différents types d'applications et de recherches autour de cette technologie appliquée au domaine du visible sont également illustrés.

Le troisième chapitre de ce mémoire se concentre sur l'étude d'un système hybride RF/VLC pour les applications Indoor (dans une pièce à l'hôpital), dans le but d'améliorer les performances du réseau d'accès 5G. Cette partie est commencée par la description et l'analyse du système RF/VLC proposé. Ensuite, nous étudions la qualité de transmission des signaux numériques complexes de type OFDM ou chaque sous-porteuse est modulée indépendamment en utilisant des modulations numériques QAM, suivi d'une modulation analogique à la fréquence de 60 GHz/mmWave, par une porteuse optique visible. Enfin, nous évaluons la qualité du signal reçu en termes de diagramme de constellation, du taux d'erreurs binaire (BER - Bit Error Rate) et du rapport signal sur bruit (SNR - Signal-to-Noise Ratio). Les performances des systèmes RF/VLC sont étudiées sous l'impact des paramètres de l'émetteur-récepteur et leurs caractéristiques.

Une conclusion générale clôturera ce mémoire et quelques perspectives à ces travaux sont ensuite données.

Chapitre I :

Généralités sur la technologie 5G

I.1 Introduction

Les réseaux mobiles sont connus une évolution rapide au cours des dernières décennies, passant des réseaux mobiles de première génération (1G) qui ne permettaient que la communication vocale à des réseaux mobiles de cinquième génération (5G) qui offrent des vitesses de téléchargement ultra-rapides et une latence réduite. Cette évolution a été motivée par la demande croissante des utilisateurs pour des services de communication mobiles plus rapides et plus avancés telles que l'Internet des objets (IoT : Internet of Things) et la télémédecine ainsi que par les avancées technologiques dans les domaines de la transmission de données, la connectivité sans fil et la miniaturisation des composants électroniques.

Ce chapitre commence par un bref aperçu sur l'évolution des réseaux mobiles, ensuite on va aborder la technologie 5G, ses différents aspects tels que les technologies, exigences, et spectre. Par ailleurs, nous soulignerons l'utilisation de l'optique sans fil dans la 5G.

I.2 Evolution des réseaux mobiles

Un réseau mobile ou un réseau cellulaire est un système de communication sans fil utilisant des fréquences radio (RF) pour permettre à des millions d'utilisateurs de téléphoner et de communiquer en mouvement, sans contrainte d'immobilité. Les réseaux mobiles sont basés sur le concept de cellule, qui consiste à répartir les zones de couverture en cellules géographiques, chacune étant desservie par une station de base qui fournit la couverture nécessaire pour la transmission de la voix et des données. Ce concept permet de réutiliser les ressources de réseau de manière efficace, en dimensionnant les cellules selon des tailles plus ou moins importantes en fonction de la densité de population et de la demande de trafic [1].

À ce jour, il y a eu cinq différentes générations de communications radio mobiles. La première génération (1G) de technologie de la téléphonie sans fil est la norme analogique de la téléphonie cellulaire qui a été introduite dans les années 80 et qui a continué à exister jusqu'à son remplacement par la deuxième génération à la fin des années 1990. Le réseau mobile de deuxième génération (2G) vient surmonter les limites de la 1G en se concentrant principalement sur la transmission de la voix et des données avec des signaux numériques. La 2G a utilisé des normes spécifiques telles que GSM (Global System for Mobile Communications), GPRS (General Packet Radio Service), EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution). La troisième génération (3G) a débuté en octobre 2001 avec le lancement du réseau WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) au Japon. La 3G a été développée pour offrir des

taux de transmission de données plus élevés pour les applications telles que l'Internet et les jeux 3D. La 4G est la génération successeur de la 3G et est surnommée "génération magique". Elle permet aux utilisateurs d'utiliser des services personnalisés pour le mobile multimédia à des débits de données plus élevés que les générations précédentes. La cinquième génération (5G), quant à elle, est un système de communication mobile sans fil qui couvre des zones étendues avec un haut débit. Par conséquent, elle est appelée comme monde réel sans fil ou sans fil World Wide Web (WWW) [2].

I.2.1 La Première Génération (1G)

La première génération de téléphonie mobile (1G) possède un fonctionnement analogique. On y retrouve essentiellement les standards suivants [3]. :

- AMPS (Advanced Mobile Phone System) apparu aux USA, constitue le premier standard des réseaux de 1G, il possède de faibles mécanismes de sécurité rendant possible le piratage des lignes téléphoniques.
- TACS (Total Access Communication System) est la version européenne du standard AMPS utilisant une bande de fréquence de 900 MHz.
- ETACS (Extended Total Access Communication System) est une version améliorée du standard TACS, il a été développé au Royaume-Uni et permet l'utilisation d'un nombre plus important de canaux de communications.

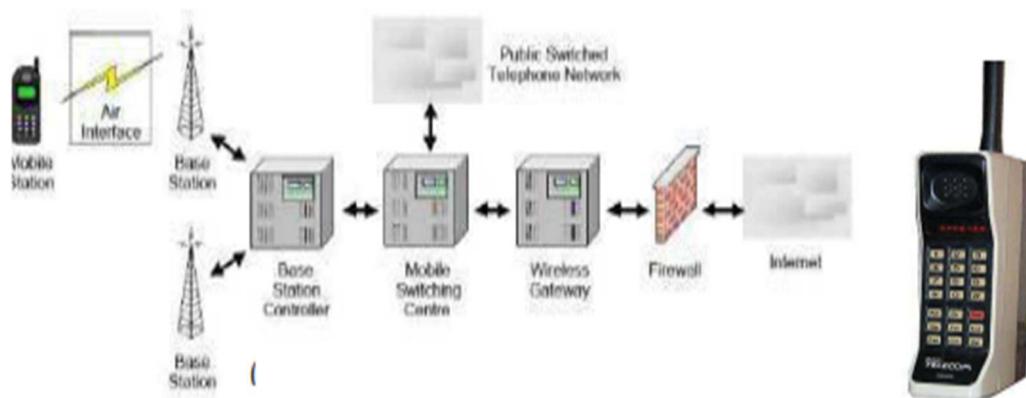


Figure I.1 : Architecture Avancé des services de téléphonie mobile (AMPS), Téléphone mobile 1G

➤ **Caractéristiques techniques [4] :**

- Les canaux de contrôle sont des canaux de données opérant à 10 kbit /s.

- Les canaux voix transportent les communications par signaux analogiques modules en fréquence.
- Bande de transmission de la station de base : 869 à 894 MHz.
- Bande de transmission du mobile : 824 à 849 MHz.
- Espacement entre canaux montant et descendant : 45 MHz.
- Largeur de bande d'un canal : 30 KHz.
- Puissance maximale du mobile : 3W.
- Taille d'une cellule : 2 à 20 Km.
- Débit de transmission : 10 kbits /s.

➤ Avantages et inconvénients

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>1er radiotéléphone analogique sans fils.</i>	<i>Taille imposante des équipements.</i>
	<i>Pas de confidentialité de communications.</i>
	<i>Réseaux saturés.</i>

Tab I. 1 : Les avantages et les inconvénients de 1G [5]

I.2.2 La Deuxième génération (2G)

Profitant du développement des techniques de codage numérique de la parole, la deuxième génération 2G est caractérisée par l'usage de la technologie numérique qui permet de résoudre les problèmes de capacité et de sécurité inhérents aux 1G, tout en augmentant le nombre des services avancés disponibles [6].

Le principal standard de téléphonie mobile 2G est le GSM. Baptisé "Groupe Spécial Mobile" à l'origine de sa normalisation en 1982, il est devenu une norme internationale nommée "Global System for Mobile communications" en 1991. Le système GSM fonctionne de par le monde dans différentes bandes. En Europe, le standard GSM utilise les bandes de fréquence de 900 MHz pour le GSM 900 et 1800 MHz pour le DCS (Digital Communication System). Aux Etats-Unis, la bande de fréquence utilisée est la bande 1900 MHz : le standard est appelé PCS (Personal Communication System). La norme GSM autorise un débit maximal de 9,6 Kbits/s, ce qui permet de transmettre la voix ainsi que des données numériques de faible volume (par

exemple : SMS pour Short Message Service) [7]. Les techniques de multiplexage associées au GSM sont : FDMA (Frequency Division multiple Access), essentiellement utilisée dans les réseaux analogiques et TDMA (Time Division multiple Access).

I.2.2.1 Réseau GSM [8]

Un réseau GSM compte une (ou plusieurs) station de base par cellule. La station mobile choisit la cellule selon la puissance du signal. Une communication en cours peut passer d'une cellule à l'autre permettant ainsi la mobilité des utilisateurs. On peut diviser le réseau GSM en quatre parties principales :

- La station mobile : MS (Mobile Station).
- Le sous-système radio : BSS (Base Station SubSystem).
- Le sous-système réseau : NSS (Network Subsystem).
- Le sous-système opération : OSS (Operation SubSystem).

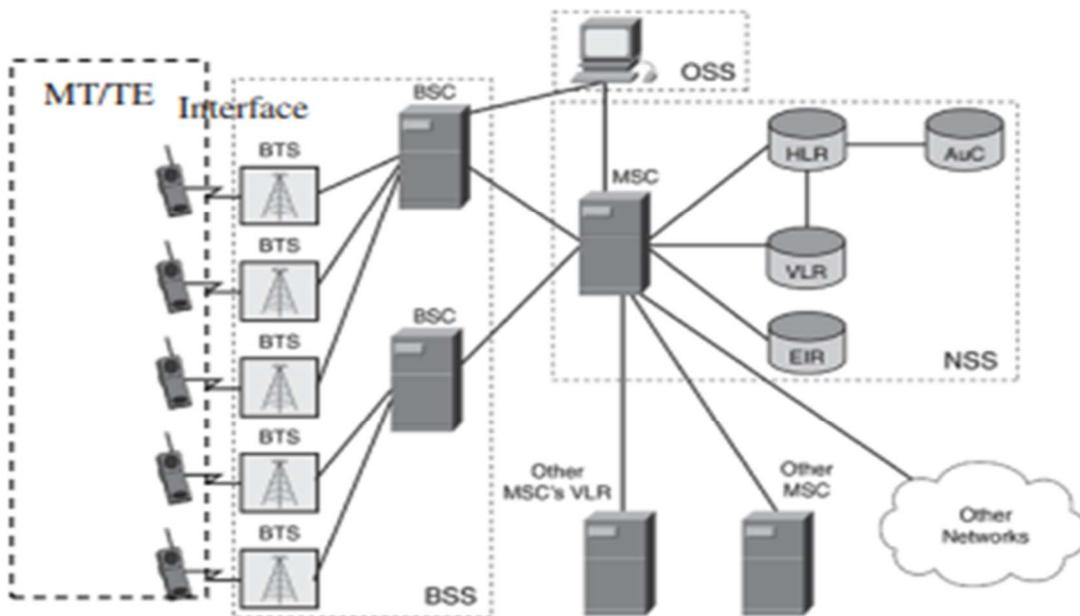


Figure I.2 : Architecture de réseau GSM.

➤ Equipements dans un réseau GSM

Les principaux équipements utilisés dans le réseau GSM sont regroupés dans le tableau suivant adaptabilité du réseau aux évolutions (trafic, technologies, services, ...).

Nom	Fonction
BTS	Station de base réceptionnant les appels entrant et sortant des ME
BSC	Contrôleur des stations de base
MSC	Commutateur de réseau
HLR	Base de données sur l'identité et la localisation des abonnés
AUC	Centre d'authentification des terminaux sur le réseau
VLR	Base de données sur les visiteurs du réseau
EIR	Enregistreur des identités des équipements
OMC	Centre d'exploitation et de maintenance du réseau de l'opérateur
MS	Station mobile
SIM	Carte SIM identifiant l'abonné sur un réseau défini.

Tab I.2 : Equipements du réseau GSM et leurs fonctions.

➤ **Avantages et inconvénients :**

Avantages	Inconvénients
Meilleure qualité d'écoute	Débit : envoi de données lentes
Taille réduite	
Confidentialité de la communication	

Tab I.3 : Les avantages et les inconvénients de GSM [5]

I.2.2.2 GPRS 2.5G

Le standard GPRS (General Packet Radio Service), connu sous la génération 2.5G. Il fonctionne en parallèle avec le réseau GSM en conservant son infrastructure pour le transport du trafic voix avec un transfert de données réalisé par paquet via le protocole IP ou le protocole X.25 et dont la transmission fait appel au réseau GSM que lorsque cela est nécessaire. L'évolution apportée par ce standard réside principalement dans le débit binaire qui atteint 170.2 Kbits/s en théorie mais il est porté à environ 50 Kbits/s en pratique [9].

➤ **Avantages et inconvénients :**

Avantages	Inconvénients
Débit	Pas d'accès satisfaisant à internet
Accès WAP (internet allégée)	Réseau GSM déjà saturés
Facturation à la donnée	Aucune application décisive pour le grand public
Connexion permanente possible	
Support de plusieurs niveaux de qualité de service	

Tab I.4 : Les avantages et les inconvénients de GPRS [5]

I.2.2.3 EDGE 2.75G

Pour améliorer encore l'efficacité du transfert de données, le GPRS s'est ensuite évolué vers un autre standard normalisé sous le nom d'EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) ou la génération 2.75G. Pareillement, cette norme permet la transition de la voix sur le canal radio du réseau GSM mais, utilise une modulation différente (8-PSK) qui lui permet d'améliorer le débit binaire avec un taux de transmission de 384 kbit/s et ouvrant ainsi la porte aux applications multimédias comme la vidéo mobile [10].

➤ **Avantages et inconvénients :**

Avantages	Inconvénients
Solution alternative moins onéreuse que la 3G	Obligation de changer de terminal

Tab I. 5 : Les avantages et les inconvénients de EDGE [5]

Le tableau suivant montre les caractéristiques de la norme 2G et ses évolutions.

Génération	2G	2.5G	2.75G
Fréquences (MHz) Tx: Transmission Rx: Réception	GSM 450 450.4-457.6 (Tx) 460.4-467.6 (Rx)	GSM 900 880-915 (Tx) 925-960 (Rx)	GSM 1900 (PCS) 1850-1910 (Tx) 1930-1990 (Tx)
	GSM 480 478.8-486 (Tx) 488.8-496 (Rx)	GSM 1800 (DCS) 1710-1785 (Tx) 1805-1880 (Rx)	
Mode de duplexage	FDD		
Méthode d'accès	TDMA/FDMA		
Largeur d'un canal	200 KHz		
Type de modulation	GMSK	GMSK	GMSK, 8PSK
Type de commutation	Circuit	Paquet	Paquet
maximum maximum théorique	14.4 kbit/s	171.2 kbit/s	384 kbit/s
Débit généralement constaté		35 à 40 kbit/s	110 à 130 Kbit/s

Tab. I.6 : Caractéristiques de la norme GSM et ses évolutions [7]

I.2.3 La troisième génération (3G) :

La troisième génération (3G) connue sous le nom UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) à révolutionner le monde des télécommunications et des réseaux mobiles universels, en proposant de différentes gammes de services telles que la voix, l'envoi de données (internet). En effet, l'objectif de cette technologie est d'apporter des améliorations aux différentes technologies existantes telles que, GSM, GPRS et EDGE afin d'optimiser la qualité de service rendue à l'abonné, cette amélioration est concentrée sur l'augmentation de débit (vitesse de transfert) en atteignant jusqu'à 2 MBit/s. Les réseaux 3G utilisent des bandes de fréquences différentes des réseaux précédents : 1885-2025 MHz et 2110-2200 MHz.

Ce standard est venu satisfaire le besoin et la demande exigeante des utilisateurs en termes de services offerts. En effet, les usagers de nos jours ne se contentent plus des services vocaux et aux SMS mais plutôt désirent accéder à l'information, quel que soit son type, n'importe où et n'importe quand, d'une manière rapide et efficace [11].

Comme le réseau GSM, l'UMTS est sectionné en plusieurs cellules de tailles variables comme l'indique la figure I.3, Chacune d'entre elles est fonction de la densité de population à servir et de la vitesse de mobilité. L'accès par satellite est une extension [2].

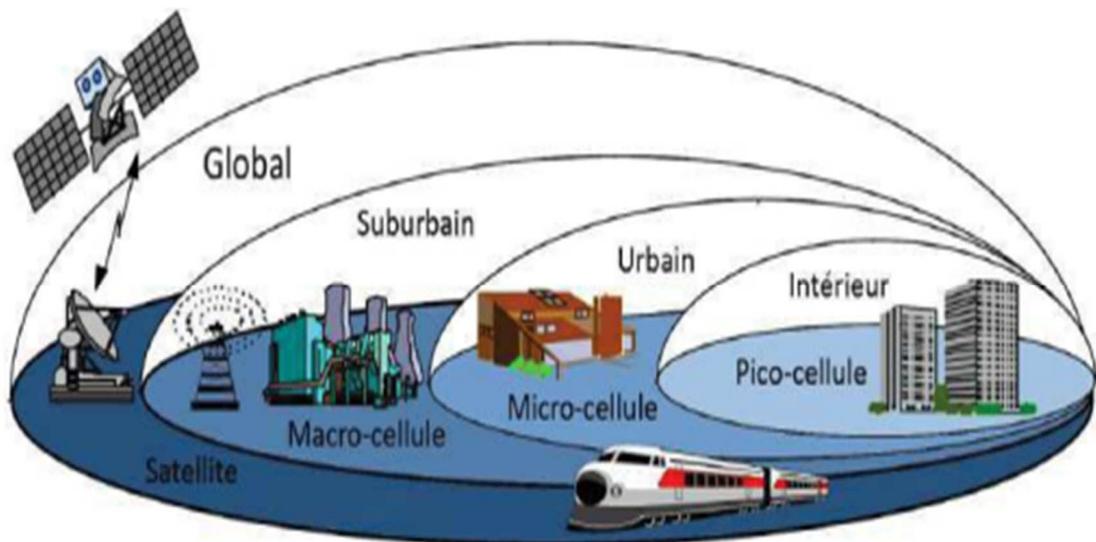


Figure I.3 : Hiérarchie des cellules de l'UMTS [12].

Le débit dépend de la vitesse de l'utilisateur supportée par une cellule particulière [2] :

- Macro-cellule : 144 Kb/s pour 500 Km/h
- Micro-cellule : 384 Kb/s pour 120 Km/h
- Pico-cellule : 2 Mb/s pour 10 Km/h

➤ **Architecture de réseau UMTS**

Le réseau UMTS est composé de trois domaines comme l'illustre la figure I.4 : le réseau cœur (Core Network) et le réseau d'accès radio UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) et le domaine UE (User Equipement).

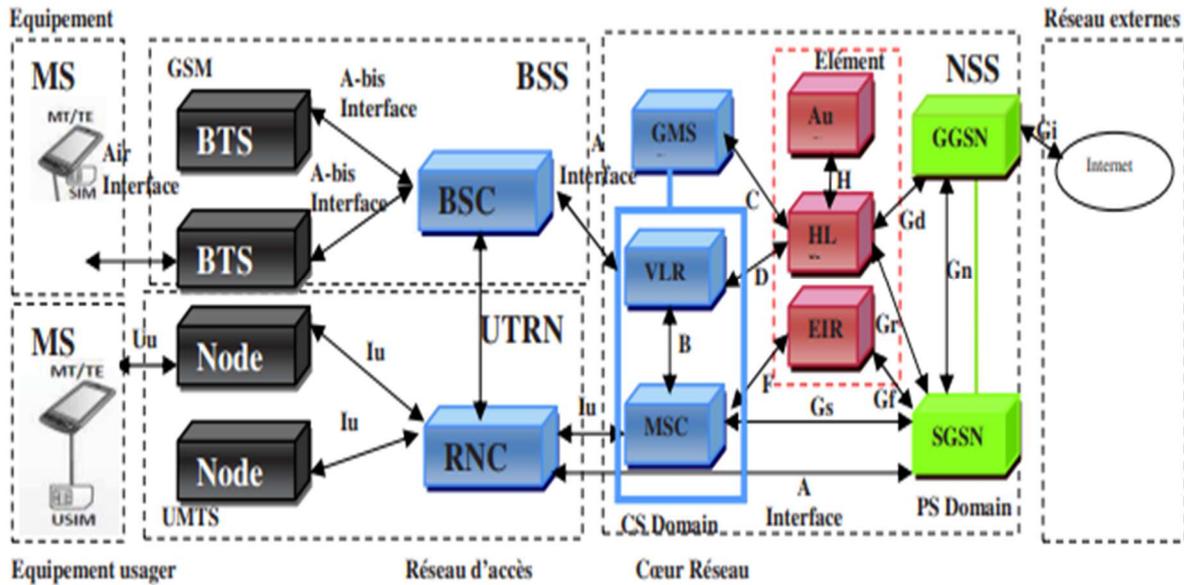


Figure. I.4 : L'architecture de l'UMTS.

Les différentes entités de l'architecture UMTS sont données dans le tableau suivant :

ARCHITECTURE GSM-GPRS	ARCHITECTURE UMTS
BSC : Base station controller	RNC : Radio Network Controller
MS : Mobile station	UE : User Equipment
BTS : Base Transceiver Station	NodeB
MSC : Mobile-services Switching Center	U-MSC : UMTS – MSC

Tab I.7 : Les différentes entités de l'architecture UMTS

En quelques années, des extensions ont été mises au point afin d'améliorer les débits proposés. On observe notamment trois sous-technologies 3G [13] :

- Le HSPA (High Speed Packet Access), parfois appelé génération 3,5G, qui se caractérise par une évolution de l'UMTS pour un débit maximum théorique de 14,4 Mbit/s et pratique d'environ 3,6 Mbit/s).
- Le HSPA+ (High Speed Packet Access +), parfois appelé génération 3,75 G, qui se caractérise par un débit maximum théorique de 21 Mbit/s et pratique d'environ 5 Mbit/s).

- Le DC-HSPA+ (Dual-Cell High Speed Packet Access+), également appelé génération 3,75 G, qui se caractérise par un débit maximum théorique de 42Mbit/s et pratique de plus de 10 Mbit/s.

Le standard 3G, occupe une large bande passante. Pour cela, il utilise un protocole de transfert de données en mode paquet via l'interface radio W-CDMA. Cette technique d'accès multiple large bande par répartition de code, se distingue du TDMA et FDMA par le fait que les signaux des utilisateurs présents dans la cellule, sont émis en même temps et à la même fréquence, grâce à un code qui leur est attribué. Cependant, le réseau 3G est aussi appelé UMTS-FDD et UMTS-TDD. Cette appellation, fait référence aux deux modes de duplex qu'il utilise. Pour [14] :

- Le duplex fréquentiel (FDD, Frequency Division Duplex) ; Il dispose de deux bandes de fréquences indépendantes pour l'émission et la réception (une pour la liaison montante et une autre pour la liaison descendante).
- Le duplex temporel (TDD, Time Division Duplex) ; l'opération s'effectue sur la même fréquence porteuse mais à des instants différents.

Les caractéristiques de 3G et ses évolutions sont tous résumées dans le tableau suivant :

Technologie	W-CDMA	HSDPA	TD-CDMA	TD-SCDMA
Génération	3G	3.5G	3G	3G
Fréquences (MHz) Tx: Transmission Rx: Réception	IMT-2000: 1920-1980 (Tx) 2110-2170 (Rx) Bande 1900: 1850-1910 (Tx) 1930-1990 (Rx)	Bande 1800 1710-1785 (Tx) 1805-1880 (Rx)	IMT-2000: 1900-1920 2010-2025 2300-2400	1785-1805 1880-1900
Méthode de duplexage	FDD		TDD	
Méthode d'accès	CDMA			
Largeur d'un canal	5 MHz		5 MHz	1.6 MHz
Type de modulation	QPSK	QPSK, 16QAM	QPSK	
Type de commutation	Circuit et paquet	paquet	Paquet	Circuit et paquet
Débit maximum théorique	384 kbits/s à 2 Mbits/s	14.4 Mbits/s	12 Mbits/s	128 kbits/s à 2 Mbits/s
Débit constaté	384 kbits/s	2 Mbits/s	128 kbits/s à 2 Mbits/s	

Tab. I.8 : Caractéristiques de la norme 3G et ses évolutions [7]

➤ **Avantages et inconvénients :**

Avantages	Inconvénients
Accès internet haut-débit depuis un équipement Mobile ou un ordinateur	Cout
Visiophonie	Changement des équipements usagers
Télévision	

Tab I. 9 : Les avantages et les inconvénients de 3G [5]

I.2.4 La quatrième génération (4G) :

Il s'agit d'une nouvelle technologie qui a premièrement été commercialisée utilisant la norme LTE (Long Term Evolution) fin 2009 par l'opérateur téléphonique suédois et finlandais « Telia », c'est une évolution des réseaux GSM/UMTS qui spécifie la prochaine génération du système d'accès mobile à large bande.

Les intérêts majeurs qu'a apportée la 4G par rapport à son antécédent 3G réside dans, l'augmentation considérable du débit qui peut atteindre 100 Mbits/s en liaison descendante et 50 Mbits/s en liaison montante, diminution de latence, et permet d'offrir plus de capacité et une mobilité qui peut aller jusqu'à 350 km/h, et même 500 km/h en fonction de la bande de fréquences. De ce fait, cette technologie a aussi été adoptée en Algérie à partir de l'année 2016 et comptait 9,868 millions d'abonnés à la fin 2017, tous opérateurs inclus [15].

➤ **Architecture de LTE**

La technologie LTE apporte une efficacité spectrale, amélioration de débit ainsi qu'une augmentation de couverture. Cette architecture générale comporte deux générations de réseaux, c'est à dire la 3G et la LTE considère (4G) comme nous montre la figure suivante [16].

On peut constater une différence significative entre les générations de réseaux mobiles tels que la 3G et la LTE en termes d'interface et d'équipements. Cette différence se caractérise notamment par une simplification des équipements utilisés dans la LTE. Par exemple, dans la LTE, seule la partie eNodeB a la même fonctionnalité que la partie UTRAN de la 3G. Cette simplification permet une meilleure efficacité et une réduction des coûts pour les opérateurs de télécommunications.

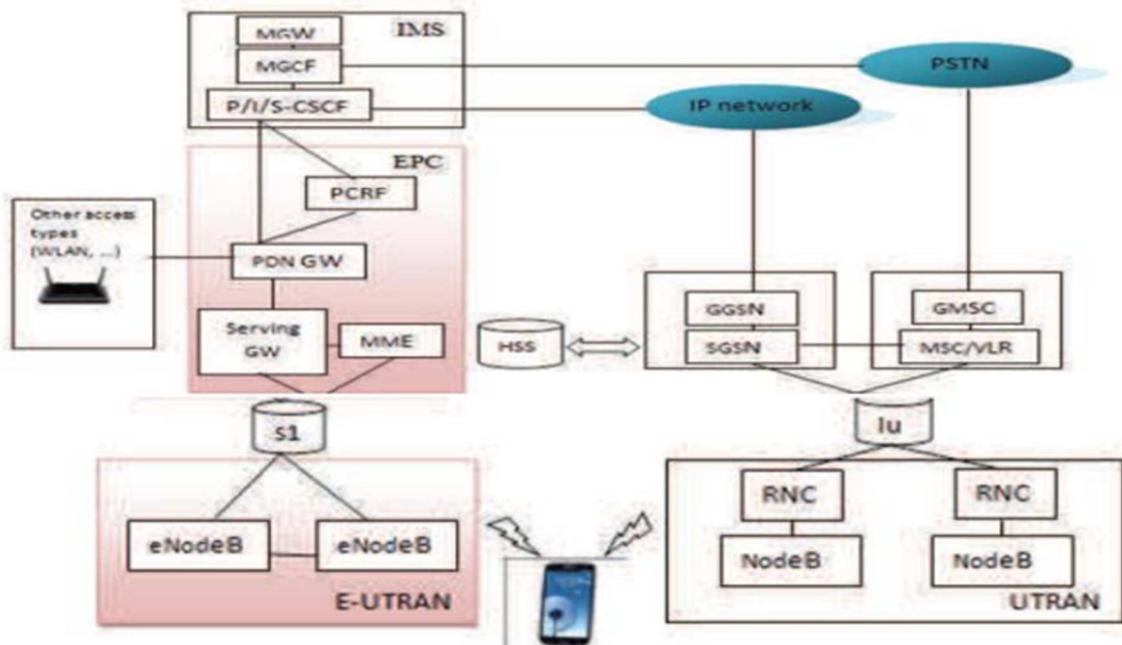


Figure I.5 : Architecture générale d'un LTE.

➤ Les entités LTE

Toutes les entités de LTE sont regroupées dans le tableau suivant :

Entité	La description
MME	Cette partie est responsable de la localisation et la poursuite du terminal mobile (UE) entre les services et la sélection d'une bonne S-GW (Serving-GetWay) a travers une connexion.
s-GW	Un s-GW termine l'interface vers un E-UTRAN
p-GW	Packet-Switch GetWay (P-GW) Fournit la connectivité au terminal mobile (UE) vers le paquet externe du réseau de l'information et alloue les adresses IP d'un UE, ainsi que les applications de la QoS, et maintient la connexion mobile entre LTE/UMTS/GSM systèmes et le non 3GPP système.
HSS	Base de données similaire au HLR en GSM / WCDMA réseau cœur qui contient les informations du suscriber-related (les abonnés voisins), et porte l'appel de control et la session management. Elle est Principalement désignée à l'authentification, l'autorisation, la sécurité, le débit et fournit une localisation détaillée à l'utilisateur.
PCRF	Responsable sur la décision principale du control. Il fournit une QoS d'autorisation pour décider le traitement des données en respectant l'abonnement des utilisateurs.
UE	Un UE se connecte à un eNB via l'interface LTE-Uu.
Enb	Un eNB fournit aux utilisateurs les interfaces radio (partie radio) et exécute des fonctions de gestion des ressources radio (RRM) telles que l'allocation dynamique des ressources.

Tab I.10 : Les entités LTE [17]

La technologie OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) a été incorporée dans la norme LTE car elle permet des largeurs de bande élevées et une transmission efficace tout en offrant un degré élevé de résilience aux réflexions et aux interférences. Les schémas d'accès diffèrent entre les liaisons montantes et descendantes : OFDMA est utilisé dans le sens descendant, tandis que SC-FDMA est utilisé dans le sens montant. La SC-FDMA est utilisée car son rapport de puissance crête à puissance moyenne est faible. De plus, la puissance constante permet une haute efficacité d'amplification de puissance RF (Radio Frequency) dans les terminaux mobiles, ce qui est un facteur important pour la durée de vie des batteries des équipements [18]. Le type de modulation utilisé dans le LTE dépend de l'environnement radio. La modulation varie en fonction de la distance entre l'eNodeB et le mobile. Chaque sous-porteuse est modulée à l'aide de différents niveaux de modulation [19] :

- Downlink : QPSK, 16QAM et 64QAM Modulations
- Uplink : QPSK et 16QAM

L'évolution de la technologie LTE durant les années selon les standards 3GPP :

I.2.4.1 Long Term Evolution-Advanced

Le LTE-Advanced, est aujourd'hui déployé dans beaucoup de pays. Il représente le passage direct de la 3.9 G à la 4G+, où les nouveautés apportées résident principalement sur le délai de latence (qui passe de 30 ms à 10 ms) ainsi que sur la vitesse de données qui atteint théoriquement les 300 Mbit/s, à l'aide d'un canal radio de 100 MHz [14].

I.2.4.2 LTE-Advanced pro

Le standard LTE-A Pro, est encore en cours de développement, qui sera une extension de la 4G+ (4.9G) et dont les attributs clés qui le définiront sont [14] :

- Une vitesse de données supérieure à 3 Gbp/s avec une fréquence porteuse de 640 MHz. Cependant, répondre à ce défi, permettra l'accès à de nouveaux services dans les systèmes de transport intelligents (ITS), notamment la communication entre véhicules.
- Le LTE-A Pro vise aussi à réduire davantage le temps de latence (2 ms), afin d'offrir une meilleure expérience aux abonnés et leur permettre une interconnexion de leurs appareils sans fils (une technologie communément appelée 'Internet of Things (IoT)').

On peut résumer les caractéristiques de LTE comme suit [20] :

- **Débit :**
 - un débit descendant théorique allant jusqu'à 326,4 Mbit/s crête (300 Mbit/s utiles) en mode MIMO 4x4 ;

- un débit montant théorique allant jusqu'à 86,4 Mbit/s crête (75 Mbit/s utiles) ;

▪ **Efficacité spectrale :**

- une efficacité spectrale (nombre de bits transmis par seconde par hertz) trois fois plus élevée que la version de l'UMTS appelée HSPA ;

- un temps de latence RTT (Round Trip Time) proche de 10 ms (contre 70 à 200 ms en HSPA et UMTS). Ceci a été possible grâce à des modulations d'ordre supérieur : QAM-64, 6 bits par symbole OFDM).

▪ **Latence :** Un temps de latence RTT (Round Trip Time) proche de 10 ms (contre 70 à 200 ms en HSPA et UMTS) ;

▪ **Méthodes d'accès :** L'utilisation du codage OFDMA pour la liaison descendante et du SC-FDMA pour la liaison montante (au lieu du W-CDMA en UMTS) ;

▪ **Bandes de fréquence :** la possibilité d'utiliser une bande de fréquence allouée à un opérateur variant de 1,4 MHz à 20 MHz, permet une plus grande souplesse (par rapport à la largeur spectrale fixe de 5 MHz de l'UMTS / WCDMA) ;

I.2.5 La cinquième génération (5G)

La 5G est la nouvelle génération de technologie de télécommunications sans fil, qui fait suite aux précédentes générations de la téléphonie mobile. Elle vise à augmenter la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Selon certaines estimations, la transmission des données sur les connexions hautes débit de cette technologie peut atteindre une vitesse de 20 Gbit/s, supérieure à celle des réseaux filaires, et une latence égale ou inférieure à 1 ms pour les usages à boucle de retour en temps réel [21].

I.2.5.1 Objectifs de la 5G

La 5G est la technologie qui permet les connexions et les téléchargements plus rapides que les autres générations et intègre toute une série de nouveaux usages, la future de la technologie 5G n'y fera pas exception en se concentrant sur l'internet des objets, la 5G vise à [22] :

- Faciliter l'émergence d'un immense écosystème IOT.
- L'amélioration de la vitesse de transmission des données.
- Un temps de latence plus court donne l'impression que le réseau est très réactif (1milliseconde de latence).
- 100% de couverture.
- 90% de réduction en utilisation énergie du réseau.
- Jusqu'à 10 ans de durée de vie de la batterie.

- 1000 fois plus de bande passante par unité de la surface.
- Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface.
- 99,999% de disponibilité.
- La vitesse de transmission des données est double par rapport à 4G.

I.2.5.2. Architecture du réseau 5G et ses services [23]

La figure I-6 décrit l'architecture simplifiée du réseau 5G. Les stations de base sont soit des gNB fournissant des terminaisons de protocoles du plan utilisateur et du plan de contrôle, soit des ng-eNB. Les gNB sont les stations de base 5G natives supportant les fonctionnalités radio 5G par défaut alors que les stations de base ng-eNB sont des stations de base 4G mises à niveau pour supporter les services radio 5G dans le but d'assurer une migration progressive entre les deux standards.

Les stations gNB et ng-eNB sont interconnectées via l'interface Xn. L'ensemble de ces stations constitue le réseau d'accès de nouvelle génération (NG-RAN, Next Generation-Radio Access Network). L'interconnexion des gNB et ng-eNB avec le réseau cœur (5GC, 5G Core) se fait avec les fonctions réseau AMF (Access and Mobility Management Function) et UPF (User Plan Function) du cœur à travers l'interface NG.

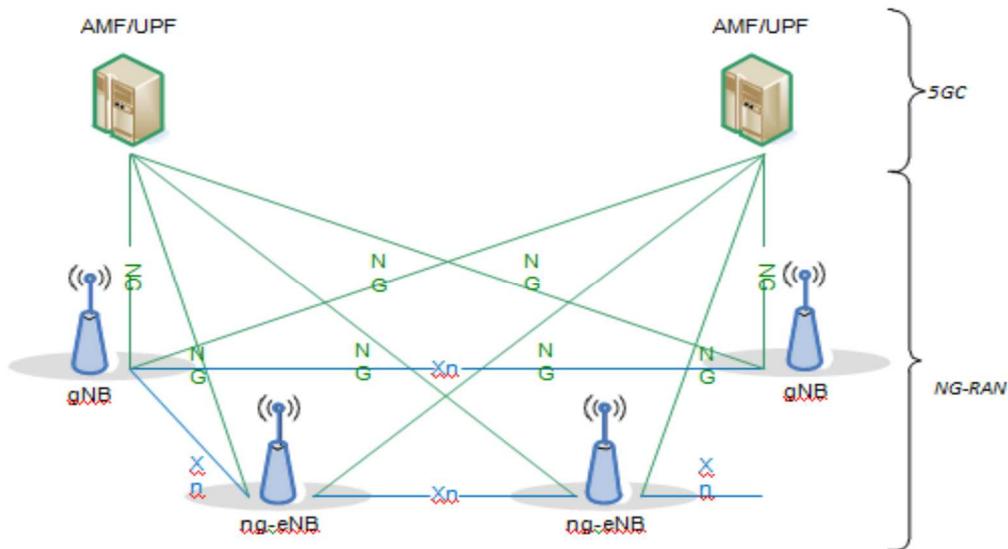


Figure I.6 : Architecture de réseau 5G [23].

La fonction AMF est chargée de la signalisation non liée aux données utilisateur (mobilité, sécurité, ...). Elle supporte des terminaux utilisateurs (UE, User Equipment) avec différents profils de mobilité. L'UPF gère les fonctionnalités liées aux données utilisateur (routage de packets, QoS, reporting du trafic utilisateur...).

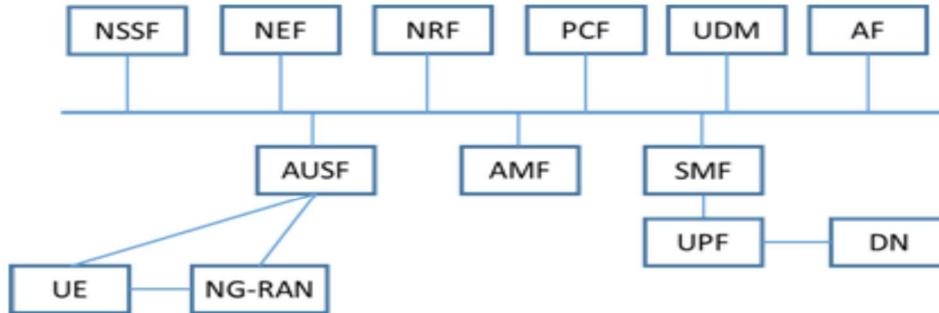


Figure I-7 : Architecture fonctionnelle du réseau 5G.

AMF et UPF sont les fonctions du réseau cœur qui s’interfaçent avec le réseau d’accès. Les autres fonctions du réseau cœur sont représentées sur la figure I-7 qui décrit l’architecture fonctionnelle du réseau 5G. Une brève description de ces fonctions est donnée dans le tableau suivant :

	<i>Nom</i>	<i>Définition</i>
NRF	Network Repository Function	Fournit le support pour la gestion de services pour les fonctions réseau (enregistrement, autorisation, découverte)
NEF	Network Exposure Function	Fournit l’accès externe aux capacités des fonctions réseaux (la surveillance, la supervision, ...)
UDM	Unified Data Management	Stockage de données. Fonctionnalités de séparation entre traitement et stockage
NSSF	Network Slice Selection Function	Sélection et gestion du Network Slicing
AUSF	Authentication Server Function	Gestion de l’authentification
PCF	Policy Control Function	Fournit un cadre unifié pour le contrôle du comportement du réseau
SMF	Session Management Function	Gestion de sessions. Allocation et gestion des adresses IP des UEs
DN	Data Network	Gère l’interaction avec les réseaux de données externes
AF	Application Function	Fonction spécifiée et déployée par l’opérateur pour des services spécifiques

Tab I.12 : Description des fonctions du réseau 5G.

I.2.5.3 Les technologies de la 5G

La 5G reprend les technologies déjà utilisées avec la 4G LTE (tel que les bandes de fréquence de la 4G), mais se différencie sur plusieurs points très importants. Elle également appel à de nouvelles bandes de fréquences comme les ondes millimétriques permettant d'augmenter notablement le débit au détriment de la portée. En plus de cela, la 5G propose de nouvelles technologies comme celles illustre figure I.8

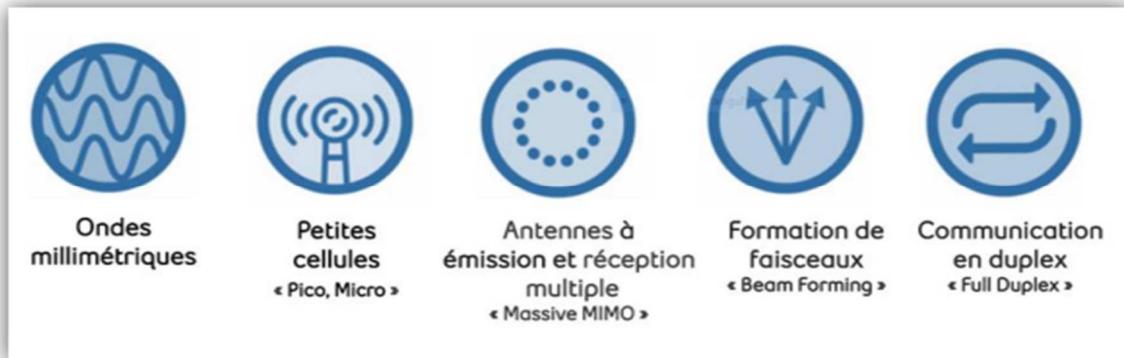


Figure I.8 : Les principales technologies mises en œuvre pour la 5G [24].

a. Beamforming

Le Beamforming est la possibilité d'adapter le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes selon un certain modèle. Cette technologie consiste à focaliser les ondes en direction de chaque objet spécifique. Cette précision réduit les interférences et augmente l'efficacité du signal et donc consomme moins d'énergie, en même temps économise de la bande passante et de l'énergie. La fréquence de chaque faisceau s'adaptera aux besoins des applications [25]. La figure I.9 représenté le Beamforming.

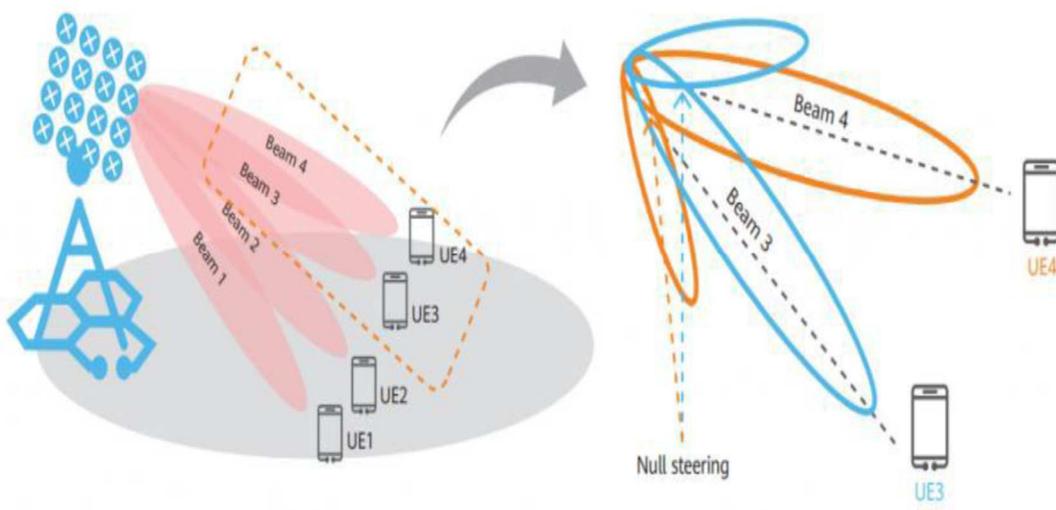


Figure I.8 : Beamforming

b. MIMO Massive (Multiple Inputs-Multiple Output)

Pour atteindre les objectifs en termes de débit élevé, réduction de la consommation énergétique, latence, etc. La combinaison de diverses technologies sera nécessaire. L'une des solutions est l'introduction du MIMO Massive pour la prochaine génération, c'est-à-dire l'utilisation des antennes multiples à échelle massive. La technologie MIMO a suscité un vif intérêt dans la recherche au cours de la dernière décennie et elle a déjà été intégrée pour la première fois dans le standard 3G et ensuite dans le standard 4G avec le MIMO multi-utilisateur (MU) pour la mono-cellule, ou le CoMP (Coordinated MultiPoint transmission) pour la multi-cellule. Cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes, sur le même panneau (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquence supérieures à 6 GHz) permet d'augmenter le débit et focaliser l'énergie sur le terminal [26].

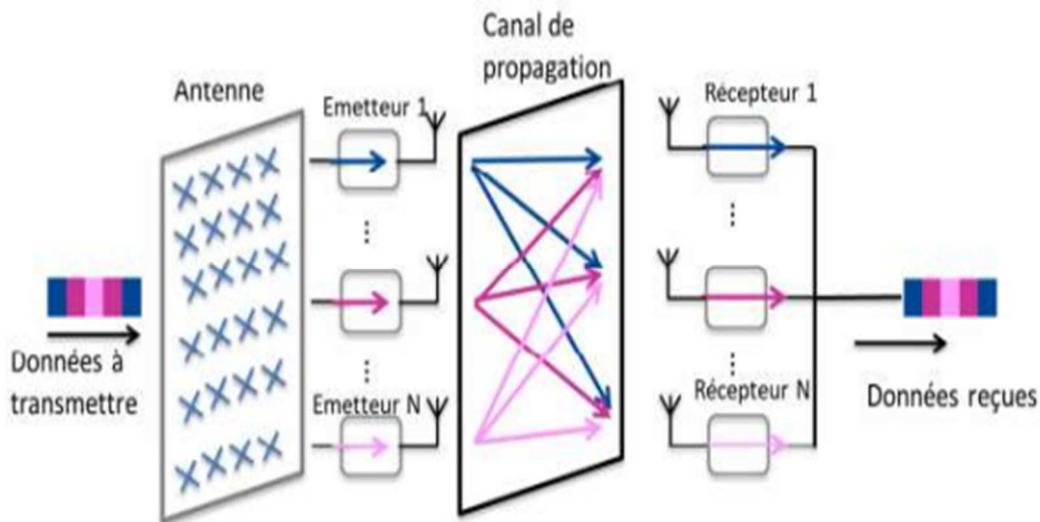


Figure 1.9 : Un système MIMO traditionnel [27]

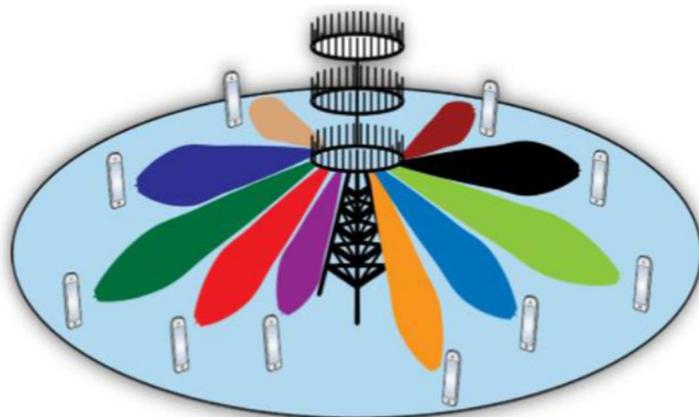


Figure 1.10 : Système MIMO Massive

Le but de cette technologie est d'augmenter les avantages des systèmes MIMO traditionnels parmi ces avantages :

- Gain d'efficacité spectrale élevé ;
- Gain d'efficacité énergétique élevé ;
- Traitement simple ;
- Augmentation du débit de données ;
- Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base ;
- Renforcement des canaux ;

c. Ondes millimétrique (mmWave)

Afin d'assurer une meilleure qualité de service par rapport à celle de la 4G et proposer de nouveaux services, il convient d'abord d'identifier une bande de fréquence prioritaire pour le déploiement des réseaux 5G. Comme la majorité des systèmes mobiles et sans fil utilisent les bandes de fréquences inférieures à 6 GHz, une saturation est possible en raison de la croissance exponentielle du trafic de données sur le réseau. Par conséquent, les bandes de fréquence millimétriques (30 – 300 GHz) suscitent l'intérêt des chercheurs grâce à leur disponibilité et leurs largeurs de bande qui dépassent le 1 GHz [28].

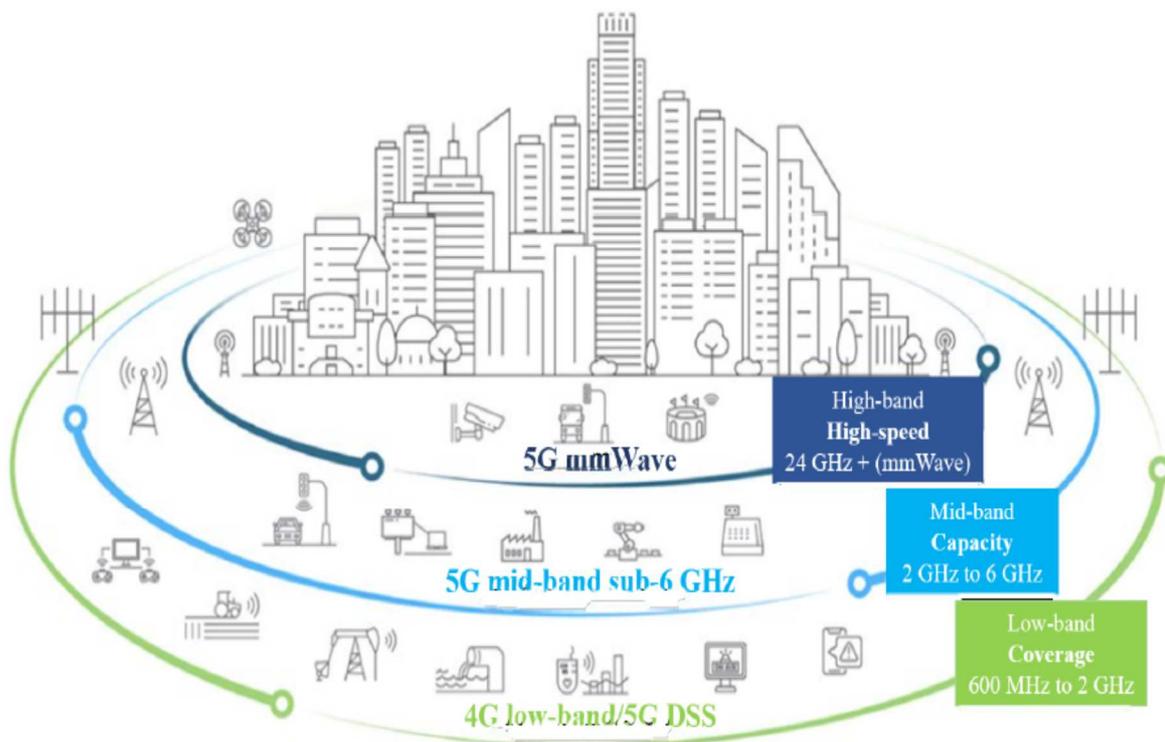


Figure I.11: Bande de fréquence utiliser pour la 5G.

➤ Les avantages de la bande millimétriques

- **Vitesses de transmission de données plus rapides :** Les ondes millimétriques ont des fréquences plus élevées que les ondes radio utilisées dans les réseaux mobiles précédents, ce qui permet des vitesses de transmission de données beaucoup plus rapides. Les vitesses théoriques de la 5G mmWave peuvent atteindre plusieurs gigabits par seconde.
- **Une plus grande capacité de bande passante :** Les ondes millimétriques offrent une bande passante plus large que les ondes radio, ce qui permet une transmission de données plus rapide et plus efficace.
- **Une latence plus faible :** Les ondes millimétriques ont une latence plus faible que les ondes radio, ce qui signifie que les données peuvent être transmises plus rapidement et avec moins de délai.
- **Une meilleure efficacité énergétique :** Les ondes millimétriques permettent une meilleure efficacité énergétique car elles permettent une transmission de données plus rapide et plus efficace, ce qui réduit la consommation d'énergie des appareils mobiles.
- **Une utilisation plus efficace du spectre radioélectrique :** Les ondes millimétriques sont disponibles dans des bandes de fréquences plus élevées qui ont été peu utilisées jusqu'à présent, ce qui permet une utilisation plus efficace du spectre radioélectrique.

➤ Les principales contraintes dans cette bande de fréquence [29]

- Les signaux naturellement atténués sur les distances parcourues par la transmission aérienne. Cette atténuation est proportionnelle au carré de la fréquence du signal.
- Les gaz atmosphériques communs, tels que l'oxygène et la vapeur d'eau, absorbe fortement les signaux de fréquences de 60 GHz.
- La pluie est un obstacle encore plus grand que les gaz, provoquant une atténuation de près de 10 dB / km à toutes les très hautes fréquences et au-dessus.
- Les matériaux les plus dommageables pour la propagation de fréquence sont les matériaux solides. Même voyager sur de courtes distances, les signaux gigahertz perdent beaucoup de puissance lorsqu'ils voyagent dans les matériaux comme la brique, les vitres teintées, les murs intérieurs et les cabines. Les pertes de puissance pourraient facilement être plus de 40 dB d'atténuation.

Ces contraintes limitent la portée des communications en mmWave, des cellules de plus petite taille appliquée pour améliorer l'efficacité spectrale aujourd'hui, c'est pourquoi

les communications mmWave sont principalement utilisées pour les environnements intérieurs, l'accès aux petites cellules et le backhaul avec des cellules de l'ordre de 200 m [30].

La figure I.12 montre les pertes des molécules de H₂O et O₂. On observe que les pertes à 23 GHz et 183 GHz sont d'environ 0.18 dB/Km, 28.35dB/Km respectivement, et de 38.6 dB/Km maximum à 60GHz, 183 GHz et 323 GHz.

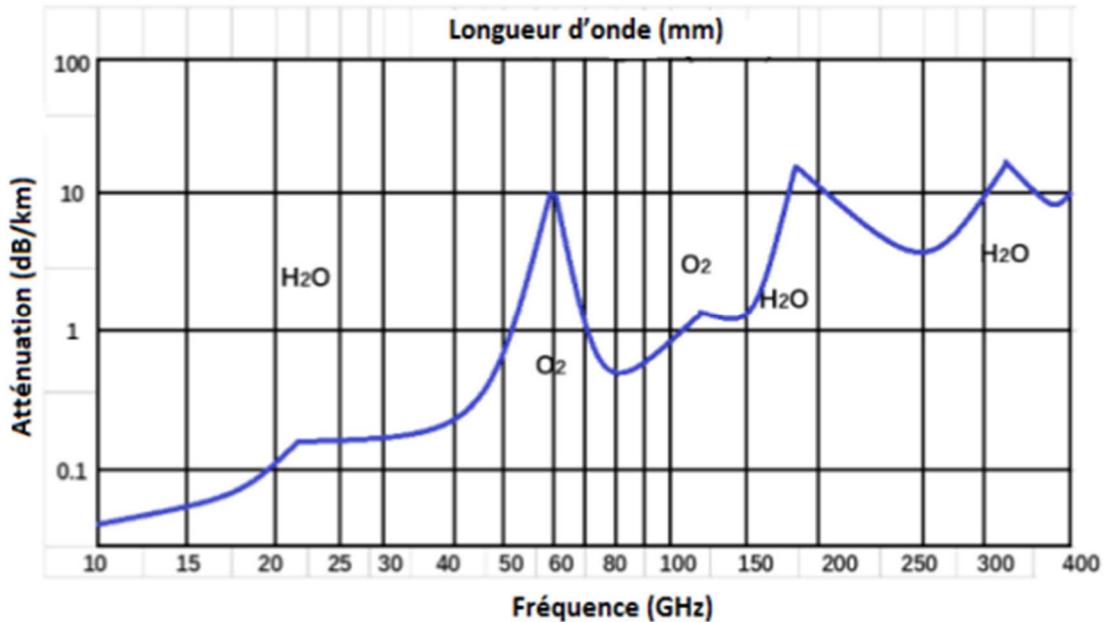


Figure I.12: Atténuation spécifique de l'O₂, de l'H₂O et de la pluie au niveau de la mer [31].

d. Communications en FD (Full-Duplex)

Dans les réseaux mobiles sans fil actuellement déployés, le support sans fil est une ressource partagée dans le temps ou par répartition de fréquence en Half-Duplex. Cela nécessite une transmission et une réception des signaux qui se font dans deux intervalles de temps séparés ou dans deux bandes de fréquences différentes. Sans oublier que l'émetteur-récepteur ne peut pas transmettre et recevoir un signal en même temps à la même fréquence. L'ensemble de ces éléments limite considérablement, la capacité des réseaux cellulaires. Par contre la technologie Full-duplex quant à elle, assure une transmission et une réception simultanée dans le temps et sur la même bande de fréquence. Cela est censé théoriquement, être capable de doubler le débit du réseau par rapport aux réseaux Half-duplex conventionnels [32][33].

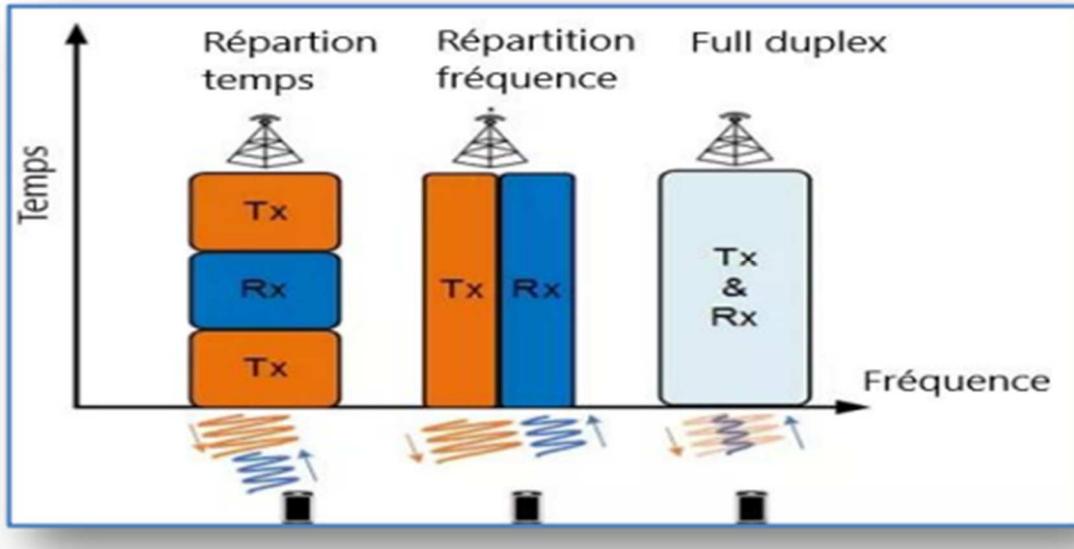


Figure I.13 : Répartitions temps et fréquence dans le Half-duplex et le Full-duplex.

e. Small-cell

Actuellement, le déploiement des réseaux mobiles est basé sur l'utilisation des stations de base dites « macro ». Elles sont installées dans des sites dotés d'antennes de forte puissance afin de garantir la couverture d'une zone et d'offrir une qualité de service meilleure.

Néanmoins, l'augmentation du trafic exige aux opérateurs de densifier leurs réseaux avec des cellules plus petites « Small-celle ». Cette technologie n'est pas nouvelle. Elle existe déjà mais elle est déployée à une échelle locale. Elle consiste à implémenter dans les moindres espaces des zones urbaines (stations de bus, panneaux publicitaires) des antennes pouvant émettre des données à très haut débit et à courte portée (en émettant principalement dans les bandes millimétriques). Cette technologie sera un complément pour améliorer l'efficacité des communications dans les zones urbaines. De ce fait, les Small-cells vont permettre d'augmenter la capacité du réseau, en termes de trafic [34].

Ainsi donc, la 5G va connaître une forte augmentation des volumes de données échangées et cela nécessitera, probablement, le déploiement des Small-cell deviendra alors indispensable. On distingue principalement trois types de Small-cells en fonction de leurs puissances d'émission et de la zone de couverture [26] :

Femtocellules – Picocellules – Microcellules - Macrocellules.

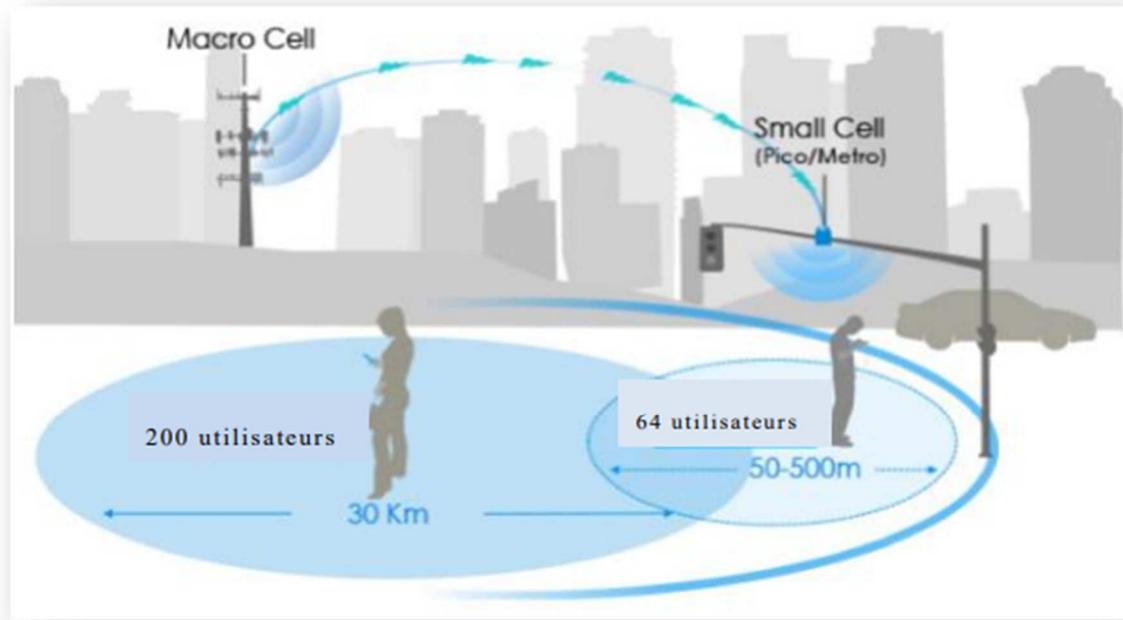


Figure I.14 : Réseau mobile sans fils illustrant la technologie des Small-cell [34].

Le Tableau I.12 présente un résumé des différentes cellules en fonction des spécificités utilisées dans les systèmes de communications radio.

Type de Cellule	Puissance (W)	Rayon de couverture (km)	Nombre d'utilisateurs	Zone
Femtocellule	0,001 à 0,25	0,01 à 0,1	1 à 30	Interieur
Picocellule	0,25 à 1	0,1 à 0,2	30 à 100	Interieur / Exterieur
Microcellule	1 à 10	0,2 à 2	100 à 2000	Interieur / Exterieur
Macrocellule	10 à > 50	8 à 30	>2000	Exterieur

Tab I. 12 : Caractéristiques des différents types de cellules [26]

f. NOMA (Non-orthogonal multiple access)

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) est une technologie prometteuse pour augmenter l'efficacité spectrale et permettre une connectivité massive dans les futurs réseaux sans fil. Contrairement aux schémas orthogonaux, tels que l'accès multiple par répartition orthogonale

de la fréquence (orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA)) adopté dans les normes 3GPP-LTE et 5G New Radio Phase 1, NOMA peut servir plusieurs utilisateurs sur la même ressource de fréquence et de temps en superposant leurs signaux dans le domaine de puissance.

Coté récepteur, une technique appelée annulation d'interférences successives (successive interference cancellation (SIC)) est appliquée pour décoder les signaux superposés [35].

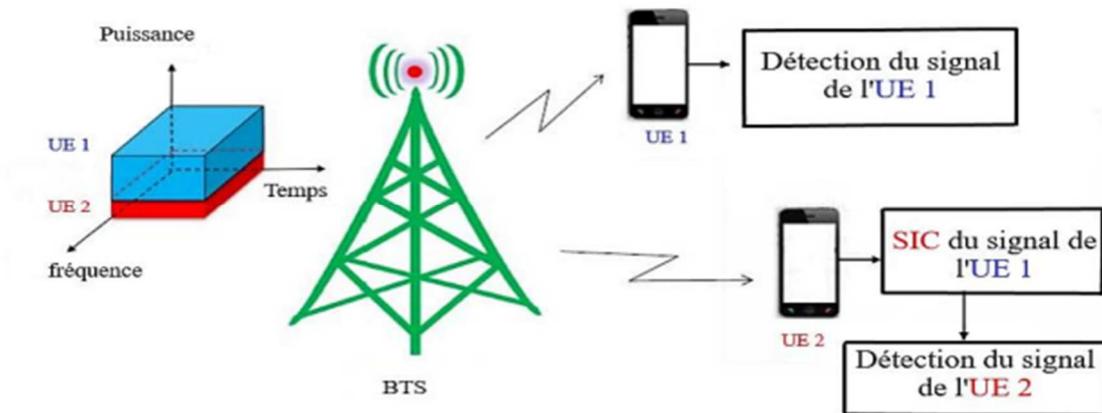


Figure I.15 : L'accès multiple non orthogonal (NOMA) [36].

I.2.5.4 Le défi de la 5G et l'optique sans fil

Pour faire face à l'accroissement de connectivité, de nombreuses solutions et techniques avancées sont envisagées dans la norme 5G tout en essayant de limiter le coût énergétique et indirectement l'impact Carbone. Une solution alternative pour surmonter les problématiques est d'utiliser une technologie complémentaire aux radiofréquences RF au-delà de 300 GHz. Ce domaine est celui de l'optique sans fil, qui offre une bande passante libre pratiquement illimitée (400 THz) et qui se décompose en trois sous-bandes : le proche infrarouge (IR), la bande visible (VL) (390–750 nm) et l'ultra-violet (UV 200–280 nm) [37].

La communication par lumière visible (VLC : visible light communications) a été proposée comme solution alternative, où une source de lumière est utilisée à la fois pour l'éclairage et la transmission de données. En comparaison aux liaisons RF, les liaisons VLC présentent une bande passante très élevée qui permet des débits de données beaucoup plus élevés. VLC présente également une immunité aux interférences provenant de sources électromagnétiques, n'a pas de licence canaux, est un système à très faible consommation d'énergie et n'a pas danger pour la santé (voir Figure I.16).

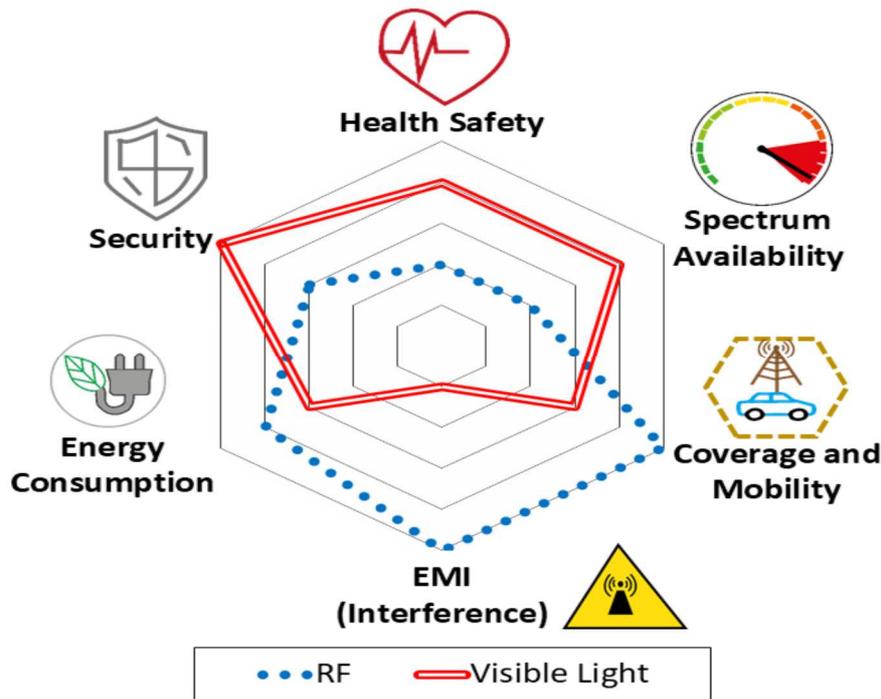


Figure 1.16 : Comparisons des systèmes optiques (VLC) et RF [38].

Récemment, des systèmes hybrides RF/VLC ont été proposés pour tirer parti de la grande capacité des liaisons VLC et d'une meilleure connectivité des liaisons RF. Ainsi, les systèmes hybrides RF/VLC sont considérés comme un outil clé pour améliorer les tarifs et la mobilité des utilisateurs, d'une part, et pour optimiser la capacité, les interférences et la consommation d'énergie du réseau global, ou améliorer la sécurité comme dans le contexte des futurs réseaux de télécommunication 5G d'autre part [38].

Dans le deuxième chapitre, On mettra une étude détaillée, dont on tâchera de décrire le principe de la communication par lumière visible VLC (visible light communications).

I.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fournit les notions de base associées à la technologie 5 G dans la compréhension de la portée du travail. Ce chapitre commencé par présenter les notions fondamentales des réseaux mobiles et leurs avancées, couvrant les diverses infrastructures 1G, 2G, 3G et 4G, leurs caractéristiques et leurs fonctions. Ensuite les réseaux mobiles 5G, leurs composants et leur architecture, et leur objectif, sont abordé. Enfin, le chapitre se termine par un examen détaillé des technologies intégrées à ce réseau, qui offrent des avantages substantiels, tels qu'une capacité de connectivité accrue, une vitesse de transmission de données plus élevée et une latence réduite.

Chapitre II :

Communications par lumière visible (VLC)

II.1 Introduction

La communication par lumière visible (VLC) est un domaine de recherche émergeant dans le domaine des communications sans fil. Le système fonctionne de la même manière que les systèmes de communication à base de fibre optique. Alors que, le système VLC utilise l'espace libre comme support de transmission. Avec l'invention de la diode électroluminescente (LED ; light emitting diode), les systèmes de communication modernes ont connu une avancée technologique remarquable. Dans VLC, la LED agit comme un émetteur et envoie des données sous forme de lumière à grande vitesse, ce qui est difficile à identifier par l'œil humain.

Un avantage significatif du système VLC par rapport aux autres systèmes de communication est qu'il est facile à mettre en œuvre à l'aide d'une LED et d'une photodiode ou d'un phototransistor. Le système est économique, compact, peu coûteux, petit, de faible puissance, prévient et élimine les interférences radio, le besoin de droits de diffusion et de câbles enterrés [1].

Ce chapitre fournit les notions de base associées aux technologies VLC dans la compréhension de la portée du travail. Les généralités, les avantages, les inconvénients et les caractéristiques des communications par lumière visible sont présentées. Les principes physiques et l'architecture des liaisons de communication par la lumière visible VLC sont également détaillés, présentant aussi les techniques de modulations pour les communications optiques sans fil utilisées dans les standards publiés, et détaille plus particulièrement les différents domaines d'applications tels que les systèmes VLC Indoor et les systèmes VLC Outdoor.

II.2 Généralités

La VLC est une technologie qui se développe autour des éclairages à LED. Elle fait partie des communications optiques sans fil (optical wireless communications, OWC) avec la caractéristique de ne transmettre que sur des distances allant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Elle joue un double rôle d'éclairage et de communication de données/électronique. VLC concernent uniquement la partie visible du spectre de longueurs d'onde comprises entre 380 et 750 nm correspondant à un spectre de fréquences de 430 THz à 790 THz, comme illustré à la figure II.1. La capacité de commutation de la LED est permet une transmission d'information à haut débit (1 Gb/s) [2, 3,4].

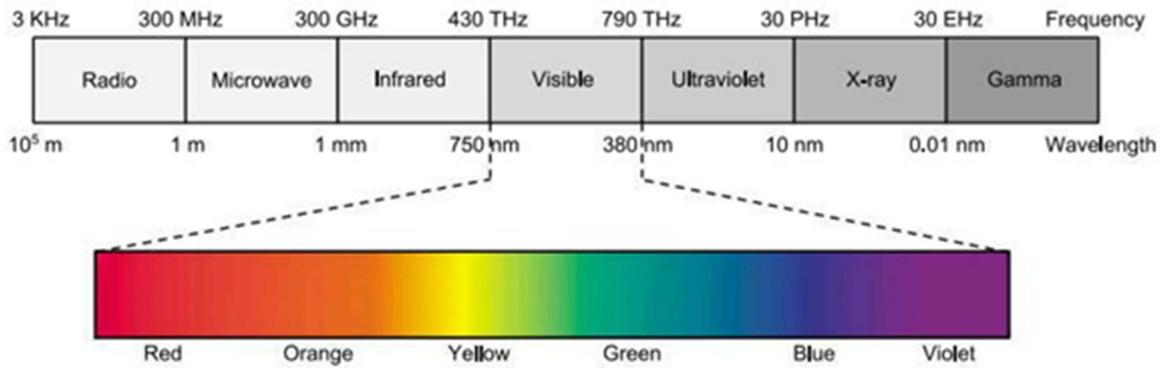


Figure II.1 : Spectre électromagnétique. [5]

II.3 Historique des communications par lumière visible

L'idée d'employer la lumière à des fins de communication remonte à des siècles, On peut prendre pour exemple les signaux de fumées des peuples indiens d'Amérique ou encore les balises côtières (par l'intermédiaire du feu). Très rudimentaires par leur aspect, ces techniques permettaient néanmoins de transmettre de manière rapide et efficace des informations essentielles. Il faut attendre 1880, année de l'invention du photophone de Alexander Graham Bell (figure II.2), pour voir émerger le premier véritable dispositif de communication par optique sans fil, ou Optical Wireless Communication (OWC) [6]. Dans son expérience, Bell a modulé le rayonnement solaire avec un signal vocal et l'a transmis sur une distance d'environ 200 mètres, le récepteur est constitué d'un miroir parabolique avec une cellule de sélénium à son point focal. Bell a toujours considéré le photophone comme sa plus grande invention : "*The greatest invention I have ever made ; greater than the : "telephone"*" [7].

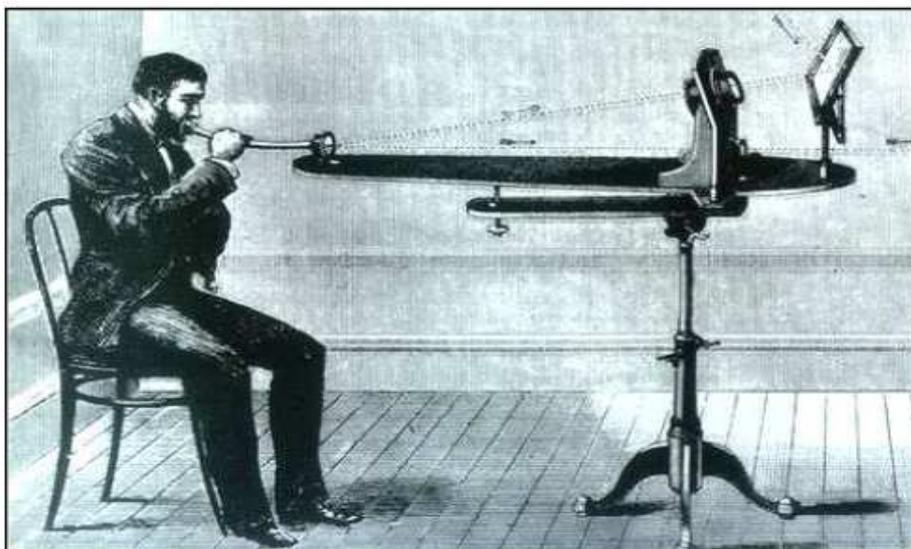


Figure II.2 : Le principe de fonctionnement du photophone par Graham Bell

L'expérience de Photophone n'a pas fonctionné très bien à cause de la crudité des appareils utilisés et de la nature intermittente des radiations solaires. Cependant, le concept est tout simplement resté une curiosité intéressante jusqu'à l'invention du laser en 1960 qui a annoncé la véritable naissance de la technologie des systèmes de télécommunications basés sur les liaisons optiques sans fil. Cette technologie a été dans un premier temps développée essentiellement pour des applications dans le domaine de la défense et de l'ingénierie aérospatiale [8]. En 1962 par exemple, le laboratoire Lincoln du Massachusetts Institute of Technology (MIT) établit la transmission d'un signal télévisuel sur plus de 48 km en optique sans fil utilisant des diodes laser, ou Laser Diode (LD) [9].

A la fin des années 80s, les liaisons optiques sans fil sont apparues comme une option commerciale qui s'est heurtée à plusieurs restrictions technologiques ; faible débit, courte distance de transmission, problèmes d'alignement ainsi que leur vulnérabilité aux événements climatiques et aux conditions météorologiques. Une grande partie de ces problèmes fut surmontée, et le développement de cette technologie s'est poursuivi. C'est à la fin des années 90s, avec l'apparition de l'internet et le grand besoin en matière de débit dans le secteur des télécommunications, la demande de disposer des réseaux d'accès locaux sans fil, des réseaux multimédia et des transmissions vidéo à des débits élevés, que plusieurs compagnies de télécommunications ont développés une "Nouvelle Génération" de systèmes de communication laser sans fil pour l'usage commercial et l'ont introduit dans le secteur privé [8]. En 2004, les premières démonstrations de communication à haut débit à l'aide de diodes LEDs ont été effectuées au Japon au moyen de photodiodes. Grâce à la multiplication des téléphones cellulaires équipés de caméras, ces dispositifs ont pu être utilisés comme récepteurs VLC. Des chercheurs ont commencé à utiliser des écrans à affichage de cristaux liquides (LCD, Liquid Crystal Display) et d'autres éléments d'affichage en tant qu'émetteurs. Le Visible Light Communications Consortium (VLCC) du Japon a été l'un des premiers organismes de normalisation à mener des travaux sur une norme relative aux communications VLC. En 2008, cet organisme a élargi la portée de la norme élaborée par l'Association sur les données infrarouge (IrDA, Infrared Data Association) pour les communications infrarouges, de façon à y'inclure le spectre de la lumière visible [3].

II.4 Les avantages et les inconvénients de système VLC

II.4.1 Les avantages

La VLC est une technologie qui présente plusieurs avantages, notamment une large bande passante gratuite avec un taux de données élevé, un spectre sans licence, ainsi que la sécurité

pour le corps humain et les équipements électroniques de haute précision. En plus de ces avantages, VLC est une solution peu coûteuse et simple à mettre en place.

On note en particulier les points suivants [10] :

- **Large bande passante** : Avec la demande croissante de services sans fil à haute vitesse de manière significative, le spectre RF devient de plus en plus encombré. Le spectre des ondes radio est limité, de 3 kHz à 300 GHz, alors que le spectre de la lumière visible est d'au moins 1000 fois supérieur à 400 THz à 780 THz .cette large bande permet résoudre les problèmes de la congestion du spectre RF.

- **Pas d'interférence électromagnétique** : La VLC ne génère presque aucun rayonnement électromagnétique dans l'espace ce qui fournit une bonne solution de communication sans fil pour les environnements d'immunité aux interférences électromagnétiques (EMI, Electromagnetic Interference), tels que les hôpitaux, les centrales nucléaires, et les avions.

- **Sécurité sanitaire** : L'utilisation de la lumière visible comme support de transmission de données permet à VLC d'être totalement sûr pour la santé humaine. Même si l'effet négatif des RF sur la santé humaine n'est pas entièrement démontré, il y a de nombreuses voix du domaine médical qui soulignent ce fait.

- **Mise en œuvre facile et bas coût** : La mise en œuvre d'un système VLC est simple et économique car elle permet de combiner les fonctions d'éclairage et de communication en ajoutant seulement quelques modules supplémentaires au système d'éclairage existant. De plus, grâce à la croissance de l'industrie des LED, les coûts de production des émetteurs-récepteurs VLC ont considérablement diminué. Cela rend la technologie VLC plus accessible et moins coûteuse à grande échelle.

- **Moins de piratage** : La sécurité est un problème important pour les communications RF car les ondes radio peuvent pénétrer les murs qui provoquant des fuites d'informations. Contrairement au VLC les ondes lumineuses ne traverse pas les murs. L'échange de données reste confiné dans l'espace lumineux. C'est un avantage qui permet d'améliorer la sécurité de l'information et d'assurer des liaisons de communications plus sûres.

II.4.2 Les inconvénients

Bien que la technologie de communication optique sans fil présente des avantages considérables, elle souffre également de certaines limitations. Les obstacles ou les obstructions dans l'environnement peuvent affecter la qualité du signal, ce qui peut entraîner des perturbations dans la communication. De plus, les performances de ces systèmes peuvent être

altérées par les sources de bruit optique environnantes, telles que la lumière du soleil ou d'autres sources lumineuses. Enfin, la portée de transmission est limitée, ce qui signifie que les signaux optiques ne peuvent pas être transmis sur de très grandes distances sans perte de qualité.

II.5 Principe de fonctionnement

Parce que les LEDs sont des semi-conducteurs, elles ont la capacité de s'éteindre et de s'allumer avec des temps de l'ordre nanoseconde. En allumant et en éteignant plusieurs milliers de fois par seconde, on peut transmettre des informations en créant une fréquence. Si une LED est allumée, elle transmet un bit 1, si elle est éteinte, un bit 0 (voir Figure II.3). Les changements de fréquence sont si rapides qu'ils ne sont pas visibles par l'œil humain qui ne perçoit pas le clignotement et ne voit qu'une lumière fixe. En termes de débit, cela correspond à 1 Gbits/s contre un débit d'ordre 100 Mbit/s pour le Wi-Fi, soit 10 fois plus faible [11].

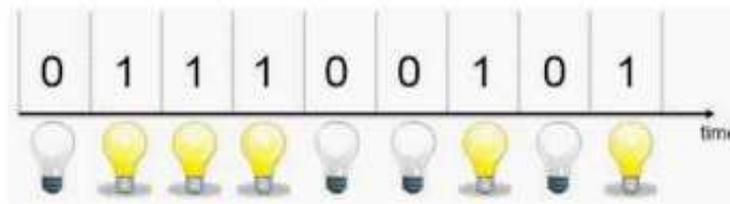


Figure II.3 : Principe de fonctionnement d'un système VLC

II.6 Architecture du système VLC

L'architecture du système de transmission VLC de bout en bout est illustrée dans la figure II.4. Il se compose de trois parties principales qui sont le frontal de l'émetteur (VLC transmitter), le récepteur (VLC receiver) et le canal de propagation (VLC channel).

- **L'émetteur** : il peut convertir des signaux électriques en puissance optique en le modulant via une LED ou une LD.
- **Le canal** : l'environnement dans lequel l'onde se propage (espace libre).
- **Le récepteur** : détecte une puissance optique par unité de surface via une photodiode (PD) puis convertit en un signal électrique par la démodulation.

Les caractéristiques de ces parties ont un impact significatif sur le système VLC. Dans ce qui suit, nous expliquons chaque partie individuelle mettant en évidence ses composants inhérents et ses principales fonctions.

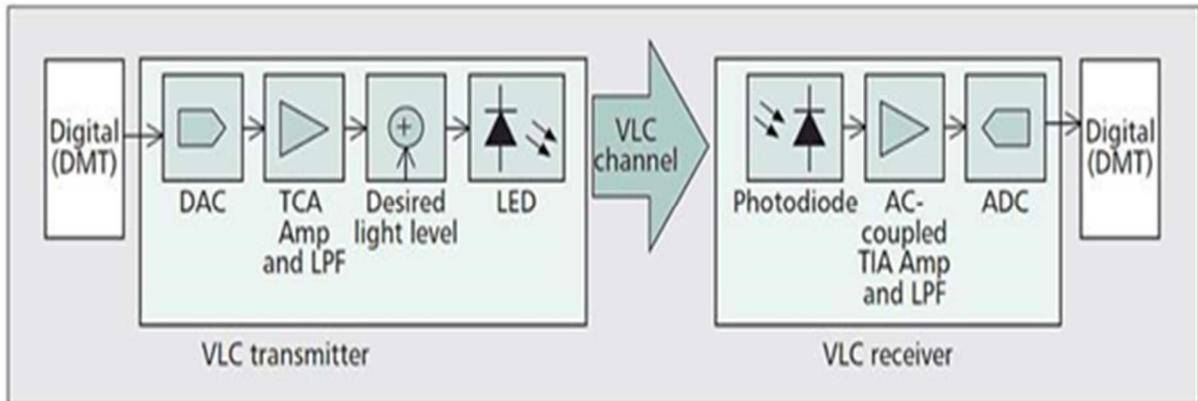


Figure II.4 : Schéma fonctionnel d'un système VLC [12].

II.6.1 Emetteur VLC

II.6.1.1 Description

Un émetteur VLC est un dispositif de transduction électro-optique qui utilise des ondes lumineuses visibles pour envoyer des données sur un canal de transmission sans fil. Un convertisseur numérique-analogique (DAC) module les bits d'information et les transforme en un signal analogique, un amplificateur à transconductance (TCA), des filtres passe-bas (LPF) et des LED haute vitesse composent l'émetteur. La LED transforme le signal électrique en un signal optique, qui offre un éclairage ainsi qu'une communication. Avant d'être transférées au signal optique, les données sont contenues et modulées en ligne par le DAC en modifiant l'amplitude ou toute autre qualité de la lumière de la LED [13].

II.6.1.2 LED et VLC

En VLC, les LED sont privilégiées en raison de leur faible coût et de leur large surface d'émission, permettant de produire des faisceaux optiques plus diffus, facilitant ainsi le respect des contraintes d'éclairage ainsi que celles liées à la sécurité oculaire.

Les LD ont de meilleures performances que les LED en termes de bande passante et de rendement mais elles émettent généralement des faisceaux très étroits, devant alors respecter des contraintes de sécurité oculaire. Les LD sont classiquement utilisées pour des applications plus spécifiques, par exemple point à point à très haut débit. Le tableau II-1 propose un comparatif de ces deux composants [14].

Caractéristiques	LED	LD
Puissance optique	Faible	Importante
Largeur spectrale	(25-100) nm	(0.01-5) nm
Bande passante	Du kHz à la centaine de MHz	Du kHz à la centaine de GHz
Efficacité en puissance	(10-20) %	(30-70) %
Sécurité oculaire	Faible considération	Forte considération
Directivité	Diffuse	Directive

Tab II.1: Comparaison entre LED et LD [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 II.2 : Caractéristiques de la LED.

II.6.1.3 Mode de rayonnement

Il existe plusieurs modèles de rayonnement pour les systèmes de communication par lumière visible, parmi lesquels le modèle purement diffus, les modèles expérimentaux et le modèle d'émetteur Luxon Rebel de Lumileds Philips. Cependant, le modèle le plus couramment utilisé dans les environnements de communication en intérieur (Indoor) est le modèle Lambertien généralisé. Ce modèle permet de simuler des émetteurs diffus et directs ayant une symétrie uniaxiale autour de la normale.

Pour un diagramme Lambertien l'intensité lumineuse rayonnée par unité d'angle solide I_e ($mW \cdot sr^{-1}$) s'exprime selon la relation :

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

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

I_0 ($mW \cdot sr^{-1}$) est l'intensité maximale dans l'axe 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 :

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

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 $m=45$.

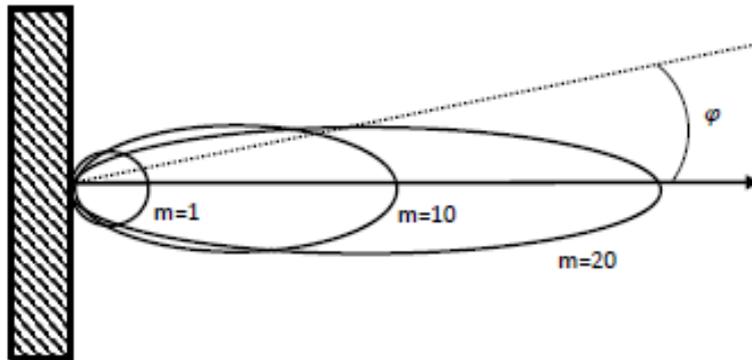


Figure II.5 : Illustration de l'ordre de rayonnement m d'une source LED

II.6.2 Récepteur VLC

Au niveau du récepteur, la photodiode convertit la puissance optique reçue en un signal électrique, qui est ensuite amplifié, démodulé et décodé par un amplificateur transimpédance (TIA, Transimpedance Amplifier), suivi d'un filtre passe-bas (LPF). Un convertisseur analogique-numérique (ADC, Analog to Digital Converter) est utilisé pour transformer le signal du courant analogique en un signal numérique afin de récupérer les bits du message de l'utilisateur [15].

Les photodiodes sont les dispositifs les plus utilisés en tant que photodétecteurs en raison de leur petite taille, de leur grande sensibilité et de leur réponse rapide [16]. Il existe deux types

de photodiodes : les photodiodes PIN (Positive Intrinsic Negative) et les photodiodes à avalanche (APD). Les photodiodes PIN sont les plus couramment utilisées car plus linéaire et moins coûteuses que les APD qui ont un plus grand gain mais génèrent un bruit plus important [14].

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

La photodiode PIN est le composant le plus classiquement utilisé pour convertir un signal optique en un signal électrique. C'est un semi-conducteur classiquement polarisé en inverse. Celui-ci convertit alors la puissance optique en courant électrique en détectant le flux de photons incident sur la surface du composant [14].

La photodiode est le plus souvent caractérisée par sa sensibilité et le courant établi dans la photodiode donnée par l'expression suivante :

$$i_{ph} = R \cdot P + i_{obs} \quad (II.3)$$

Avec : P est la puissance optique, R est la sensibilité de la PD, et I_{obs} et le courant d'obscurité qui circule dans la jonction en absence d'éclairement, il provient à la fois de courants de fuite et de génération thermique, il augmente avec la température et la tension de polarisation [17].

D'autre part, la quantité des rayons collectés est fonction de deux paramètres importants pour les performances de la PD : le diagramme de rayonnement et la surface physique A. Chaque rayon incident arrivant avec un angle donné sera atténué différemment. Notons ψ l'angle du rayon incident avec la normale à la surface, la surface effective de collecte peut être exprimée comme :

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

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 :

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

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

II.6.3 Canal de transmission

II.6.3.1 Topologies

Plusieurs topologies sont possibles pour établir un lien de communication VLC entre un émetteur et un récepteur. Si l'on considère l'éclairage intérieur (Indoor) comme une caractéristique clé du système VLC, deux configurations sont couramment utilisées dans les environnements intérieurs et largement étudiées dans VLC, à savoir le types de liaisons de visibilité entre l'émetteur et le récepteur : directes et/ou indirectes (LOS ; line of sight ou NLOS ; non line of sight).

➤ Liaison LOS directionnelle

On parle de « line of sight » (LOS), lorsque la liaison entre l'émetteur et le récepteur est établie par un lien direct. Les liaisons LOS offrent les meilleures performances en termes de gain optique. Mais il est difficile de garder les deux systèmes continuellement alignés en cas de mouvements. De plus, une configuration LOS implique une zone de couverture plus réduite et une grande sensibilité aux blocages dès lors qu'un obstacle apparaît entre émetteur et récepteur[18].

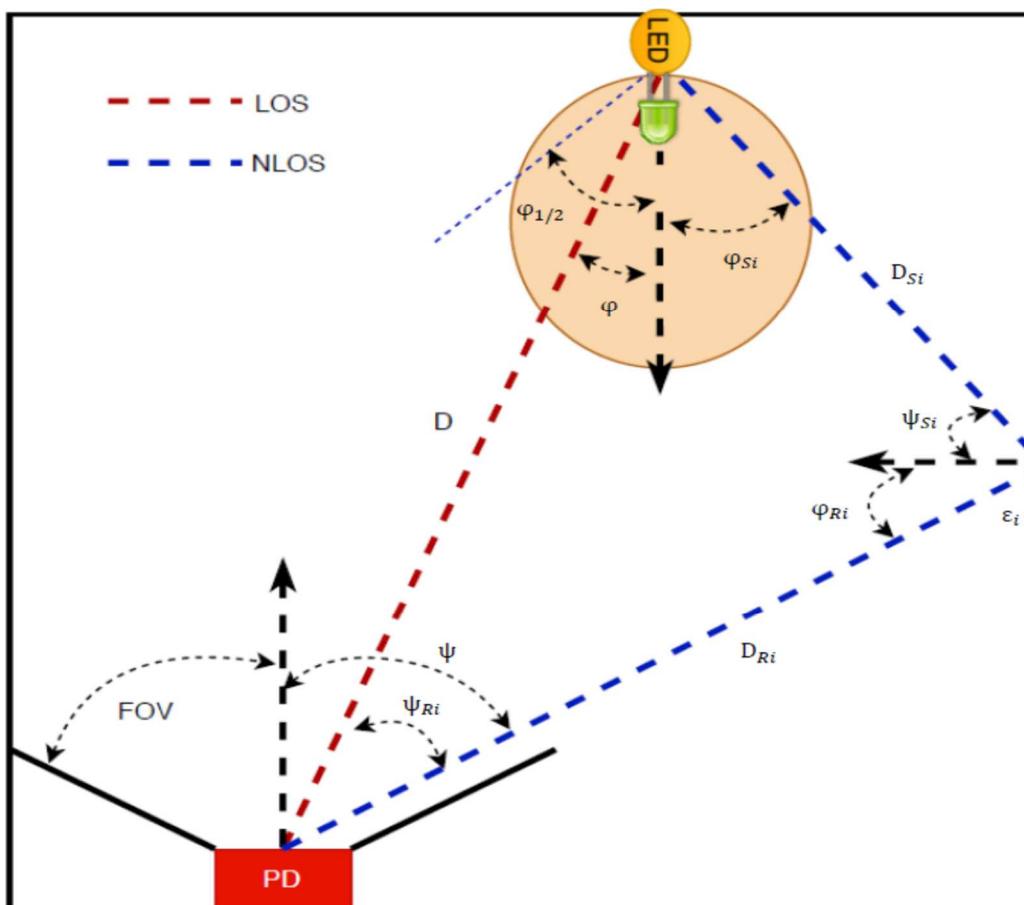


Figure II.6 : Illustration liaisons émetteur-récepteur [18]

➤ **Liaison LOS non-directionnelle**

Les liens optiques diffus établissent un lien entre l'émetteur et le récepteur par l'intermédiaire d'au moins une réflexion sur une paroi de l'environnement indoor et utilisent des angles d'ouvertures élevés pour l'émetteur et un large FOV pour le récepteur. Cette topologie est plus robuste face aux phénomènes de blocage que les liens LOS. Ces liens permettent d'obtenir un grand degré de mobilité au prix d'une atténuation plus importante (ce qui diminue la puissance optique reçue) [19].

II.6.3.2 Modélisation d'un canal VLC

La plupart des systèmes optiques sans fil sont des systèmes à modulation d'intensité et à détection directe, Intensity Modulation/Direct Detection (IM/DD). Dans un système IM/DD, l'information n'est pas portée par la fréquence ou la phase mais par l'intensité du signal optique. La conversion entre le signal électrique et l'intensité optique $x(t)$ est réalisée par une LED. L'onde optique est alors propagée sur le canal optique sans fil. En réception, il est nécessaire de réaliser la conversion inverse permettant de revenir au domaine électrique. Cette fonction est assurée par la photodiode. La photodiode réalise une détection directe *i.e.* elle produit un photo-courant $y(t)$ proportionnel à l'intensité optique reçue. L'objectif principal du récepteur est de déterminer l'information contenue dans $x(t)$ à partir du signal reçu $y(t)$ [19].

Le modèle schématisé sur la figure II.7 est un modèle simplifié d'une liaison optique sans fil, particulièrement le VLC.

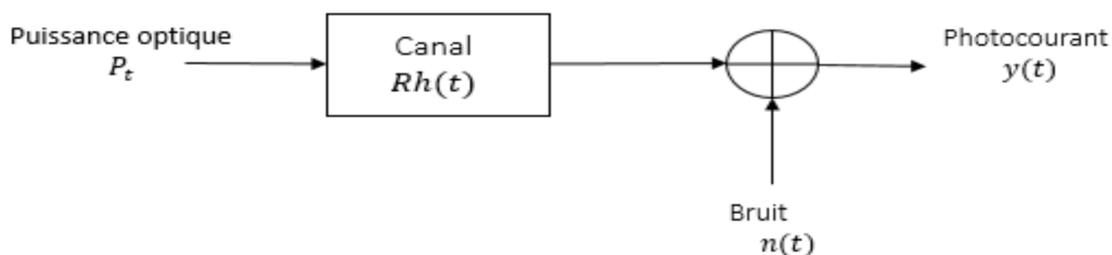


Figure II.7 : Modèle équivalent en bande de base d'un système optique sans fil IM/DD.

Bien que les liaisons OWC indoor souffrent des effets d'évanouissement dû aux trajets, elles souffrent également des effets de dispersion, lesquels se manifestent dans le sens pratique par des interférences inter-symboles. Cette dispersion est modélisée par le canal en bande de base linéaire de réponse impulsionnelle $h(t)$. En terme mathématique, l'équivalent de ce modèle est :

$$y(t) = R (h(t) \otimes P_t) + n(t) \tag{II.6}$$

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

Note : On appelle sensibilité de la photodiode le rapport du courant en sortie sur la puissance optique d'entrée.

Pour la sécurité de la vision humaine, une limitation de la puissance maximale optique transmise admissible est exigée. Cette puissance maximale P_{max} est de :

$$P_{max} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T X(t) dt \quad (II.7)$$

Où $x(t)$ représente les symboles 1.2

En analysant, la restriction se fait sur la puissance moyenne des valeurs de P_t qui ne doit pas excéder P_{max} [20].

II.6.3.3 La réponse impulsionnelle $h(t)$

La réponse impulsionnelle du canal est l'évolution du signal reçu au cours du temps lorsque infiniment de lumière est lancé par l'émetteur. Il fournit des informations complètes sur les caractéristiques du canal. La réponse impulsionnelle du canal est déterminée par les dispositions spécifiques de l'émetteur, du récepteur et de tout réflecteur impliqué.

Mathématiquement, pour une source lumineuse spécifique S et un récepteur R, la réponse impulsionnelle totale du canal au temps t est la somme des réponses de LOS et de toutes les réflexions des liaisons NLOS, peut être exprimée comme suit :

$$h(t, S, R) = \sum_{k=0}^{\infty} h^{(k)}(t, S, R). \quad (II.8)$$

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

En tenant compte d'un modèle Lambertien, la réponse impulsionnelle $h(t)$ pour le trajet LOS est une impulsion de Dirac donné par la fonction suivante [18]:

$$h(t)_{los} = \begin{cases} \frac{A(m+1)}{2\pi D^2} \cos^m(\varphi) \cos(\psi) \delta(t - \frac{D}{c}) & 0 \leq \psi \leq FOV \\ 0 & \psi \geq FOV \end{cases} \quad (II.9)$$

Où D est la distance entre l'émetteur et le récepteur, $c=3e^8m/s$ la célérité de la lumière, φ et ψ sont respectivement les angles d'irradiance et d'incidence des rayons optiques.

Dans le cas d'une réflexion sur une surface Lambertienne, on peut définir la réponse impulsionnelle $h_{NLOS}(t)$ de toutes les contributions de la première réflexion sur NR éléments réfléchissants de l'environnement :

$$h(t)_{NLOS}^1 = \begin{cases} \sum_{\varepsilon_i} \Delta A \rho_i \frac{(m+1)}{2\pi D_{Si}^2 D_{Ri}^2} \cos^m(\varphi) \cos(\varphi_{RI}) \cos(\psi_{Si}) \cos(\psi) \delta\left(t - \frac{D_{Si} + D_{Ri}}{c}\right) & 0 \leq \psi \leq \text{FOV} \\ 0 & \psi \geq \text{FOV} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

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

A partir de cette équation, il est possible d'utiliser une méthode récursive afin de déterminer la contribution apportée par une réflexion d'ordre K.

II.6.3.4 Gain statique

L'une des caractéristiques les plus importantes d'un système VLC est le gain statique $H(0)$ du canal en courant continu (DC). Il renvoie le rapport signal/bruit réalisable pour une puissance d'émetteur fixe. A partir de la réponse impulsionnelle du canal, on peut définir le gain statique $H(0)$ du canal optique VLC comme suit :

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (\text{II.11})$$

Généralement, la valeur $H(0)$ canal est utilisée pour identifier les pertes dans le canal, qui associe la puissance optique moyenne reçue P_r , à celle émise P_t , comme suit :

$$P_r = H(0) P_t \quad (\text{II.12})$$

Dans un canal LOS, si l'émetteur est modélisé par le modèle Lambertien généralisé, $H(0)$ peut être obtenu par [18]:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{PD}}{2\pi d^2} \cos^m \Phi T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & 0 \geq \psi_c \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Où A_{PD} représente la surface de la photodiode (PD), m est l'ordre de mode Lambertien, ψ désigne l'angle d'incidence au PD, ψ_c est le FoV (Field of View) à semi-angle du récepteur, Φ est l'angle d'irradiance et d désigne la distance entre les LED et le récepteur. De plus, $T_s(\psi)$ est le gain du filtre optique et $g(\psi)$ est le gain du concentrateur optique.

II.6.3.5 La réponse fréquentielle $H(f)$

La réponse en fréquence du canal $H(f)$ décrit le comportement du canal pour différentes composantes fréquentielles du signal. Elle est calculée en prenant la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle calculée $h(t)$, qui reste constante pour une configuration et positions de l'émetteur/récepteur.

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II.14})$$

En pratique, la réponse fréquentielle à -3 dB du canal optique peut être obtenue comme suit :

$$|H(f_{-3dB})|^2 = 0.5 |H(0)|^2 \quad (\text{II.15})$$

II.7 Les sources de bruits

Dans le domaine des communications VLC, il existe de nombreuses sources de bruits. Elles peuvent être induites par le canal optique, comme le bruit optique ambiant issu de sources externes, ou bien générées localement par le récepteur (principalement associées au bruit thermique).

II.7.1 Bruit ambiant

Essentiellement, il existe trois sources de bruit ambiant dans un environnement intérieur (indoor) : les lampes fluorescentes, les lampes à incandescence et la lumière du jour (lumière du soleil) [21].

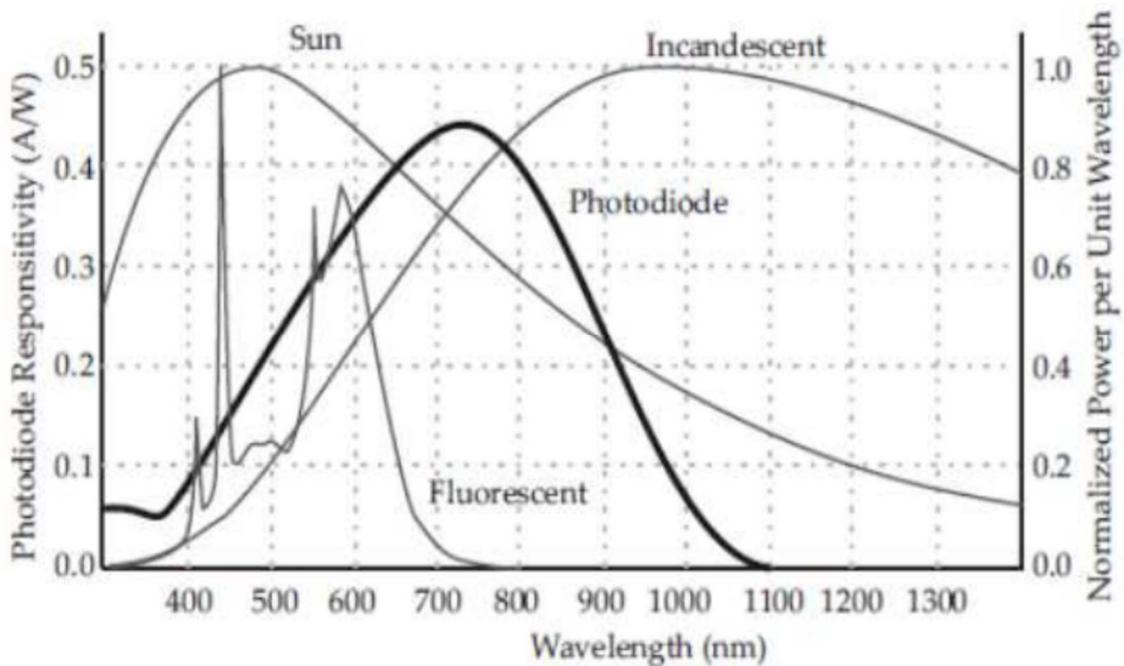


Figure II.8 : Spectres de puissance optique des différentes sources courantes de bruit

- **Lumière du soleil**

La lumière du jour, ou lumière du soleil, possède une très grande largeur spectrale, avec une densité de puissance maximale se produisant à environ 500 nm (Figure II.8). Les liaisons optiques sans fil qui fonctionnent entre 400 nm et 750 nm sont les plus sensibles à ce type d'interférence ambiante. Ce type de bruit ambiant dépend notamment de l'angle d'incidence des rayons du soleil par rapport au photodétecteur. Les interférences de la lumière du soleil peuvent s'avérer particulièrement gênantes pour les terminaux situés à proximité des fenêtres, entraînant une saturation potentielle de la liaison optique sans fil. Bien que les filtres passe-bande du récepteur puissent aider à atténuer ce problème, ils restent largement inefficaces en raison de la large plage spectrale et de l'intensité permanente de la lumière du jour.

- **Lampes à incandescences**

En plus de la lumière du jour, les lampes à incandescences ou à filament de tungstène représentent une source artificielle de bruit ambiant qui peut impacter les communications en optique sans fil. La figure II.8 montre que le spectre de ce type de source est très large, s'étalant sur les longueurs d'onde du visible et proche-IR, et présente un maximum à ≈ 1000 nm. Le bruit ambiant induit par les lampes à incandescence peut être modulée par sa source d'alimentation à courant alternatif (50/60 Hz). Il produit un photocourant à bande étroite avec une largeur inférieure à 2 kHz. Généralement, dans les applications optiques sans fil, la bande passante du récepteur est significativement supérieure à 2 kHz.

- **Lampes fluorescentes à basses fréquences**

De même que les lampes à incandescences, les lampes fluorescentes à basse fréquence émettent généralement une lumière modulée à la fréquence d'alimentation 50/60 Hz. La différence réside dans la bande passante totale de la photocourant à la réception produit par les lampes fluorescentes à basse fréquence, qui va jusqu'à 20 kHz. A partir de la figure II.8, on peut constater que la distribution spectrale de puissance du bruit pour ce type de lampe est étalée sur la gamme des longueurs d'onde entre 700 nm et 1100 nm. Pour réduire l'impact de ce type de bruit, une combinaison de filtres optiques et de filtres électriques/numériques passe-haut est nécessaire.

- **Lampes fluorescentes à hautes fréquences**

Un deuxième type plus récent de lampes fluorescentes a été introduit. Par rapport à son équivalent en basse fréquence, ce type de lampe génère un signal périodique dans la perspective de réduire la consommation électrique et d'augmenter l'espérance de vie du produit. La

fréquence de commutation des lampes fluorescentes à hautes fréquences varie d'un fabricant à l'autre, mais se situe typiquement dans la gamme de 20 kHz à 40 kHz. En plus des harmoniques dues au réseau d'alimentation, semblables à celles des lampes fluorescentes à basse fréquence, les lampes fluorescentes à hautes fréquences contiennent des harmoniques plus importantes, appelées bruit périodique, issues de la fréquence de commutation. Ces harmoniques peuvent se prolonger dans la plage du MHz limitant ainsi l'efficacité du filtrage, et donc présentent une efficacité beaucoup plus sévère pour les liaisons optiques sans fil.

II.7.2 Bruit de la photodiode

- **Bruit quantique (Shot-noise)**

Plusieurs travaux antérieurs ont montré que le courant I_b induit dans le photo-détecteur par les différents types de bruit, appelé « shot-noise » ou « photon-noise » d'après la nature quantique des photons arrivant de façon aléatoire au niveau du photo-détecteur, peut être modélisé par un bruit blanc Gaussien AWGN « Additif White Gaussian Noise » proportionnel à la puissance optique moyenne reçue. Ce bruit est souvent appelé « white Gaussian shot-noise ». Sa variance est donnée par :

$$\sigma_{shot}^2 = 2q(I_r + I_b)B \quad (II.16)$$

Avec q est la charge d'électron, B est la bande passante du signal d'information, I_r est le photocourant généré, liée à l'intensité du signal reçu, et I_b est le photo-courant induit au bruit ambiant.

- **Bruit thermique**

Les performances des systèmes optiques sans fil sont affectées par le bruit thermique. Ce bruit est comparativement plus faible que le bruit ambiant et résulte d'effets thermiques sur le circuit électronique du récepteur. En effet, la résistance de polarisation du préamplificateur joue un rôle crucial dans la source de bruit et le degré d'impact varie selon le type de préamplificateur utilisé. Bien que la conception du circuit puisse rendre le bruit thermique insignifiant par rapport au bruit ambiant, il devient significatif à des débits de données élevés. Il est considéré comme un bruit blanc gaussien, ayant une densité spectrale de puissance indépendante de la fréquence. Sa variance peut généralisée par :

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{4KT_e B}{R_L} \quad (II.17)$$

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 :

$$\sigma_{noise}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 \quad (\text{II.18})$$

II.8 SNR dans VLC

Dans VLC, le rapport signal/bruit électrique (SNR) reçu est un paramètre important pour évaluer la qualité de la transmission sur un canal donné, il est défini comme le rapport entre la puissance électrique moyenne du signal reçu et la puissance du bruit. Le SNR électrique peut s'écrire [22] :

$$\text{SNR} = \frac{R^2 P_r^2}{\sigma^2} = \frac{R^2 H_{DC}^2 P_t^2}{\sigma^2} \quad (\text{II.19})$$

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

II.9 Les modulations dans VLC

Il existe plusieurs techniques de modulations associées aux communications par optique sans fil. Dans le cadre des VLC, la sélection d'une modulation en particulier se fait selon d'efférents critères [23]:

- La fiabilité de la transmission : celle-ci doit permettre l'envoi de données pour respecter les contraintes en termes de taux d'erreur.

- L'effet de scintillement : pour des débits trop faibles ou des différences trop élevées entre les niveaux des symboles, l'œil humain est susceptible de percevoir un phénomène de scintillement de la lumière, ce qui peut être très désagréable. Selon IEEE 802.15.7, la commutation doit être effectuée à une fréquence supérieure à 200 Hz pour éviter les effets nocifs.

- La technologie des sources : les contraintes d'utilisation diffèrent selon que l'on utilise une LED blanche classique ou des LED RGB.

- L'efficacité spectrale : même si les systèmes de communication optique sans fil disposent d'une bande passante importante, celle-ci peut être limitée par différents paramètres comme la bande passante des composants d'émission/réception ou les perturbations multi-trajets des rayons optiques.

Dans le premier standard IEEE 802.15.7, différents types de modulations sont proposés : modulation On-Off Keying (OOK), Variable Pulse Position Modulation (VPPM) et Color Shift Keying (CSK). Cependant, de nombreux travaux ont montré l'intérêt d'utiliser des modulations multi-porteuses telles que l'OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) mais celles-ci ne sont pas encore implémentées dans les standards pour les VLC.

II.9.1 La modulation OOK

L'OOK est une technique de modulation simple dans laquelle le «1» numérique est représenté par la présence du signal optique, correspondant à l'état « ON », tandis que la donnée «0» est représentée par un signal de valeur égale à zéro, ou l'état « OFF ». Le « ON » et le « OFF » représentent deux niveaux d'amplitude distincts, nécessaires à la communication, et n'impliquent pas nécessairement que la source de lumière soit complètement éteinte. Pour OOK, la norme IEEE 802.15.7 mentionne l'utilisation du code de Manchester pour s'assurer que la période des impulsions positives est identique à celle des impulsions négatives, mais cela double également la bande passante requise pour la transmission OOK [24].

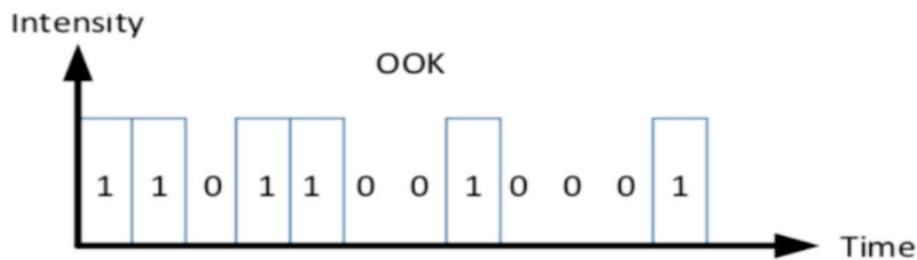


Figure II.9 : La modulation OOK.

II.9.2 La modulation VPPM

La modulation VPPM est une variante de la Pulse Position Modulation (PPM), développée spécifiquement pour les communications VLC. En modulation PPM, l'information est représentée par la position de l'impulsion dans le temps. La variante VPPM introduit en plus la variation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse Width Modulation), en fonction du niveau d'intensité lumineuse (voir Figure II.10). Il s'agit d'une modulation Manchester OOK à laquelle on applique un rapport cyclique variable. La modulation VPPM permet de s'affranchir des problèmes de scintillement car on supprime les longues suites de symboles « 0 » et la technique PWM permet de contrôler l'intensité lumineuse [14].

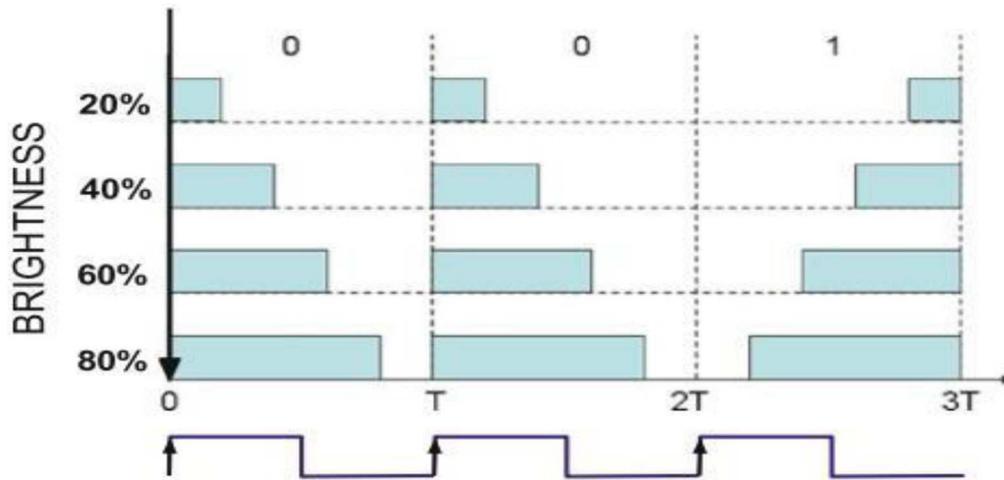


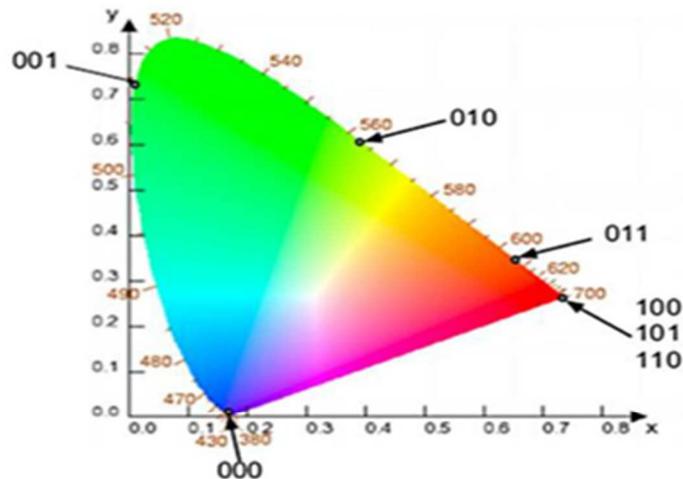
Figure II.10 : La modulation VPPM. [14]

II.9.3 La modulation CSK (Color shift keying)

A l'instar de la modulation VPPM, la modulation «Color-Shift Keying» est spécifique aux VLC. Elle a été proposée dans la norme IEEE 802.15.7 pour améliorer le débit de données qui était faible dans d'autres types de modulation. La capacité de commutation ralentit en produisant une lumière blanche à l'aide de phosphore jaune et de LEDs bleues. Par conséquent, une autre façon de produire la lumière blanche consiste à utiliser trois LEDs distinctes, le vert, le bleu et le rouge. Elle est spécialement définie en utilisant l'intensité des trois couleurs d'une source LED RGB (Red Green Blue).

La modulation CSK dépend du diagramme de chromaticité de l'espace colorimétrique. Contrairement aux autres modulations, les symboles sont ici sélectionnés de manière à ce que l'émission lumineuse reste constante alors que les différentes composantes chromatiques associées à chaque couleur varient. Cette modulation mappe toutes les couleurs perceptibles à l'œil sur deux paramètres de chromaticité tels que x et y . (La figure II.11) illustre les sept bandes de longueur d'onde visibles par l'œil avec leurs centres représentés sur le diagramme.

Cette technique permet de s'affranchir complètement des problèmes de scintillement. De plus, comme le flux lumineux émis est constant, le courant de commande reste constant lui aussi, diminuant ainsi grandement les contraintes sur les sources. La limitation de cette modulation est liée à la complexité et à la nécessité en réception d'être capable de recevoir chaque couleur [14].



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)

Figure II.11 : La modulation CSK. [14]

II.9.4 La modulation OFDM

Pour les applications hauts débits, on se retrouve rapidement confronté aux problèmes de limitation de la bande passante des sources ainsi que de génération de l'IES (Interférence Entre Symboles). Afin de répondre au mieux à ces problématiques, la modulation de type OFDM est peut-être utiliser. Le principe de cette modulation est de considérer que les données sont envoyées sur plusieurs canaux en parallèle en utilisant différentes sous porteuses. Ainsi, le temps de chaque symbole correspondant à chaque sous porteuse est bien plus grand que son équivalent pour une porteuse unique, réduisant ainsi grandement l'impact de l'IES tout en permettant d'optimiser la bande passante.

L'utilisation d'un intervalle de garde permet également d'éliminer l'interférence entre sous-porteuses. Le principal avantage est alors de pouvoir réaliser une égalisation très simple en réception. De plus, il est possible de maximiser les performances en définissant différents débits et puissances transmises pour chaque sous porteuse.

Dans le cas d'un système IM/DD, les signaux portant l'information doivent être des réels positifs. Il s'agit de la différence majeure entre l'OFDM pour l'optique et pour les RF.

Différentes techniques ont été proposées pour adapter l'OFDM à un canal IM/DD. On peut citer en particulier la modulation DCO-OFDM (Direct Current biased Optical-OFDM) ou la modulation ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical-OFDM).

Malgré les nombreux avantages, la mise en œuvre de cette modulation est complexe, augmentant ainsi le prix des systèmes utilisant cette méthode [14].

II.10 Les domaines d'application de VLC

Grace aux avantages de cette technologie, nombreuses applications sont effectués dans différents domaines. Parfois elle peut-être le seul choix et des fois une solution complémentaire pour la communication radiofréquence. Voici quelques une de ses applications :

II.10.1 Systèmes VLC Indoor

➤ **Aviation** : les ondes radio sont interdites aux passagers, les éclairages à base de LED sont déjà utilisés dans les cabines d'aéronefs et chacun de ces éclairages pourrait être un potentiel émetteur VLC pour fournir à la fois des services d'éclairage et des services multimédias aux passagers. De plus, cela réduira les coûts de construction de l'avion et son poids [3].

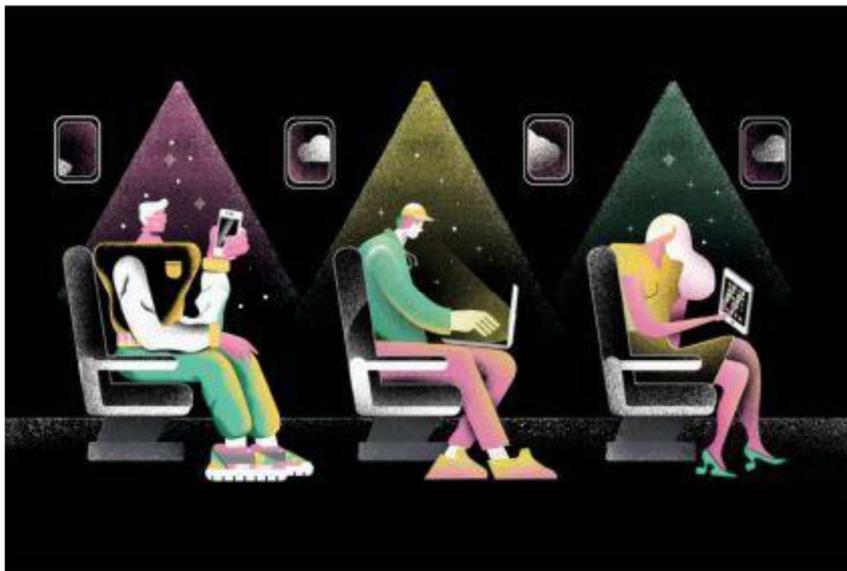


Figure II.12 : Utilisation de la VLC dans l'avion [3]

➤ **Localisation** : Avec ses nombreux avantages, la technologie VLC offre une solution prometteuse à la problématique de la localisation et navigation indoor. Les méthodes classiques de triangulation, de trilatération ou de finger-printing associées aux VLC permettent à l'heure actuelle d'obtenir des précisions de localisation de l'ordre du centimètre,

alors que par exemple on est autour du mètre en Wi-Fi . Le GPS classique ne peut pas fonctionner à l'intérieur des bâtiments. VLC est très pratique dans ces applications [25].

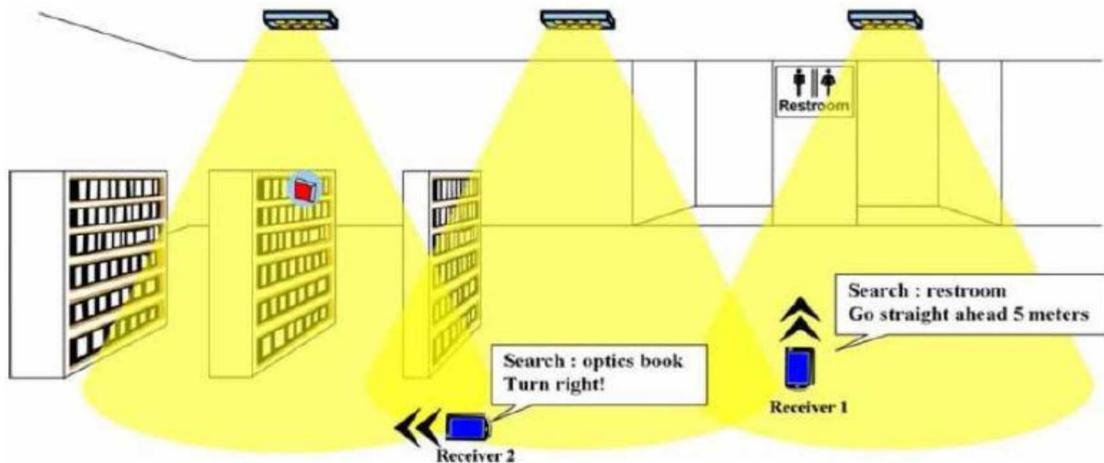


Figure II.13 : Utilisation du VLC pour la localisation intérieure [25]

➤ **Domaine médical** : Comme les ondes optiques n'interfèrent pas avec les appareils à radiofréquence RF, le VLC peut être utilisé en toute sécurité dans de nombreuses applications hospitalières. Par exemple, dans les couloirs, les salles d'attente, les chambres de patients et les blocs opératoires, la technologie VLC permettra un réseau de communication léger, ce qui éliminera les problèmes d'interférences électromagnétiques des smartphones et de l'utilisation du Wi-Fi dans les hôpitaux. Un réseau basé sur VLC peut également être utilisé pour la surveillance en temps réel et le rapport des mouvements et des signes vitaux du patient sans avoir besoin de câbles [3].



Figure II.14 : Illustration des systèmes VLC appliqués au domaine médical [3]

➤ **Les environnements dangereux :** Les industries telles que les usines pétrochimiques et les mines présentent des dangers importants en raison du risque d'explosion, ce qui rend la communication difficile. Cependant, la technologie VLC offre une solution réalisable car elle fournit non seulement une communication mais également un éclairage, sans poser aucun risque de fréquences radio. Par conséquent, VLC est la technologie idéale à utiliser dans de tels environnements [3].

➤ **Transmission de données (Li-Fi) :** Parmi les plus importantes applications du VLC on cite le Li-Fi (Light-Fidelity). Grâce à l'énorme bande passante disponible, la VLC offre une connexion internet à haut débit à partir des LEDs installé au plafond. Cette application est plus adaptée aux courtes distances (distance entre plafond et bureau) [23].



Figure II.15 : Exemple d'un système Li-Fi [23].

II.10.2 Systèmes VLC Outdoor

➤ **Le transport intelligent :** VLC pourrait être très utile dans les systèmes de transport intelligent (STI). Pour permettre la communication véhicule/ véhicule (V2V) et /ou infrastructure / véhicule (I2V, l'information peut être transmise à la voiture avant avec le phare et la voiture derrière avec les feux rouges. Les données se propagent ainsi sur l'autoroute. La Figure II.16 en montre un exemple [26].

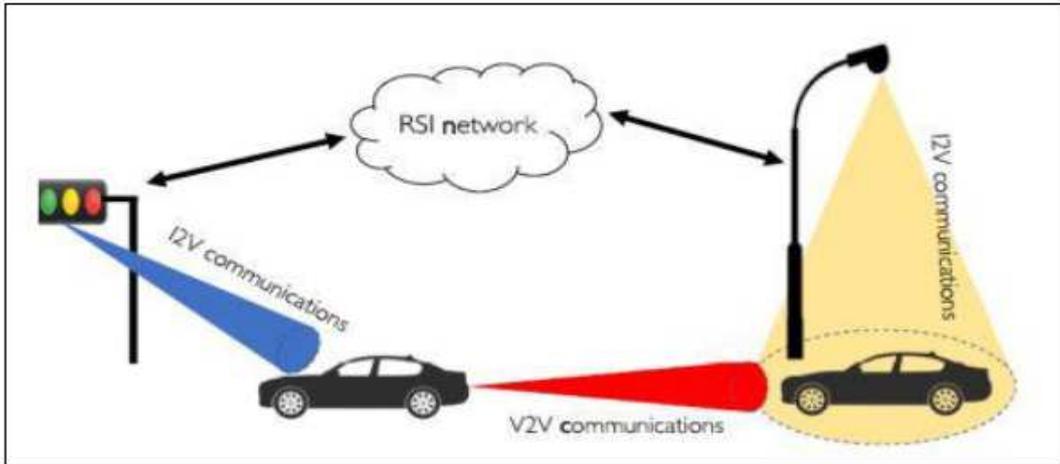


Figure II.16 : Communication V2V et I2V [26]

➤ **Communications sous-marines :** VLC peut prendre en charge des débits de données élevés sous l'eau, là où d'autres technologies sans fil comme les RF ne fonctionnent pas. Ainsi, les communications entre les plongeurs ou les véhicules télécommandés sont possibles.

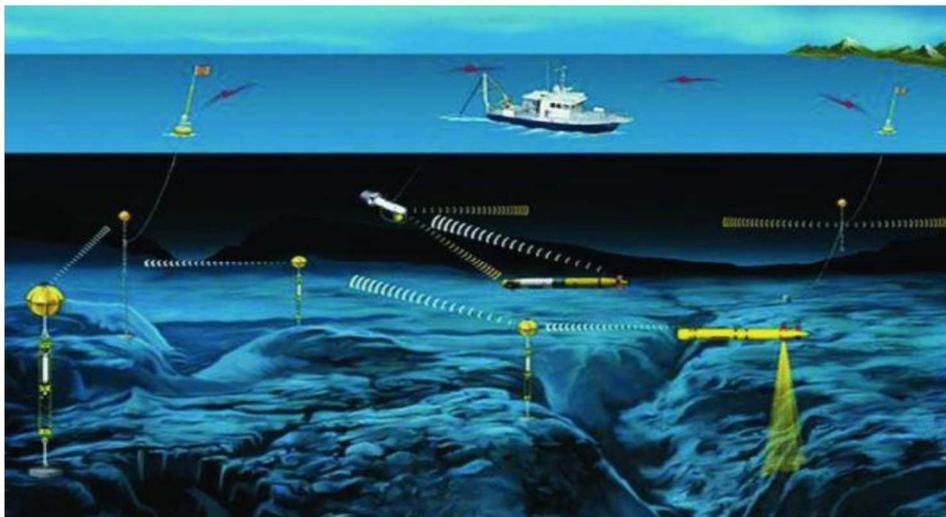


Figure II.17 : Utilisation de VLC dans la communication sous-marine [26]

II.11 Standardisation

Avec l'évolution continue des technologies VLC, il est nécessaire de développer les normes correspondantes pour harmoniser les protocoles de la couche physique (PHY) et les protocoles de la couche de contrôle d'accès au support (MAC), et aider à transférer rapidement les technologies dans les applications, ce qui a attiré l'attention de divers organismes de normalisation internationaux et nationaux.

En 1997, l'organisation IEEE a également développé un standard de communication IR dans 802.11 pour les réseaux sans fils locaux (WLAN) mais qui disparaît des versions révisées en 1999 au profit des communications RF ayant une plus grande portée.

En 2007, la Japan Electronics and Information Technology Industries Association's (JETA) établit un premier standard sur les systèmes utilisant l'optique sans fil en visible. A la suite, le Visible Light Communication Consortium (VLCC) introduit en 2008 de nouvelles spécifications, mais c'est à partir de 2011 qu'un premier véritable groupe de travail se forme afin de concevoir le standard IEEE 802.15.7, spécifique au domaine des VLC. Celui-ci est toujours en vigueur actuellement et différentes activités d'évolution de la norme sont en cours[14].

En 2014, un nouveau groupe de travail a été formé pour apporter des modifications à la norme précédente 802.15.7r1. La nouvelle norme, appelée IEEE 802.15.7r1, a été publiée en 2017.

En 2018, une nouvelle norme IEEE 802.15.7m a été créée pour faire évoluer le premier standard en incluant les communications utilisant un capteur d'image ou caméra (OCC, Optical Camera Communication) et les communications faible débit unidirectionnelles utilisant des LEDs, tandis que la norme IEEE 802.15.13 a pris en charge le développement des communications OWC à haute vitesse (Multi-Gigabit/s Optical Wireless Communications) [27].

II.12 Activités relatives aux communications VLC menées dans les pays

Les nombreux avantages de VLC ont incité de nombreux chercheurs à le développer dans différentes régions du monde. La section suivante présente certaines des orientations de recherche VLC les plus représentatives [27]:

- **Travaux de recherche sur les communications VLC menés en Chine**

Huawei, China Telecom, Sanan Optoelectronics, Shenzhen Absen, Unilumin et Cnlight figurent au nombre des entreprises chinoises spécialisées dans la mise au point de produits basés sur les communications VLC.

- **Travaux de recherche sur les communications VLC menés au Japon**

Le laboratoire Nakagawa de l'Université Keio, Panasonic Corporation, CASIO, NEC et FUJI Electric figurent au nombre des institutions/entreprises qui mènent des travaux de recherche ou conçoivent des produits sur les communications VLC au Japon.

- **Travaux de recherche sur les communications VLC menés en Corée**

L'Université nationale des sciences et des technologies de Seoul, l'Université Kookmin, l'Université Kongju, l'Université Namseoul, Samsung, LG et ETRI compte parmi les institutions/entreprises qui mènent des travaux de recherche ou conçoivent des produits sur les communications VLC en Corée du Sud.

- **Travaux de recherche sur les communications VLC menés aux Pays-Bas**

L'Université de technologie d'Eindhoven, Département des technologies des télécommunications et de l'électromagnétisme, le Groupe des communications électro-optiques et Signify (connu aujourd'hui sous le nom de Philips Lighting), KPN et KIEN participent également à des projets relatifs aux communications VLC.

- **Travaux de recherche sur les communications VLC menés en Turquie**

Les principales institutions menant des travaux de recherche sur les communications VLC sont Tubitak Bilgem, Okatem, l'Université Ozyegin et l'Université Medipol d'Istanbul. Ford Otosan, Farba, Aselsan et Turk Telekom participent à des projets relatifs aux VLC.

II.13 Conclusion

Ce chapitre décrit les principes fondamentaux des communications par lumière visible VLC, ainsi l'architecture et les différents composants de tel système. De plus, les avantages de cette technologie innovante ont été mis en évidence, et comme toute technologie, le VLC rencontre à son tour des contraintes et des limites. La modélisation du canal de propagation associée à la technologie VLC est également discutée. L'objectif est d'analyser le canal en tenant compte les différents modèles, et de déterminer certains paramètres essentiels tels que la réponse impulsionnelle et fréquentielle, le gain, et les sources de bruit. Il présente aussi les techniques de modulations pour les communications optiques sans fil utilisées dans les standards publiés, et détaille plus particulièrement les différents domaines d'applications tels que les systèmes VLC Indoor et les systèmes VLC Outdoor.

Finalement la technologie de communication par lumière visible VLC est considérée non seulement comme un complément mais aussi comme une alternative prometteuse aux systèmes de communication RF traditionnels dans certains scénarios.

Chapitre III :

Résultats de la simulation

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter l'ensemble du travail de simulation de système hybride RF/VLC pour les applications VLC indoor (dans une pièce dans l'hôpital, comme exemple) afin d'atteindre les performances de réseau sans fil 5G, dont le cadre d'une liaison descendante à l'aide de logiciel de simulation OptiSystem. Dans ce système, la technique de multiplexage OFDM en collaboration à la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est intégrée la porteuse RF d'onde millimétrique de fréquence 60 GHz.

Tout d'abord, nous allons présenter une généralité sur le système proposé, suivi des 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 RF/VLC à 60 GHz/mmWave simulée par le logiciel, définir chaque bloc et expliquer son fonctionnement. Enfin, nous allons décrire et expliquer les résultats de la simulation pour une modulation 16-QAM pour toutes les parties du système, à un débit de transmission égal à 100 Mb/s.

III.2 La transmission RF par onde Millimétrique (à 60 GHz)

Le terme ondes millimétriques (mmWave) concerne la gamme des fréquences comprises entre 30 GHz et 300 GHz. Au sein de ces fréquences, celles situées au voisinage de 60 GHz trouvent de plus en plus d'applications en communications sans fil à haut débit, c'est le candidat le plus authentique à la future technologie 5G [1].

La bande des 60 GHz présente une forte atténuation lors de la propagation dans l'espace libre, cette atténuation correspond à un pic d'absorption atmosphérique visible sur la figure III.1 qui est de l'ordre de 15 dB/km. Ce pic d'absorption limite les distances de propagation de l'onde. Un autre inconvénient majeur de cette bande de fréquence, réside dans la forte atténuation des signaux lors de la traversée d'une cloison : phénomène de blocage, leur propagation étant en grande partie empêchée par presque tout objet physique ce qui réduisant, de ce fait, leur zone de couverture à la taille d'une pièce [2][3]. Néanmoins, les systèmes à ondes millimétriques offrent plusieurs avantages par rapport aux systèmes de communication existants grâce à une large bande sans licence allant de 57 à 66 GHz. De plus, comme la largeur de bande est supérieure à celle de la bande centimétrique, la bande millimétrique est plus attrayante car elle est largement disponible dans le monde et n'est pas encore massivement utilisée. Son spectre, représenté sur la figure III.1, a été divisé en 4 canaux de largeur de 2,16GHz, contre 528 MHz pour le signal ULB en bande centimétrique [4].

Les fréquences porteuses en ondes millimétriques permettent des attributions de bande passante plus importantes, qui se traduisent directement par des taux de transfert de données plus élevés.

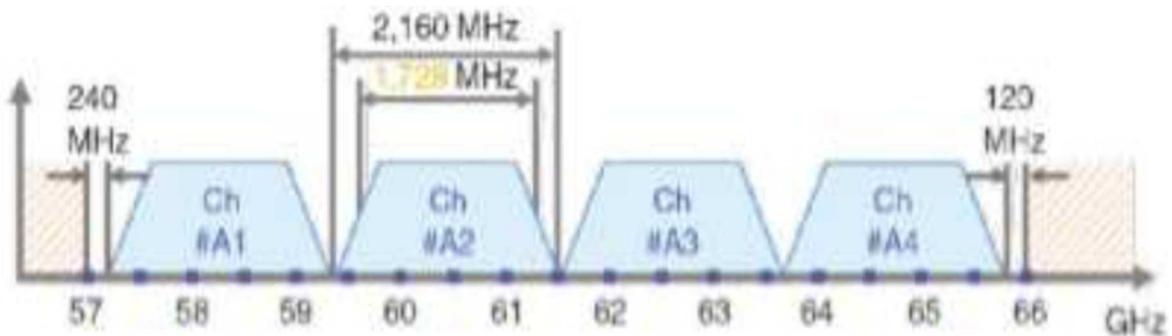


Figure III. 1 : Spectre ULB pour la bande millimétrique entre 57 et 66 GHz

III.3 L'architecture générale du système hybride RF/VLC

Le système hybride RF/VLC proposé dans ce chapitre dits à sauts multiples (multi-hop) où les informations transmises par la source sont relayées par un ou plusieurs nœuds relais à une destination. De cette façon, la source et la destination communiquent à travers le relais et non directement. Dans cette topologie, le sous-système optique (VLC) utilisé dans l'environnement Indoor (dans une pièce dans l'hôpital, comme exemple) et le sous-système radio (RF) utilisé dans l'environnement Outdoor. En plus, les communications source-relais et relais-destination sont réalisées via des liaisons optique et radio disposées en série. Grâce à cette conception hybride, le système est capable de fournir une transmission de données sans fil plus robuste et fiable, ce qui en fait une solution intéressante pour les applications d'éclairage intelligent et les communications sans fil en intérieur (Indoor).

Le système hybride RF/VLC proposé est conçu pour offrir une communication sans fil à haute vitesse pour une pièce intelligente (application médiale). Il est composé d'une source RF, d'un relais et d'un émetteur optique LED, ainsi qu'un destinataire, comme montré la figure III.2. La source RF sert de transmetteur et de source d'information, tandis que l'appareil mobile de l'utilisateur sert de destination finale pour recevoir des données à haute vitesse depuis le relais via le canal VLC. Le relais joue un rôle important dans le système en permettant la communication entre la source RF et la destination finale via le canal VLC. De plus, il est équipé d'un circuit de récupération d'énergie sans fil qui lui permet de récupérer de l'énergie du signal RF transmis par la source, ce qui améliore la portée de transmission du signal optique et la qualité de la communication.

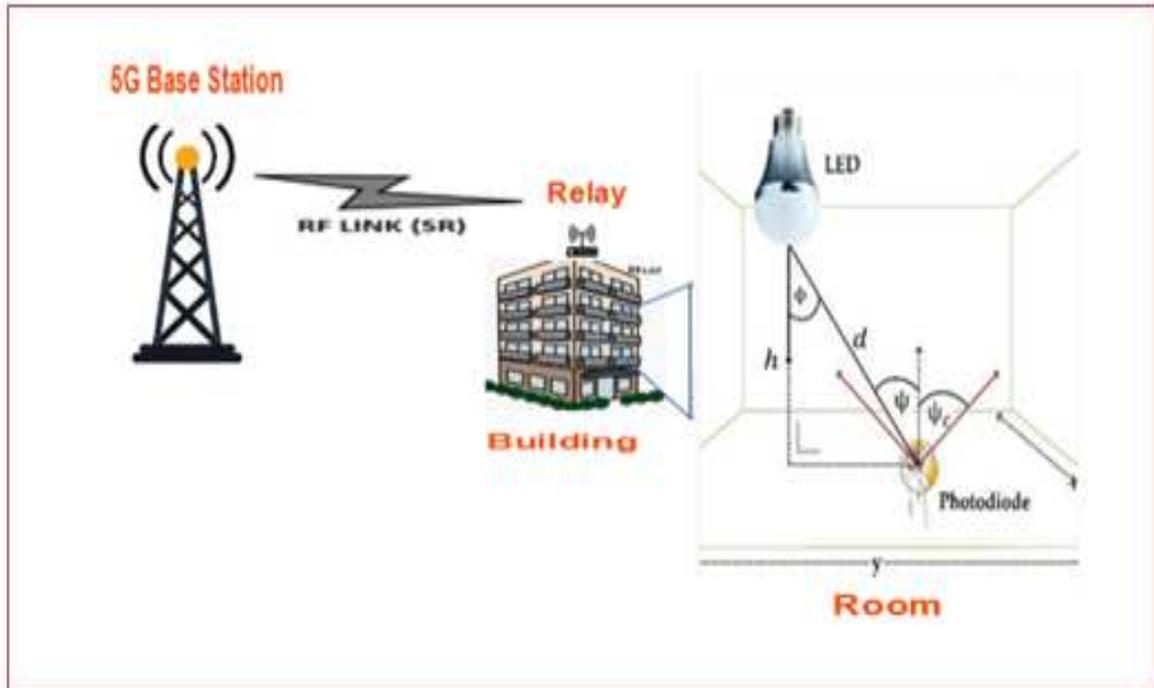


Figure III.2 : Le système hybride RF/VLC à sauts multiples

L'architecture générale du système hybride RF/VLC proposé est montrée par la figure III.3, elle est composée de deux parties comme suit :

- **Dans la partie RF,**

Dans la station de base (BS : Base Station), cette mise en œuvre module d'abord les données via un traitement OFDM avec exécution de la séquence binaire avec une modulation en quadrature appropriée QAM (16-QAM). Ensuite, un mélangeur RF-IQ est utilisé pour traiter le signal OFDM. Le signal de sortie est transposé sur une porteuse analogique RF/mmWave de 60 GHz par une opération de multiplication.

- **Dans la partie VLC,**

La porteuse analogique de 60 GHz pilote le MZM avec une porteuse optique générée par une LED qui sert comme un émetteur VLC. Le signal modulé est amplifié et ensuite transmis via le canal VLC à la section de réception.

Au niveau de la section de réception (chez l'utilisateur), une photodiode PD est utilisée pour convertir les signaux optiques reçus en courant électrique. Le signal résultant de la photodiode sera amplifié puis exécuté avec une démodulation analogique RF de 60 GHz suivie par un démodulateur en quadrature, ensuite par un démultiplexage OFDM suivi par un décodeur QAM afin de récupérer les données transmises.

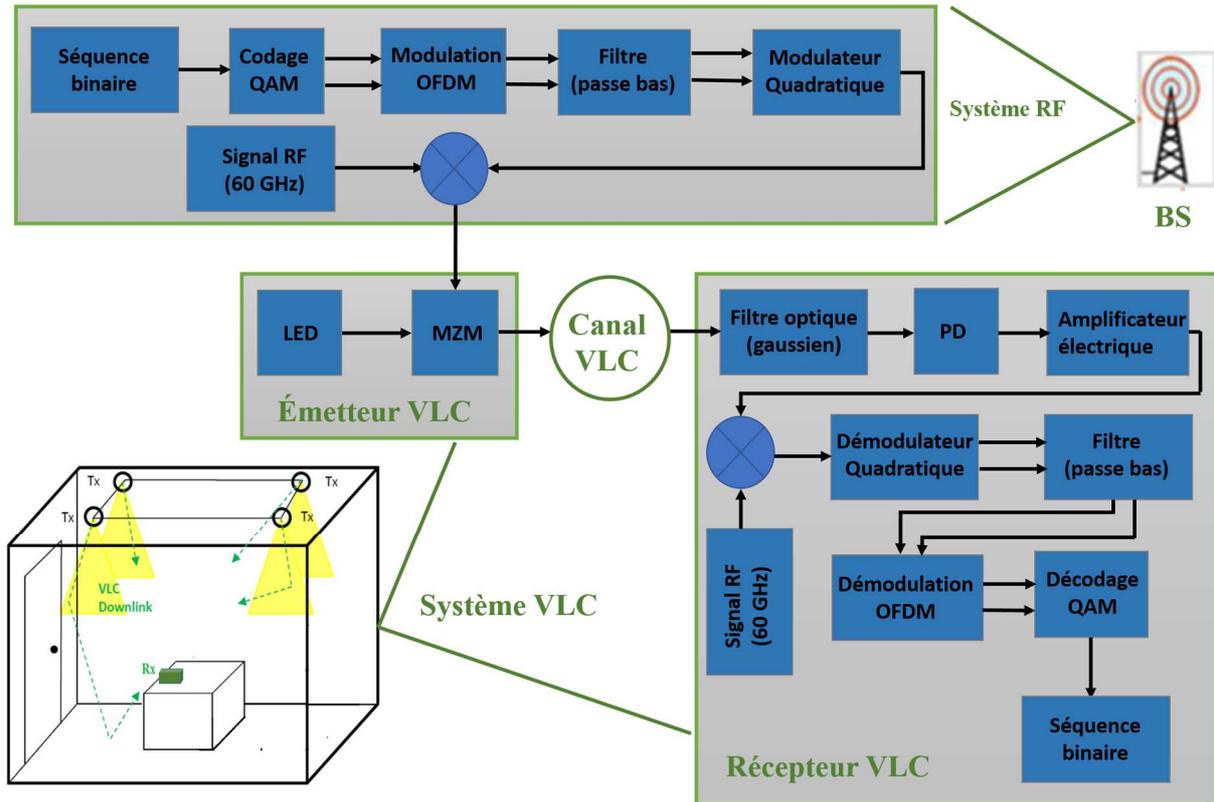


Figure III.3 : L'architecture générale de la liaison RF/VLC proposée.

Nous allons étudier les performances du système hybride RF/VLC présenté par la figure III.3, on considère le logiciel de simulation Optisystem.

III.4 Présentation du logiciel OptiSystem [5]

OptiSystem est un outil qui permet aux scientifiques et aux ingénieurs de modéliser, simuler, analyser et concevoir tout module de traitement du signal, allant du dispositif le plus élémentaire, au système complet de communication. OptiSystem est un environnement interactif qui allie des outils numériques efficaces à des fonctionnalités graphiques puissantes et une interface utilisateur conviviale.

La démarche à suivre se décompose en deux étapes :

- Construire le schéma bloc,
- Analyser le schéma
- Interface OptiSystem: L'interface OptiSystem contient une fenêtre principale repartit en plusieurs parties.
- Bibliothèque : une base de données de divers composants existants.

- Editeur du lay-out : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.
- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.

❖ Avantages du logiciel

- Fournir un aperçu de performances du système mondial de fibres optiques.
- Evaluer les sensibilités des paramètres aidant aux spécifications de tolérance de conception.
- Présenter visuellement les options de conception à des clients potentiels.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation approfondie du système.
- Fournir le balayage automatique des paramètres et d'optimisation.

OptiSystem permet l'automatisation et la conception de pratiquement n'importe quelle liaison optique dans la couche physique et analyse un large éventail de réseaux optiques.

OptiSystem permet aux utilisateurs de planifier, tester et simuler :

- WDM/ TDM ou la conception du réseau CATV (Câble Télévision).
- Conception d'anneaux SONET/ SDH.
- Conception de cartes de dispersion.
- Estimation des pénalités BER des systèmes avec différents modèles de récepteurs.

III.5 Description des principaux critères d'évaluation :

III.4.1 Diagramme de constellation [6] :

Un diagramme de constellation est la représentation d'un signal modulé par une modulation numérique comme la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) ou la modulation par sauts de phase (PSK). La représentation se situe dans un diagramme bi-dimensionnel dont les axes délimitent le plan complexe aux instants d'échantillonnage des symboles. Les points dans le plan complexe sont les images des symboles présents à cet instant donné résultant de la modulation. Les diagrammes de constellation peuvent être utilisés pour identifier le type des interférences ou de la distorsion dans un signal. À la réception le démodulateur examine les symboles reçus. Ces symboles peuvent avoir été perturbés par le canal ou le récepteur lui-même (bruit blanc gaussien additif, distorsion, bruit de phase, interférences).

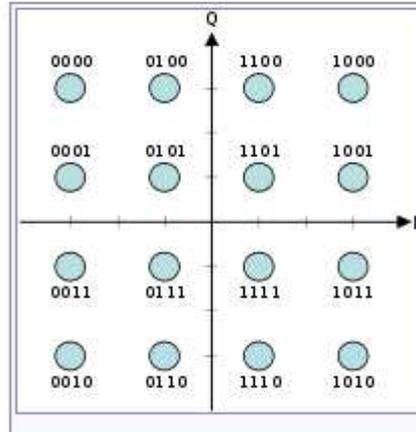


Figure III. 4 : Diagramme de constellation de 16-QAM.

III.5.2 Taux d'erreurs binaires :

Le taux d'erreurs binaires (BER :Bit Error Rate) permet d'évaluer la qualité d'une transmission optique. Il peut être déterminé en comparant la séquence de données binaires émise et celle reçue car il est défini par le rapport du nombre de bits erronés sur le nombre total de bits transmis :

$$\text{BER} = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre total de bits transmis}} \quad (\text{III.1})$$

III.6 Présentation de la liaison hybride RF/VLC sous l'OptiSystem

La figure III.5 représente l'architecture générale de liaison hybride RF/VLC simulée avec le logiciel OptiSystem20. Comme toute architecture de communication, cette liaison comporte une partie émettrice (la station de base (BS) dans notre cas), un canal de propagation (canal VLC) et une partie de réception (chez l'utilisateur).

Le principe de cette architecture est de recevoir des données sur une porteuse analogique de 60 GHz/mmWave à travers la lumière visible. Afin de réaliser cela, nous avons utilisé la LED comme un émetteur optique. Les données binaires émises sont générées à un débit de 100 Mbit/s par le générateur de données. Le format de modulation ici considéré, est le 16-QAM/OFDM et le modulateur optique utilisé est de type Mach- Zehnder (MZM).

Le signal optique modulé va combiner avec la lumière blanche externe qui on a considéré comme une source de bruit ambiant (en particulier la lumière de jour). Cette étape permet une estimation de l'effet lumineux (bruits) dégradant les performances du système VLC. Puis ce signal va transmettre dans le canal VLC dans un environnement intérieur (Indoor), une pièce, avec l'ordre de l'émetteur optique a été choisi Lambertien ($m=1$).

Au niveau de l'utilisateur (à la réception) le signal peut être détecté à l'aide d'une photodiode de type PIN. Le signal électrique obtenu est exécutés avec une démodulation analogique RF suivie par démodulateur en quadrature, démodulation OFDM et encodage QAM afin de récupérer les données du signal d'origine.

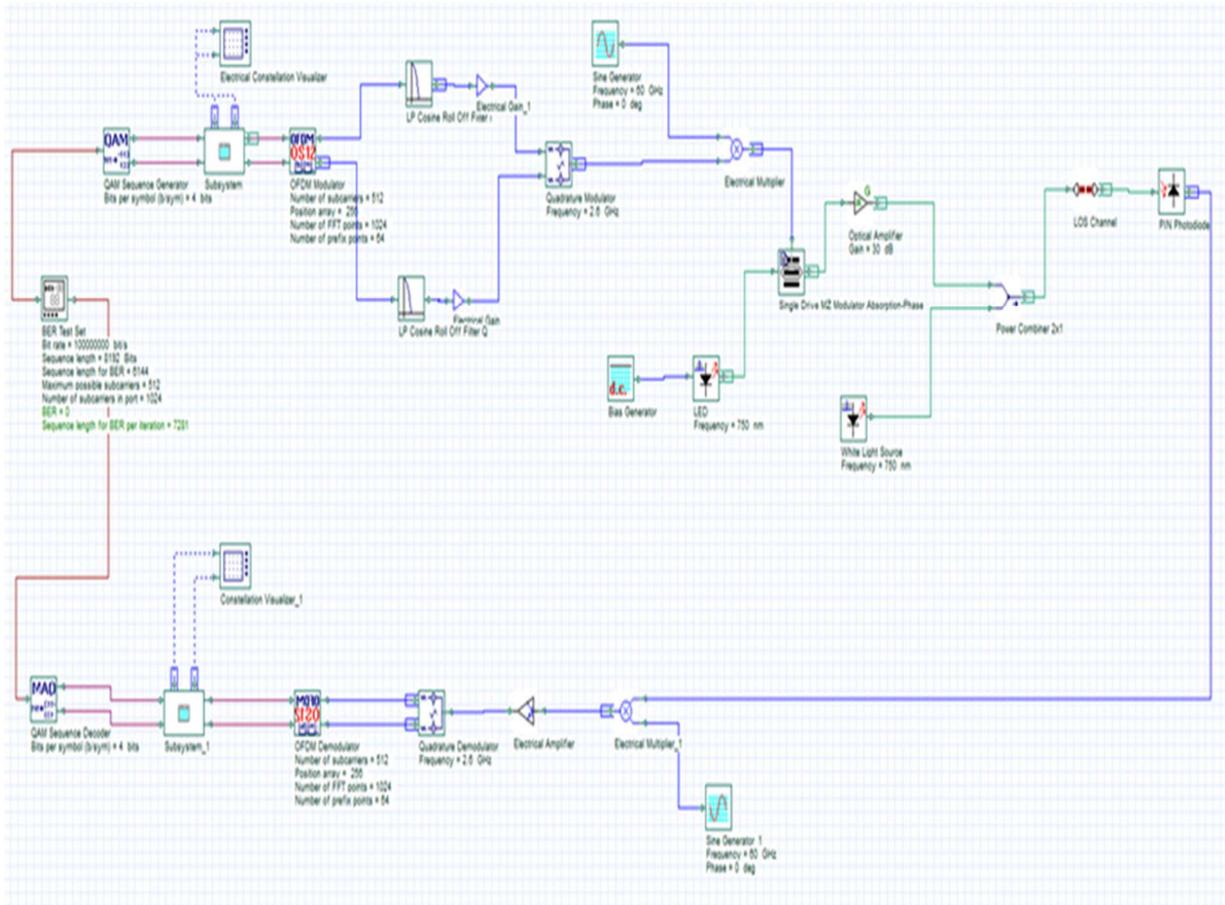


Figure III. 5 : L'architecture générale de la liaison RF/VLC simulé par Optisystem.

III.6.1 La station de base (BS)

La figure III. 6 représente le schéma de la station de base, elle comporte un générateur de bit qui génère une séquence de bits de 0 et 1 avec une probabilité égale. Dans cette simulation, la séquence est de longueur 16 384 bits. Un modulateur QAM qui doit générer les bits par symbole pour toutes les formes de QAM utilisées dans la simulation (16-QAM), suit par des filtres passés bas pour atténuer l'effet de bruit, et un bloc de modulation OFDM composé de paramètres importants tels que le nombre de sous-porteuses, et un modulateur en quadrature qui est utilisé pour convertir le signal à une fréquence RF élevée, on utilise dans ce système la fréquence de 2.6 GHz (selon la norme la norme IEEE 802.11ad). Un générateur de porteuse RF de 60 GHz, et un mélangeur pour transporter le signal 16-QAM/OFDM sur une porteuse analogique de 60 GHz/mmWave.

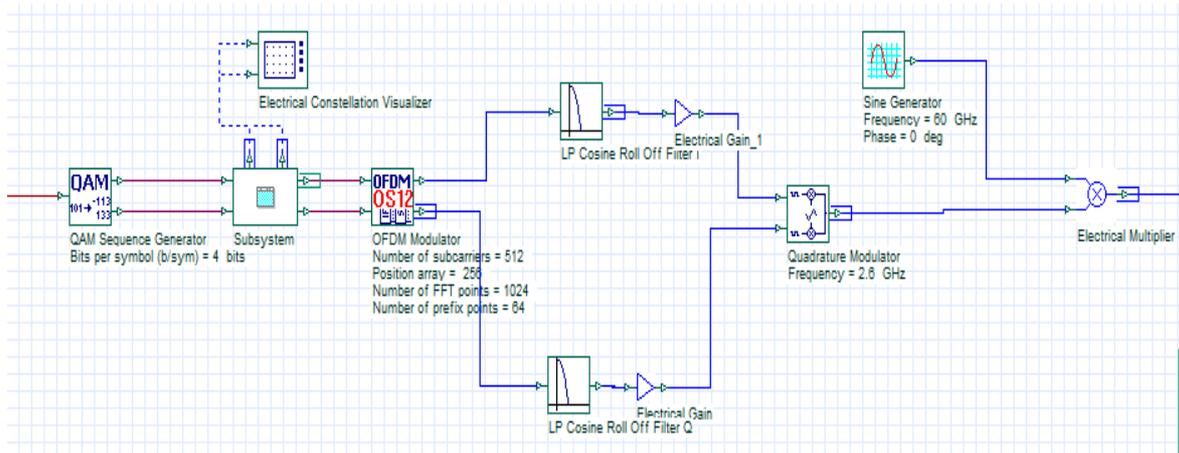


Figure III. 6 : La station de base (BS)

La station de base comporte les blocs suivants :

- **Le modulateur QAM :** Il Génère deux séquences de symboles M-aires parallèles à partir de signaux binaires, on utilise un modulateur de 16 états. Les paramètres de ce modulateur sont résumés dans le tableau ci-après.

Nombre des bites par symbole (bit/sym)	4, bit
Type de constellation	Double

Tableau III. 1: Caractéristique du modulateur QAM

- **Le modulateur OFDM :** Cette composante module un signal numérique en plusieurs sous-porteuses orthogonales. Les paramètres du modulateur OFDM sont résumés au tableau III.2.

Nombre de sous-porteuses	512 sous-porteuse
Numéro de point de préfix	64
Nombre de FFT point	1024
Position array	256

Tableau III. 2: Caractéristique du modulateur OFDM

- **Filtre passe bas :** Le filtre passe-bas est utilisé pour rejeter le bruit et les interférences des composants qui se situent en dehors des informations du spectre du signal dont ces caractéristiques sont donnée par le tableau III.3 :

fréquence de coupure	Symbol rate Hz
La profondeur	100 dB
Le facteur de roll	0.2

Tableau III. 3: Caractéristique du filtre passe bas

➤ **Modulateur en quadrature** : Le modulateur en quadrature implémente un modulateur d'amplitude analogique en quadrature ces caractéristique sont :

La fréquence	2.6 GHz
Le gain	0.01

Tableau III. 4: Caractéristique du modulateur quadratique

➤ **Générateur de sinus** : Génère un signal électrique sinusoïdal, ces paramètres sont :

Fréquence	60 GHz
Amplitude	1 a.u

Tableau III.5: Caractéristique du générateur de sinus

III.6.2 Le canal de transmission :

La figure III. 7 représente le schéma de canal de transmission. Une fois le signal 16-QAM/OFDM/RF transmis par la station de base, il est reçu à travers un relais qui fait une amélioration de ce dernier. Ce signal amélioré est ensuite modulé par le modulateur MZM avec une porteuse optique produite par une LED de longueur d'onde égale 750 nm, l'ordre de Lambertien a été choisi ($m=1$). Un générateur de courant continu d'amplitude 0.4 A est de rôle alimenter la LED. Le signal est ensuite amplifié et combiné avec la lumière blanche (bruit) avant d'être transmis via un canal VLC, au sein d'une zone Indoor (une pièce) de dimensions [5 x 5 x 3 m].

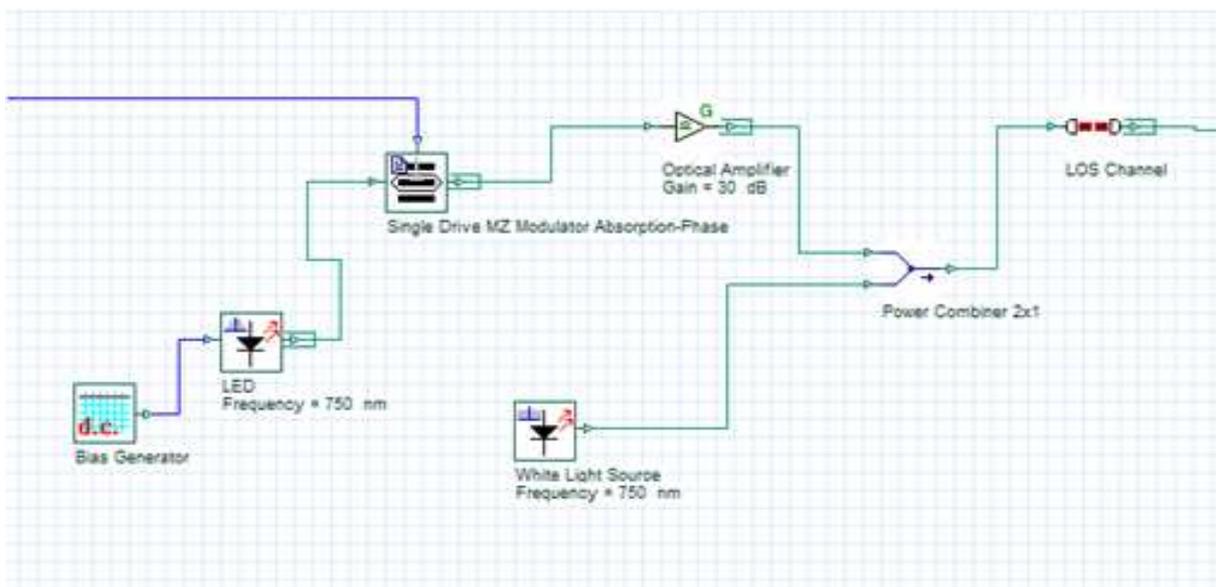


Figure III. 7: Canal de transmission

Le canal de transmission comporte les blocs suivants :

- **Le modulateur Mach-Zender** : Les paramètres caractéristiques du MZM sont résumés comme suit :

taux d'extinction	1.3
tension de modulateur	1.6 V

Tableau III. 6: Caractéristique du Mach-Zender

- **LED** : Nous utilisons le modèle de LED de la bibliothèque OptiSystem.

Fréquences (longueur d'onde)	750 nm
Bande passante	6 THz
Largeur de raie	40 MHz

Tableau III. 7: Caractéristique de la LED

- **Source de la lumière blanche** : Les paramètres de cette source sont résumés ci-après.

Fréquences (longueur d'onde)	750 nm
Bande passante	6THz
Largeur de raie	40 MHz

Tableau III. 8: Caractéristique de la lumière blanche

- **Le canal VLC** : les caractéristiques de cette liaison sont résumées dans le tableau ci-après.

	Paramètres	Valeurs
La pièce (Room)	Dimensions	5 x 5 x 3 m
	Coefficient de réflexion	0.8
Source (LEDs)	Localisation (1 LED)	(2.5 2.5 3)
	Localisation (4 LED)	(1.25 1.25 3), (1.25 3.75 3), (3.75 1.25 3), (3.75 3.75 3)
	Tarnsmitter half-angle	60°
	Irradiance half-angle	10°
Récepteur (PD)	Inccidence half-angle (FoV)	10°
	Index consatraion	3
	Air effective	1 cm ²

Tableau III. 9: Caractéristique du canal VLC

III.6.3 La partie de réception (chez l'utilisateur)

La figure III.8 représente le schéma de la partie de réception (chez l'utilisateur). Le signal optique reçu converti en signal électrique par la photodiode de type PIN, et exécutés avec une démodulation RF (la même fréquence RF modulée à 60 GHz), suivie par démodulateur en quadrature puis le signal est démodulé avec un démodulateur OFDM pour extraire les symboles. Puis décodé avec décodeur QAM pour obtenir les bits d'origine.

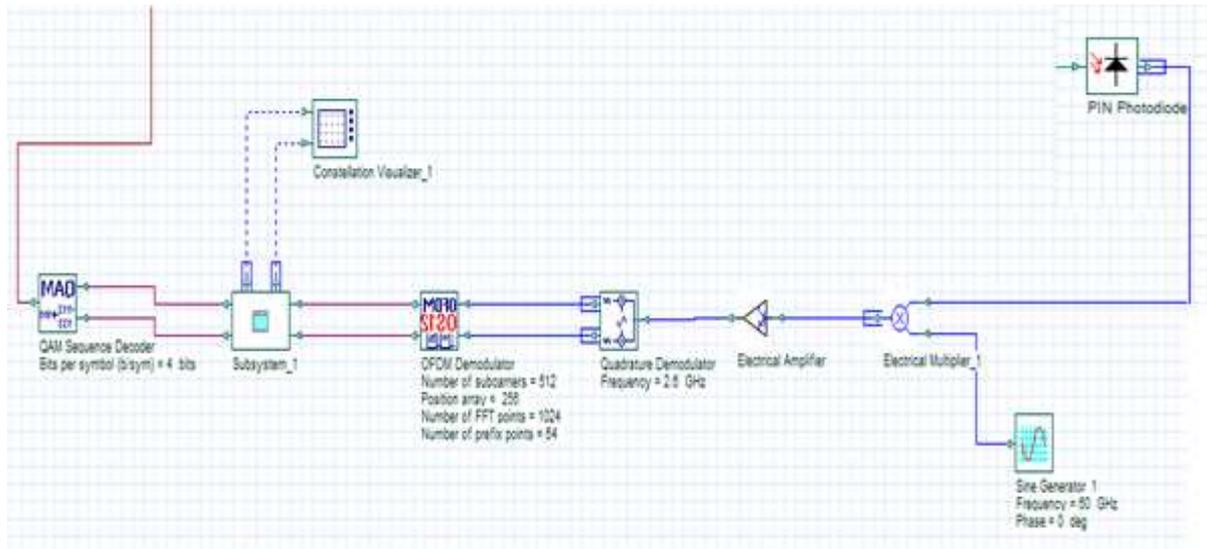


Figure III.8 : La partie de réception

La partie de réception comporte les blocs suivants :

➤ **Le photodétecteur** : Le photodétecteur utilisé est une photodiode PIN. Les paramètres utilisés sont résumés dans le tableau suivant :

Rendement	1 A/W
Courant d'obscurité	10 nA
Bruit Thermique	100e-024W/Hz
largeur de bande de modulation	2 GHz
La fréquence centrale	750 nm

Tableau III. 10: Caractéristique de la photodiode

➤ **L'amplificateur électrique** : Le signal sortant de la photodiode est souvent atténué. L'amplificateur sert à amplifier le signal avec un rapport de bruit thermique additionnel.

Gain	16 dB
La puissance de bruit	-50 dBm (10^{-6} mW)

Tableau III. 11: Caractéristique de l'amplificateur

➤ **Démodulateur en quadrature** : est un démodulateur à amplitude cohérente pour les composantes en quadrature (I et Q). Les paramètres utilisés sont résumés dans le tableau suivant :

La fréquence	2.6 GHz
Le gain	10000
fréquence de coupure du filtre	0.6*symbole rate Hz

Tableau III. 12 : Caractéristique du démodulateur quadratique

➤ **Démodulateur OFDM** : Ces caractéristiques sont :

nombre de sous-porteuses possibles	512 sous-porteuses
Référence bit rate	Bit rate /m (2,4,6)
Nombre de FFT	1024

Tableau III. 13: Caractéristique du demodulateur OFDM

➤ **Démodulateur QAM** : Il décode deux séquences de symboles M-aires QAM parallèles en un signal binaire. Ces paramètres sont :

Nombre de préfix point	64
Gain	10

Tableau III. 14: Caractéristique du démodulateur QAM

III.7 Résultats de la simulation

Dans la partie RF de la liaison hybride RF/VLC, les données binaires transmises sont générées par un générateur de séquence binaire pseudo-aléatoire (PRBS) à un débit de 100 Mbit/s, et une longueur de 16 384 bits. La séquence binaire est ensuite divisée en deux sous-séquences parallèles sur deux porteuses en quadrature (I et Q), chaque une est codée avec un encodeur 16-QAM, qui utilisent 4 bits par symbole pour moduler les 512 sous-porteuses du signal OFDM. La figure III.9 ci-dessus montre le signal binaire d'origine et le diagramme de constellation du signal codé 16-QAM.

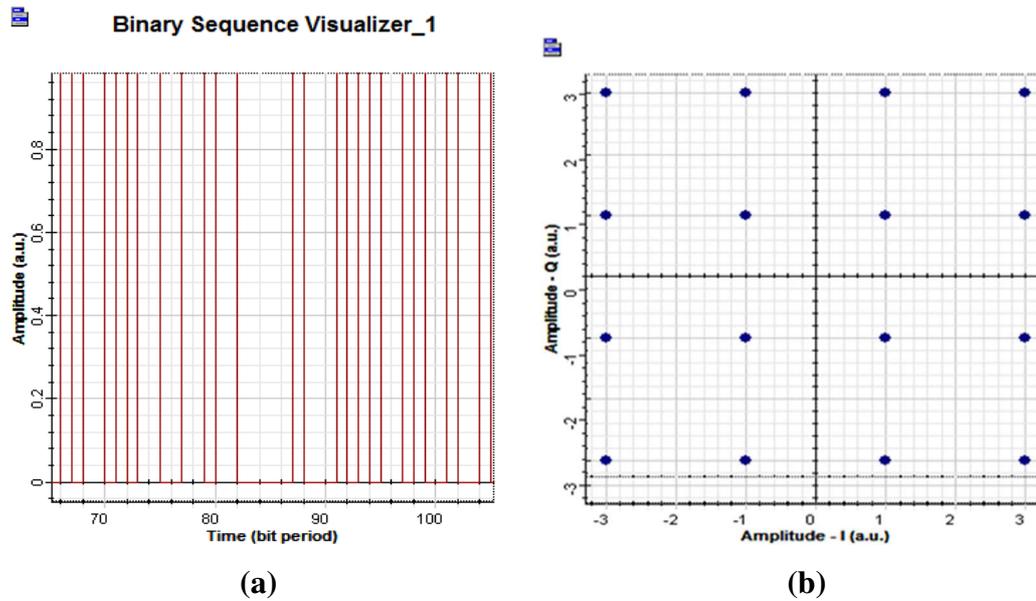


Figure III. 9 : Le signal binaire d'origine (a), et le diagramme de constellation du signal codé 16-QAM (b).

Une fois le signal OFDM généré, il sera modulé par un modulateur en quadrature. Avant la modulation, le signal OFDM est filtré par un filtre passe-bas pour atteindre la fréquence RF de 2,6 GHz (la norme IEEE 802.11ad). Le signal de sortie va transposer sur une porteuse RF analogique de 60 GHz/ mmWave par une opération de multiplication, comme illustré par les Figure III.10, 11, 12, et 13, respectivement.

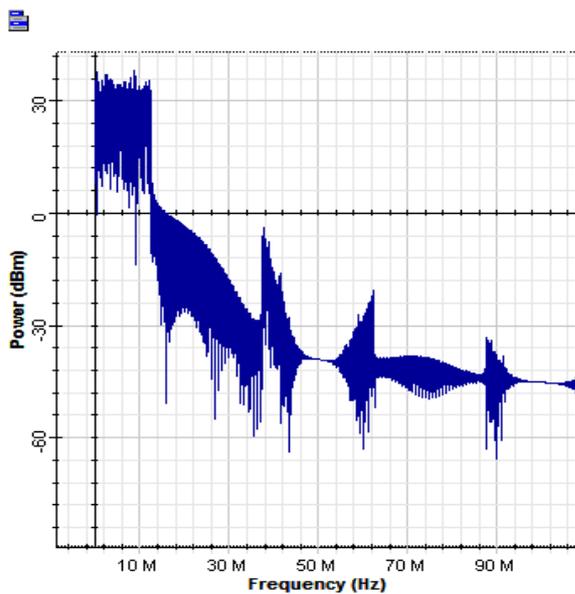


Figure III. 10 : Le signal OFDM initial

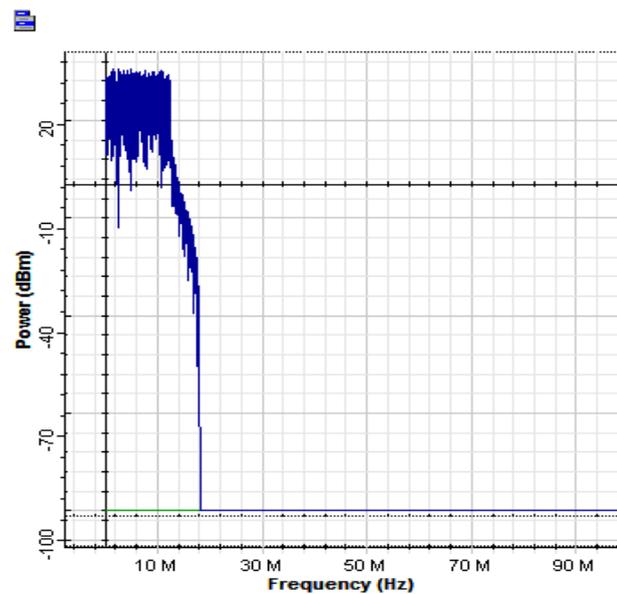


Figure III. 11 : Signal OFDM filtré

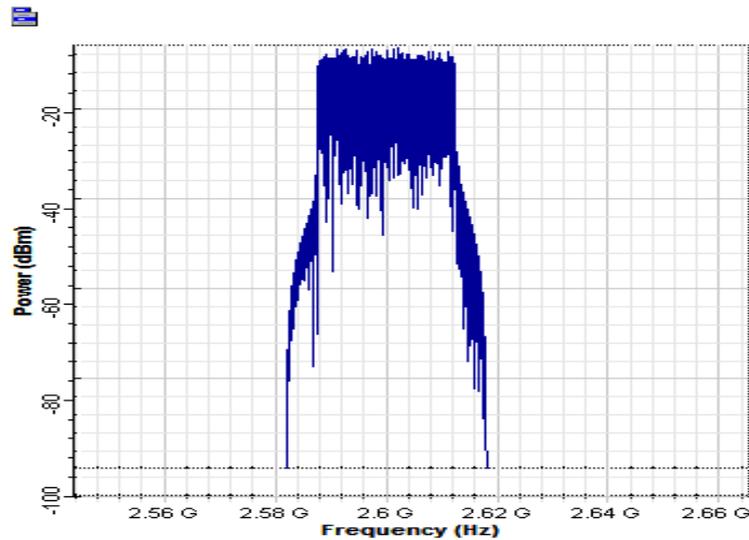


Figure III.12 : Le spectre du signal à la sortie du modulateur en quadrature

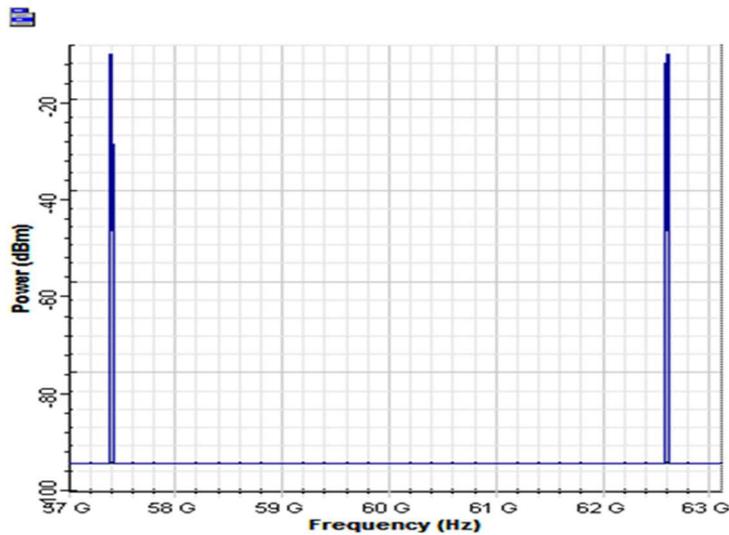


Figure III.13 : Le spectre du signal à la sortie du multiplication

Dans la partie VLC de la liaison hybride RF/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 RF reçu, utilisant un modulateur externe MZM qui est piloté par le signal RF obtenu à la sortie de multiplicateur (signal 16-QAM-OFDM/RF), le signal optique modulé est ensuite amplifié par un EDFA, et combiné avec un bruit ambiant. Le signal résultant est ensuite envoyé dans le canal VLC pour un trajet LOS, comme illustré par les Figure III.14, 15, et 16, respectivement.

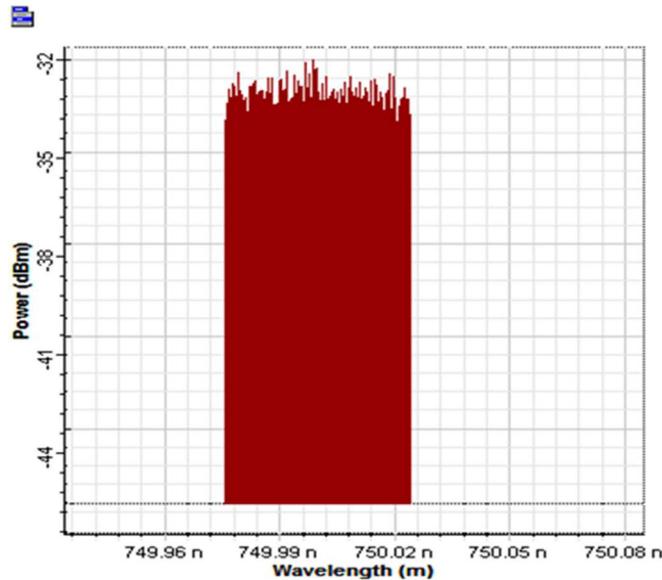


Figure III. 14 : Spectre à la sortie de la LED

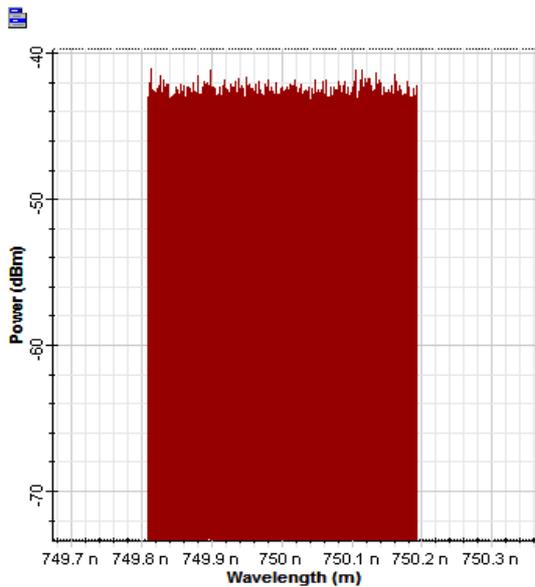


Figure III.15 : Le spectre optique à la sortie du MZM

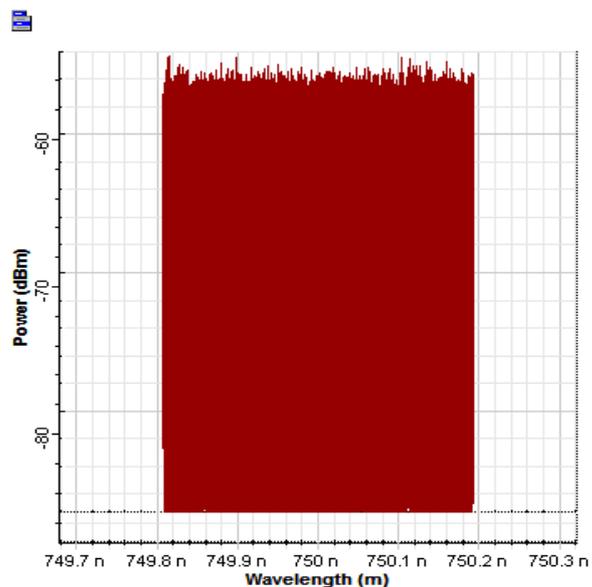


Figure III.16 : Le spectre optique à la sortie de canal VLC

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.17. Le signal électrique est soumis à un processus de démodulation RF (la figure III.18), pour retranché la fréquence 60 GHz/mmWave, suivie par démodulateur en quadrature, puis démodulation OFDM et encodage QAM afin de récupérer les données binaires originales. Le signal après le démodulateur quadrature est donné par figure III.19. On peut observer que le signal est bien reçu, mais bruité à cause de différente source de bruits, tels que le bruit ambiant et le bruit thermique de la PD.

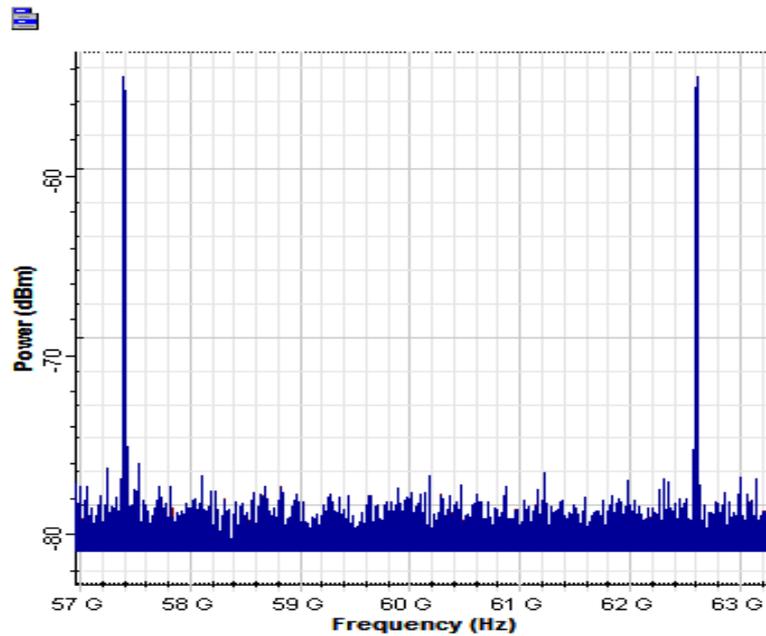


Figure III.17 : Le signal reçu à la sortie de la PD

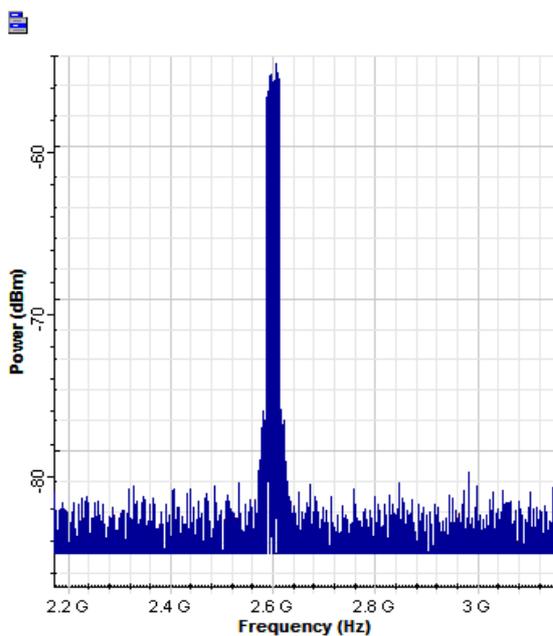


Figure III. 18: Le signal à la sortie du démodulateur RF

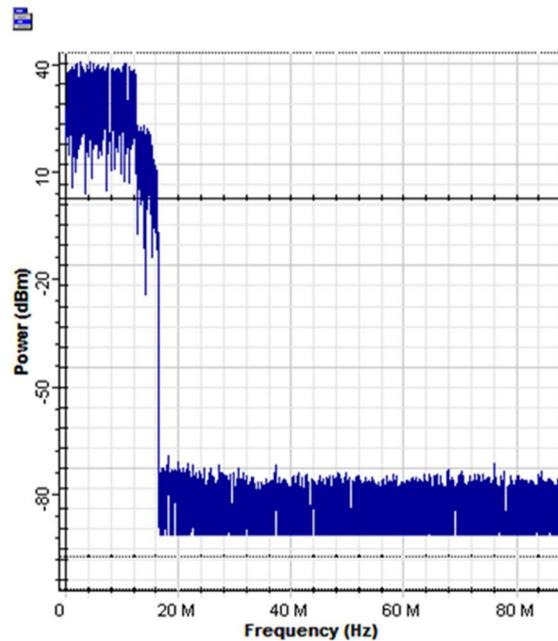


Figure III. 19: Le signal à la sortie du démodulateur en quadrature

III.8 Etude des performances du système hybride RF/VLC

Nous étudions les performances de notre système en termes des paramètres globales des systèmes tels que la constellation et le BER, et les paramètres du canal VLC tels que la réponse impulsionnel du canal, les directions de l'émetteur /récepteur, la puissance optique reçus, et le SNR.

III.8.1 Performances lies aux paramètres globales du système

Nous montrons dans la Figure III.20, le diagramme de constellation des signaux reçus pour le format de modulation 16-QAM. Il apparaît sur le diagramme obtenu une certaine distorsion dans le signal reçu, cette distorsion est due à l'atténuation et de différentes sources de bruits comme le bruit de la source optique (LED) et de la PD et de la lumière ambiante qui représente la source de bruit la plus gênante dans le cas de la liaison VLC.

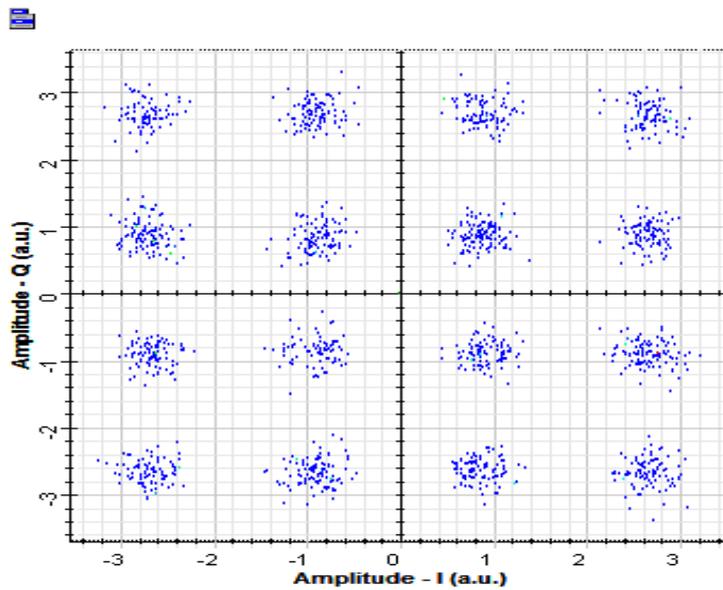


Figure III. 20 : Diagrammes de la constellation du signal reçu.

La Figure III.21 montre la variation de BER en fonction de la variation de SNR, il est clair que la qualité de signal se détériore (BER augmente) avec la diminution du SNR. Ainsi, pour obtenir un BER inférieur à 10^{-3} , le rapport SNR doit être supérieur à 10 dBm.

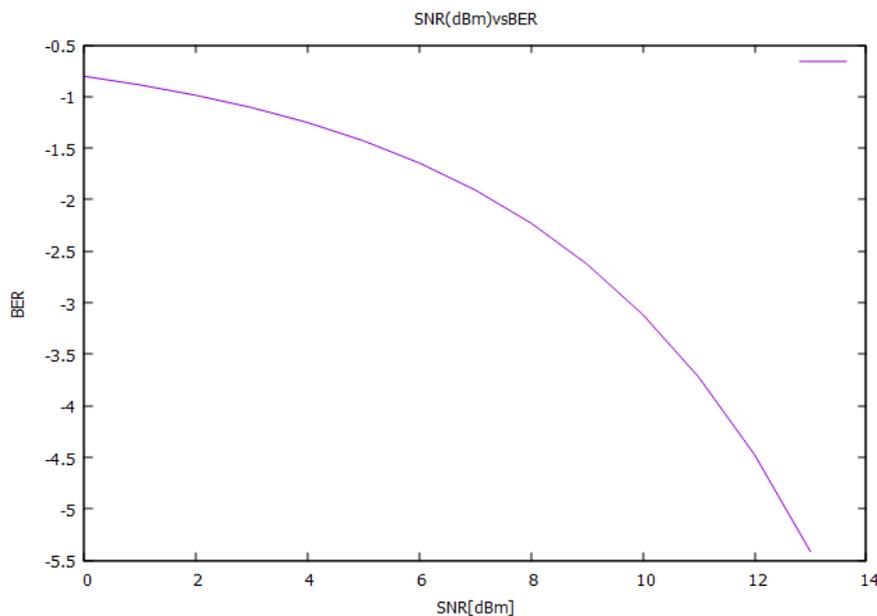


Figure III.21 : BER en fonction de SNR

III.8.2 Performances liées aux paramètres du canal VLC

Les figure III-22 et figure III-23 montrent les réponses impulsionnelle et fréquentielle, respectivement, pour des sources optiques LED avec un angle à mi-puissance égale à 12.5° , (transmitter half-angle) considérant la puissance transmise $P_t = 1.25 \mu\text{W}$. La réponse impulsionnelle du canal $h(t)$ dépend de la configuration indoor ainsi que de la position de l'émetteur et du récepteur. La figure III-22 illustre les différentes composantes de la $h(t)$ associées au lien LOS ainsi qu'à chacune des réflexions considérées. On observe ainsi que la puissance diminue avec l'ordre des réflexions alors qu'au contraire, l'étalement augmente. En effet, en accord avec l'équation (II.10), chaque rayon optique réfléchi est atténué d'un facteur $\rho/(d_1^2 \cdot d_2^2)$ et subit un retard de $(d_1+d_2)/c$. De ce fait, plus on considère de réflexions, plus cela affectera l'étalement de la $h(t)$. Outre le fait de confirmer que la contribution en puissance en réception apportée par chaque réflexion diminue lorsque l'ordre augmente, on observe ici que le lien LOS constitue la majorité du signal reçu. Cela signifie que la perte éventuelle de ce lien LOS (par exemple dans le cas d'un blocage), peut impacter de manière significative la puissance reçue. On peut observer aussi sur la figure III-22 que plus de 90 % de la puissance reçue est contenue dans les trajets d'ordre 0 et 1. Donc, le comportement de la liaison dépend fortement de l'angle à mi-puissance (transmitter half-angle) des sources LED.

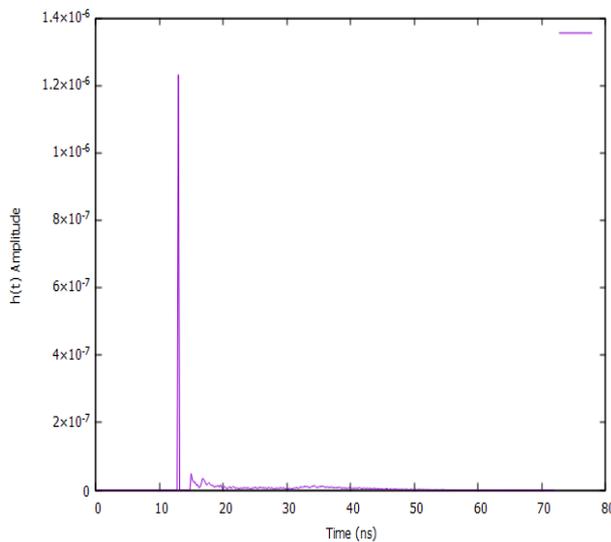


Figure III. 22 : La réponse impulsionnelle

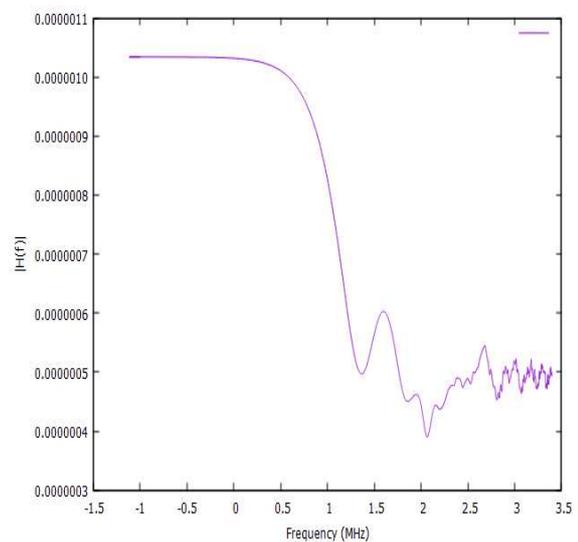


Figure III. 23 : La réponse fréquentielle

a. Performances liées aux paramètres Emetteur/Récepteur

La performance du système RF/VLC peut être aussi étudiée en mesurant la puissance reçue en fonction de différents paramètres Emetteur/Récepteur de la partie VLC, tels que les demi-

angles de l'émetteur et de récepteur optique pour une distance fixé entre l'émetteur et le récepteur à 3 m, les résultats sont représentés par les figures ci-dessous.

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

La figure III.24 est tracée pour différentes valeurs de l'angle à mi-puissance $\phi_{1/2}$, c'est-à-dire en fonction de la directivité des émetteurs. Nous constatons que plus le demi-angle d'ouverture de l'émetteur est grand, plus la puissance reçue est diminuée. Cela est dû au fait que la lumière émise par l'émetteur est dispersée sur une zone plus large, ce qui réduit la densité de puissance lumineuse par unité de surface que la photodiode est capable de capter.

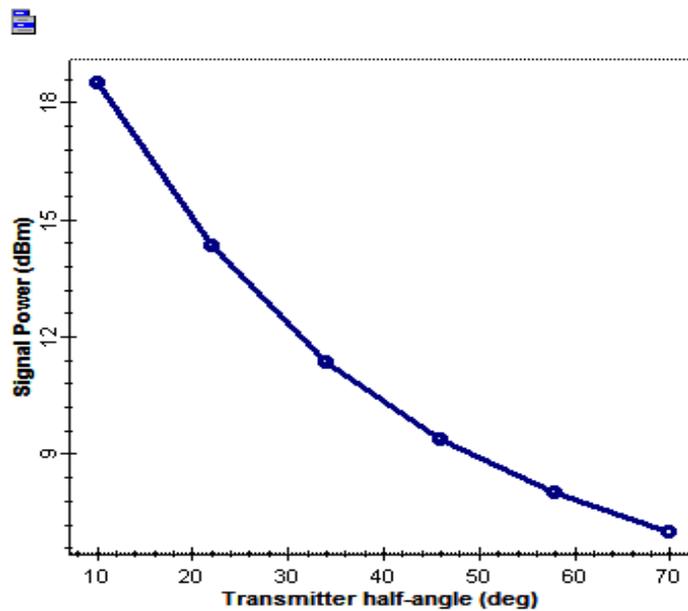


Figure III.24 : La puissance reçue en fonction de l'angle à mi- puissance (Transmitter half-angle) ($\phi_{1/2}$)

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

D'après la figure III.25 on peut voir que la puissance reçue du système avec un angle à mi-puissance $\phi_{1/2} = 60^\circ$ est faible, par rapport à une liaison VLC avec $\phi_{1/2} = 45^\circ$, avec chaque augmentation de l'angle à mi- irradiance (irradiance half-angle), la puissance reçue est diminuée. Brièvement, lorsque l'angle à mi- irradiance est petit, le récepteur optique reçoit un faisceau de lumière concentré, ce qui lui permet de collecter efficacement la lumière. Mais lorsque l'angle à mi- irradiance devient plus grand, la lumière se diffuse davantage et le faisceau devient plus large, ce qui rend plus difficile pour le récepteur optique de collecter la lumière de manière efficace.

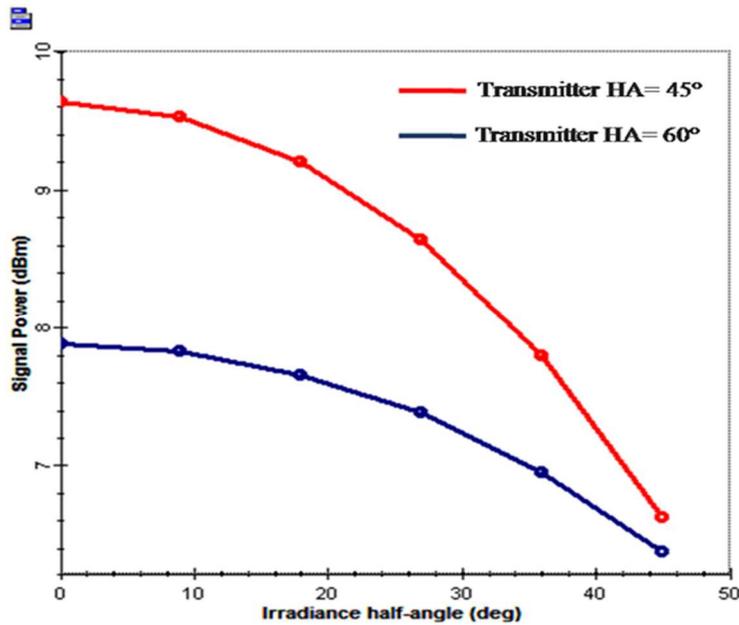


Figure III.25 : La puissance reçue en fonction de l'angle à mi-irradiance (irradiance half-angle) pour $\phi_{1/2} = 45^\circ$, et $\phi_{1/2} = 60^\circ$

❖ En fonction de l'angle à mi- incidence (incidence half-angle) ou FoV

La figure III.26 montre que la puissance reçue du système avec un $\phi_{1/2} = 60^\circ$ est faible, par rapport au système avec $\phi_{1/2} = 45^\circ$ et avec chaque augmentation de FoV, la puissance reçue va diminuer. 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.

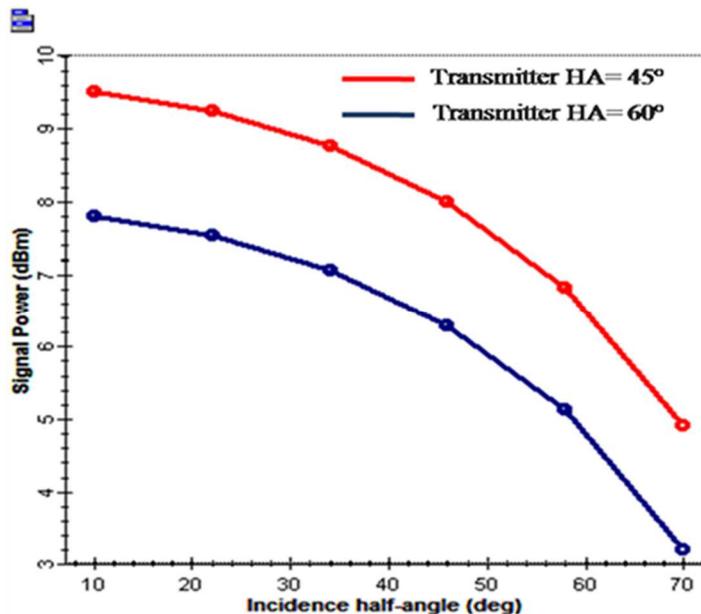


Figure III.26 : La puissance reçue en fonction de FoV (incidence half-angle) pour $\phi_{1/2} = 45^\circ$, et $\phi_{1/2} = 60^\circ$

b. Performances liées à la puissance optique reçue

La distribution de la puissance optique au niveau du PD dans un trajet LOS pour un demi-angle (l'angle à mi-puissance) de $\phi_{1/2} = 12,5^\circ$ (en ignorant la réflexion des murs) est illustrée à la figure III.27. On peut voir qu'avec une seul LED, la puissance optique reçue aux coins de la pièce (Room) est faible, alors qu'au centre de la pièce, la puissance reçue est élevée. Donc, il existe une distribution non-uniforme de la puissance optique reçue, au centre avec une puissance maximale de 14 dBm et une puissance minimale de 4 dBm aux coins de la pièce. Cependant, en fonction de ce demi-angle, une telle répartition uniforme de la puissance n'est pas possible même si on augmente le nombre de LED utilisés (avec 4 LED dans notre cas). La distribution de la puissance optique reçue au niveau de la PD avec un demi-angle de $12,5^\circ$ est illustrée à la figure III.28.a. On voit qu'il existe plus de 40 dB de différence de puissance optique entre le niveau de puissance minimum (-20 dBm) et maximum (25 dBm), conduisant à un SNR élevé dans certaines zones et à une zone morte dans de nombreuses zones (figure III.29.a). La figure III.28.b montre la distribution de la puissance reçue au niveau du PD, y compris l'influence de la réflexion (un demi-angle de $\phi_{1/2} = 60^\circ$). Comme indiqué dans la figure, la distribution de la puissance reçue est presque uniforme (de 14 à 17.5 dBm) pour toute la pièce, conduisant à un SNR uniforme dans toutes les zones de la pièce (figure III.29.b).

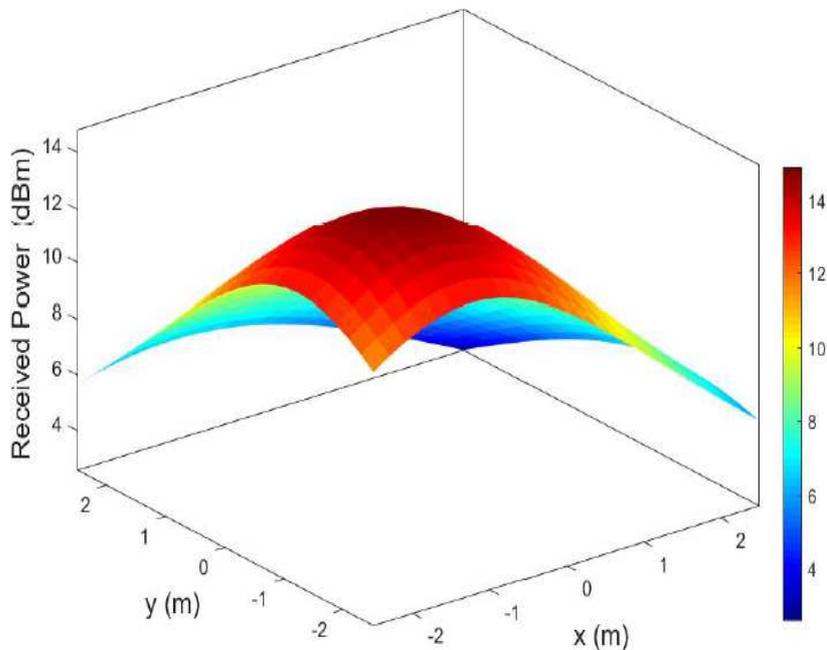
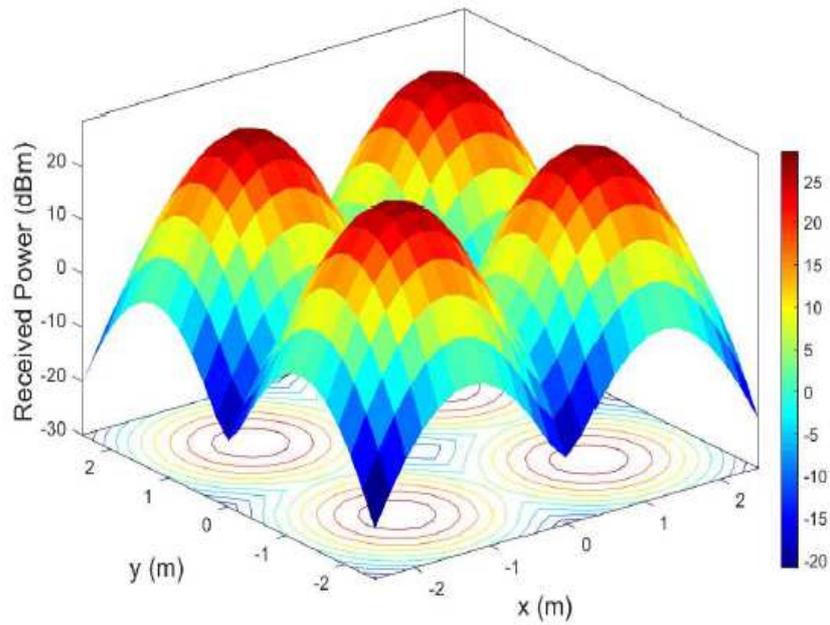
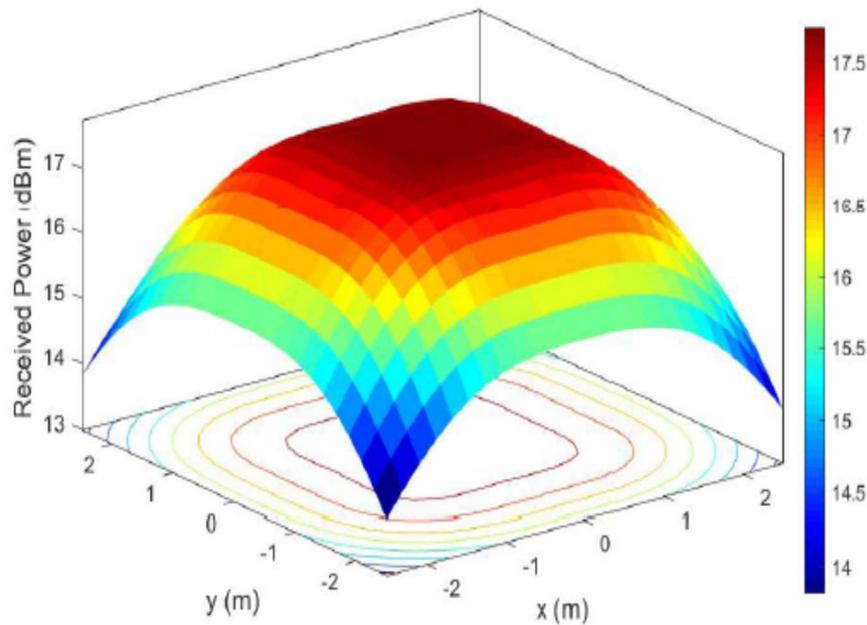


Figure III.27 : Distribution de la puissance optique reçue pour 1 LED (pour $\phi_{1/2} = 12,5^\circ$)



(a)



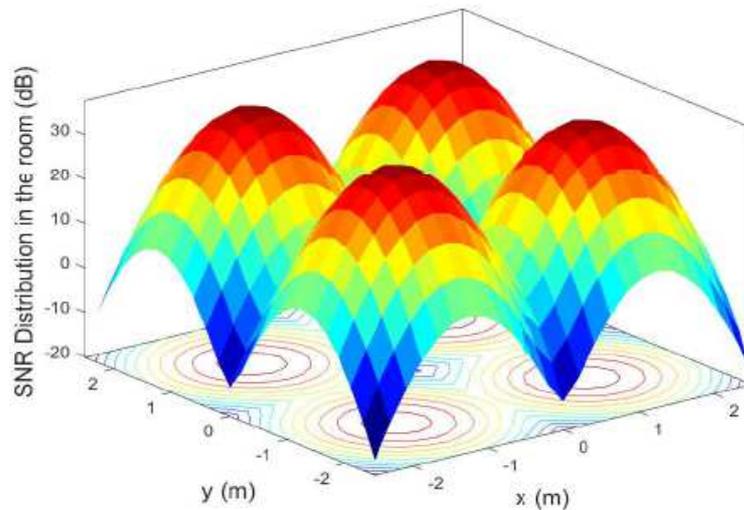
(b)

Figure III.28 : Distribution de la puissance optique reçue pour 4 LED : pour $\phi_{1/2}$ (a) $12,5^\circ$ et (b) 60° .

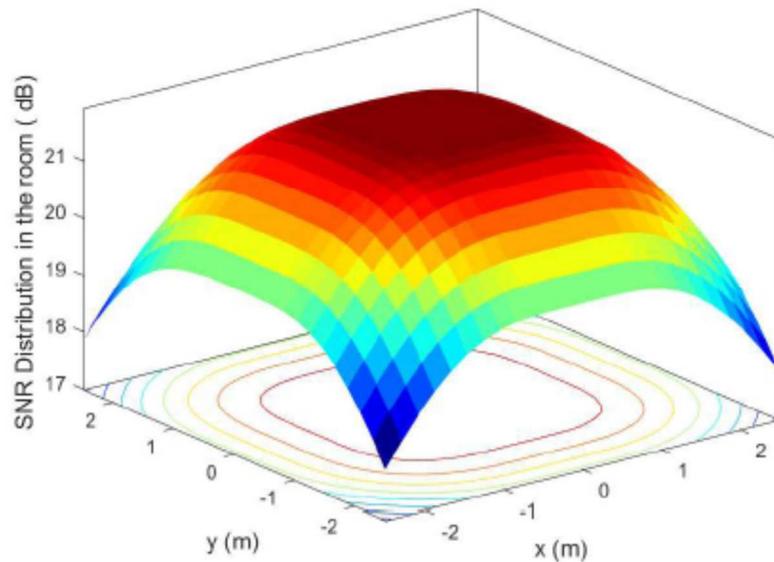
c. Performances liées au SNR

La figure III.29.a, et b montre la distribution du SNR dans la pièce pour $\phi_{1/2}$ $12,5^\circ$ et 60° , respectivement. Pour la figure III.29.a, en remarque dans le coin de la pièce, le signal transmis à un très faible SNR (-10 dB) contrairement au centre de la pièce (30 dB). Cela conduit à une

zone morte dans le cas où le récepteur est situé dans le coin. On voit qu'il existe plus de 40 dB de différence de SNR entre le niveau minimum et maximum. Cette différence de SNR est due à la distribution non-uniforme de la puissance optique reçue au niveau de la PD. La figure III.29.b montre la distribution de SNR avec un demi-angle de $\phi_{1/2} = 60^\circ$. Comme indiqué dans la figure, la distribution de SNR est presque uniforme (de 18 à 21 dB) dans toutes les zones de la pièce. De plus il est important de noter que les performances du système VLC sont fortement liées aux localisations des LED et PD, ainsi que ses directivités.



(a)



(b)

Figure III.29 : Distribution du SNR dans la pièce pour $\phi_{1/2}$ (a) $12,5^\circ$ et (b) 60°

III.8 Conclusion

Ce chapitre est dédié à la simulation du système hybride RF/VLC pour les applications intérieur dans une pièce intelligente (dans l'hôpital, comme exemple d'application) à l'aide de logiciel OptiSystem. Dans ce système, la technique de multiplexage OFDM en collaboration à la modulation d'amplitude en quadrature 16-QAM est intégrée la porteuse RF à 60 GHz/mmWave. L'objectif principal de cette simulation est d'évaluer les performances du système en faisant varier les différents paramètres. Nous avons varié les semi-angles de l'émetteur et du récepteur. Nos résultats ont démontré que le système avec un modèle d'éclairage ambiant de type Lambertien ($m = 1$), offre des avantages supérieurs. En plus, nous avons analysé l'impact du nombre de LED sur la puissance reçue et la distribution du rapport signal sur bruit (SNR). Pour ce faire, nous avons étudié comment la variation du nombre de LED affecte ces paramètres avons de chercher à déterminer la configuration optimale pour améliorer les performances globales du système proposé.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les réseaux sans fil radiofréquence (RF) souffrent de congestion, d'interférences, de problèmes de sûreté. De plus, comme les fréquences de fonctionnement actuelles sont dans un spectre radioélectrique surchargé, et en raison des besoins croissants en mobilité, connectivité et bande passante dans les réseaux 5G, l'utilisation des technologies alternatives suscite un intérêt croissant au niveau des réseaux d'accès. Dans ce sens, les communications optiques dans le spectre visible (VLC pour Visible-Light Communications) ont attiré une attention particulière depuis quelques années en tant qu'une solution prometteuse pour les réseaux sans fil à très haut-débit. Ainsi, cette technique exploite l'infrastructure d'éclairage basée sur les diodes électroluminescentes (LED) pour la transmission de l'information. Pour cette raison, elle offre de nombreux avantages, comparée aux techniques « classiques » basées sur les transmissions radiofréquences (RF), tels que l'existence d'une grande largeur de bande non réglementée, une sécurité de transmission intrinsèque et une immunité aux interférences électromagnétiques, ce qui rend la VLC une bonne candidate pour les applications dans les lieux sensibles comme les centres santé et les hôpitaux.

Cette étude est pour développer une solution hybride RF/VLC, en intégrant de nouvelles technologies optiques sans fil à base de lumière visible VLC avec les réseaux sans fil RF à ondes millimétriques. Pour cela, le sous-système optique (VLC) utilisé dans l'environnement Indoor (une pièce dans l'hôpital) et le sous-système radio (RF) utilisé dans l'environnement Outdoor. En ce sens, on a étudié pour la partie RF la transmission des signaux numériques complexes de type QAM-OFDM dans les systèmes de transport des données à ondes millimétriques à la fréquence de 60 GHz. Dans la partie VLC, La porteuse analogique RF de 60 GHz est modulée optiquement par une LED qui sert comme un émetteur VLC. Le signal modulé est ensuite transmis via le canal VLC à la section de réception qui compose d'une photodiode PD utilisée pour convertir les signaux optiques reçus en courant électrique. Ce signal est exécuté avec une démodulation analogique RF de 60 GHz suivie par démodulation QAM et démultiplexage OFDM afin de récupérer les données transmettre.

Dans un premier temps, nous avons présenté l'évolution des réseaux mobiles. Nous nous sommes occupées surtout de la technologie de la 5eme génération (5G), ses caractéristiques, et ses architectures et les technologies intégrée dans cette génération comme la transmission par optique sans fil.

Le deuxième 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.

Le troisième chapitre est divisé en deux parties distinctes. Dans la première partie, nous avons présenté l'architecture générale du système hybride RF/VLC proposé, ainsi que le logiciel de simulation OptiSystem, et les critères de qualité utilisés pour évaluer les performances du système. La deuxième partie est à son tour divisée en deux sections : La première section se concentre sur la présentation de l'architecture générale du système simulé par le logiciel OptiSystem, et la description de chaque sous-bloc. Nous avons détaillé les composants tels que la station de base (BS), le canal de transmission et la partie de réception. Cette section permet de mieux comprendre le fonctionnement et l'organisation de ces sous-blocs au sein de l'architecture globale de la liaison. La deuxième section présente les résultats de la simulation pour le format de modulation 16-QAM-OFDM avec un débit de transmission de 100 Mbit/s. Nous avons analysé les spectres des signaux de l'émission à la réception, ainsi que les réponses fréquentielles et impulsionnelles correspondantes au canal VLC, et les performances du système en termes de diagramme de constellation, de BER, et de SNR. De plus, nous avons évalué la puissance reçue en fonction des différents demi-angles entre l'émetteur et le récepteur optique. Nos observations ont révélé que chaque augmentation du demi-angle entraîne une diminution de la puissance reçue. Nous avons également constaté qu'une puissance reçue optimale est obtenue lorsque le demi-angle de transmission est égal à 60 degrés. Il est important de noter aussi que la dégradation des performances peut être causée par la perte de liaisons directes entre l'émetteur optique et le récepteur, ce qui affecte la puissance reçue.

Les résultats des performances montreront l'efficacité du système proposé, et la faisabilité du scénario étudié et donc le potentiel de la VLC en alternative aux RF pour des applications Indoor dans les établissements de santé et les hôpitaux.

Cette étude ouvre la voie pour étudier des systèmes plus complexes se focalisant principalement sur des récepteurs placés au hasard dans la pièce et la mobilité peut également être prise en compte.

Références bibliographiques

➤ Introduction générale

- [1] Yann Benoit. « L'évolution du réseau : En route vers la 5G », Colloque du CERIU, Québec. Novembre 2018.
- [2] 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, doi: 10.1007/s11107-023-00997-z
- [3] 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, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129154.

➤ Chapitre I

- [1] Bouguen, Y., Hardouin, E., Wolff, F., Pujolle, G., et Maloberti, A. « LTE et les réseaux 4G ». Eyrolles, Paris. 2012.
- [2] R. SAIDI, « Contribution à l'étude des performances des systèmes radio mobiles », thèse Doctorat, Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, Juillet 2018.
- [3] Fabrice Lemainque « Tous sur les réseaux sans fil » DUNOD, 2005.
- [4] L. A. Steffene, « Les Réseaux GSM et les différentes générations », mémoire master professionnel, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2017.
- [5] X. Lagrange, « Introduction aux réseaux mobiles - session 5 », Institut Mines-Télécom, Paris, 2017.
- [6] M.BENSARI, « Sécurité des échanges dans un réseau de nœuds mobiles », mémoire de master, Université El Hadj LAKHDER – BATNA, 2012.
- [7] Aliou DIALLO, « Systèmes Multi-Antennes pour diversité et MIMO », thèse de doctorat, l'université de Nice-Sophia Antipolis, France, 2007.
- [8] Mr Karim EL KHAZEN « Architecture d'un réseau radio mobile GSM », rapport de stage, 1999.
- [9] J. Sanchez & M. Thioune, « Universal Mobile Telecommunications System UMTS », Hermes Science, 2nd edition, 2004.
- [10] Hendaoui Mounira, « Réception dans un système d'accès multiples à répartition par codes. Application aux modes FDD et TDD de l'UMTS », thèse de doctorat, université de Biskra, 2014.
- [11] YAHIA Mokrane et KAROU Sadek, « Etude et mise en service d'une liaison Mini-Link TN pour un réseau de transmission 3G Traffic Node ». Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.

- [12] E. MEURISSE, "L'UMTS et le haut-débit mobile ", rapport, école Ingénieurs 2000 de l'université de Marne-la-Vallée, France, 2007.
- [13] «Les technologies 2G, 3G et 4G,» 21 Novembre 2014. [En ligne]. Available: <https://www.telecom-infoconso.fr/les-technologies-2g-3g-et-4g/>.
- [14] Z. BERBER, « Etude et conception des synthétiseurs de fréquences pour les systèmes de communications sans fils 5G» thèse de doctorat, université de Tlemcen. 12/12/2019.
- [15] K.HACINI , R.KHELIFI , « Transition 2G/3G/4G en communication mobile : cas site université d'ATM Mobilis », mémoire de master ,université Mohammed Seddik BENYAHIA – Jijel , 2019.
- [16] Yannick Bouguen, Eric Hardouin et François Xavier Wolf , « LTE et les réseaux 4G », Eyrolles, France, 2012.
- [17] A.Basit, Syed, “Dimensioning of LTE Network Description of Models and Tool, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution Radio Interface”, Doctoral dissertation, Helsinki University of Technology, February 2009.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] ALEM .Med .A et Med Abdelwahed: « Etude et Simulation d'une liaison de téléphonie mobile 3GPP LTE » mémoire d'ingénieur, Université de Blida , 2010.
- [19] M. SABEUR, C. BOUABDALLAH, « Conception d'une antenne microruban opérant à 28 GHZ pour les réseaux mobiles 5G », Mémoire de master, université mohamed boudiaf - M'SILA, 2021.
- [22] M.DEHEMCHI, A.BOUHAFER, « Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs pour la 5G », Mémoire de master, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2019.
- [23] A. BENTOUATI.R , BOUBLENZA , « Etude et conception d'antennes MIMO pour les systèmes de communication 5G » , Mémoire de master , Université de Tlemcen. 2020.
- [24] M.AZNI, D.HAMZAOUI, « Introduction du massive MIMO au réseau cellulaire 5G », Mémoire de master , Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2020.
- [25] Yann Benoit. « L'évolution du réseau : En route vers la 5G », Colloque du CERIU, Québec. Novembre 2018.
- [26] 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.

- [27] Xiang Gao. « MIMO massif dans des environnements de propagation réels ». thèse de doctorat , Université de Lund, 2016.
- [28] N.BEL-HAJ-MAATI, « Modélisation 3D du canal de propagation massive MIMO en environnement outdoor » , thèse de doctorat, IMT Atlantique Campus de Brest, 2021.
- [29] S. Bergren, “Design Considerations for a 5G Network Architecture”, Université Oklahoma State, 2018.
- [30] Yong Niu, Yong Li, Depeng Jin, Li Su, and Athanasios Vasilakos, “A survey of millimeter wave (mmwave) communications for 5G: Opportunities and challenges,” *Wireless Networks*, vol. no 21, 02, 2015.
- [31] <https://www.6gworld.com/exclusives/guest-editorial-a-reality-check-on-ris-and-thz-communications/> , consulter le 30/05/2023.
- [32] P. W. C. Chan et al., “The Evolution Path of 4G Networks : FDD or TDD ?,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 12, pp. 42–50, 2006.
- [33] S. Hong et al., “Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 114–121, 2014.
- [34] W.FERHI, « Réseaux d'accès multiples non orthogonales NOMA pour la 5G » mémoire de master, université de Tlemcen 2020.
- [35] H.BOUCHAALA ,A.ZID, « Une étude sur la transmission uplink-NOMA assistée par des surfaces intelligentes reconfigurables » mémoire de master , université mohamed boudiaf - M'SILA, 2021.
- [36] https://ew2015.european-wireless.org/wp-uploads/2018/05/EW-2018_Sari.pdf
Consulté le 30/05/2023.
- [37] Clement Le Bas. « Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil. Optique / photonique », thèse de doctorat, Université de Limoges, 2017.
- [38] 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, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129154.

➤ Chapitre II

- [1] Poulouse, A. « Simulation of an Indoor Visible Light Communication System Using Optisystem ». *Signals*, 3, 765–793.,<https://doi.org/10.3390/signals3040046>, 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, vol. 3, n° 2, p. 78-88, mai 2017.
- [5] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, et P. Mohapatra, « Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges », IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 17, n° 4, p. 2047-2077, 2015.
- [6] A. G. Bell, "Upon the production and reproduction of sound by light," in Telegraph Engineers, Journal of the Society of America, vol. 9, no. 34, pp. 404-426, 1880.
- [7] R. W. Burns. "Communications: An International History of the Formative Years (History of Technology Series)". Publié par: Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [8] M.ROUISSAT . « Etude et Modélisation d'une Liaison Optique Sans Fil. » Thèse de doctorat , l'université de Tlemcen,2013.
- [9] I. Kim, "10 G FSO systems position technology for the future". Lightwave online pp. 19-21, Juillet. 2009.
- [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, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129154.
- [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] O.AFFOUN, A.NAIDJA, « Visible light communication : Etude des performances d'un système MIMO », mémoire de master, université Guelma 8 mai 1954 ,2019.
- [13] P. Goswami et M. K. Shukla, "Design of a Li-Fi Transceiver", Wireless Engineering and Technology, vol. 08, no 04, p. 71-86, 2017.
- [14] Clement Le Bas. « Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil.». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2017.
- [15] 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.
- [16] T. Cevik et S. Yilmaz, « An Overview of Visible Light Communication Systems », International journal of Computer Networks & Communications, vol. 7, n° 6, p. 139-150. 2015.
- [17] 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
- [18] 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.
- [19] N. Barbot, S. Sahuguede, A. Julien-Vergonjanne, and J.-P. Cances, "LDPC and Fountain Code Performances over Mobile Wireless Optical Channel," Transactions On Emerging Telecommunications Technologies, 30/08/2013.

- [20] A-L.KORODOWOU, « codage du canal en treillis dans un système de communication VLC », thèse de doctorat, université d'ABOMEY-CALAVI (UAC), 2018.
- [21] Abdeslam Behlouli, « Simulation du canal optique sans fil. Applications aux communications optiques sans fil ». Thèse de doctorat, l'université de POITIERS, 2016.
- [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, 2018.
- [23] 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.
- [24] M. Falcitelli et P. Pagano, « Visible Light Communication for Cooperative ITS », in Intelligent Transportation Systems, vol. 52, p. 19-47. 2016,
- [25] Octave Ringar. « Utilisation des techniques avancées d'Emission / Réception multiantennes pour une transmission optique large bande ». Thèse doctorat, Université de Limoges, 2015.
- [26] L. HAMADA, « conception d'une architecture supportant la technologie Li-Fi », thèse doctorat, université de STRASBOURG ,2022.
- [27] S.CHERGUI , « Conception et réalisation d'un système de communication bureautique par lumière visible (Li-Fi) », mémoire de master , Université Mohamed Khider de Biskra,2019.

➤ Chapitre III

- [1] L. Meyzonnette, « Radiométrie et détection optique », éditeur scientifique, 2002.
- [2] A. Ng'oma, "Radio-over-Fibre Technologies for Broadband Wireless Communication Systems », thèse de doctorat, Universiteit Eindhoven, 2005.
- [3] D. Habauzit, R. Sauleau et S. M. Yonis, « Ondes millimétriques : le point sur les effets biologiques à 40-60 GHz Millimeter-waves at 40-60 GHz: state of knowledge on biological effects », Paris: Camp électromagnétique: de la désométrie a la sante humaine, vol 14 , No 5 , pp402-411, 3-4, Avril 2012.
- [4] A. Kabalan, « Etude de systèmes radio sur fibre pour des applications de réseaux domestique en bande millimétrique», thèse doctorat, paris : école doctorale mstic, 2017.
- [5] www.optiwave.com
- [6] Définition-diagramme de constellation, dictionnaire Le Parésien ,2016

Liste des acronymes

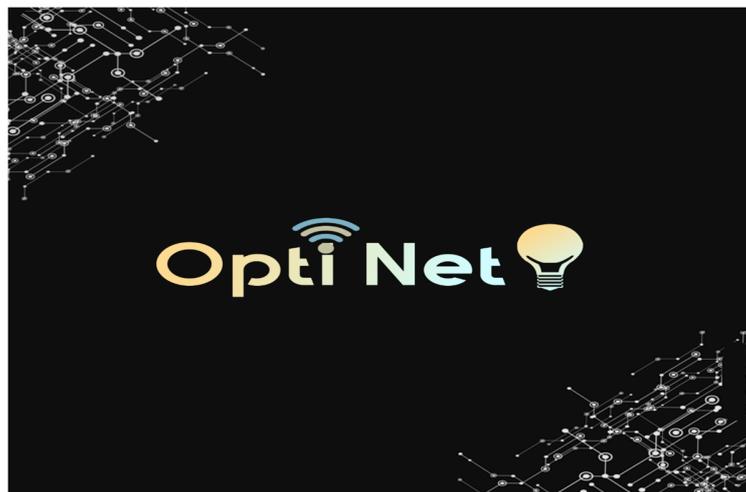
1G	first generation
2G	Second generation
3G	third generation
4G	fourth generation
5G	fifth generation
3GPP	3Generation Partnership Project
APD	Avalanche Photodiode
BER	bit error rate
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
CPM	Continus phase modulation
CS	Central Station
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EMI	ElectroMagnetic Interference
eNodeB	Evolved Node B
eUTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
IM-DD	Intensity Modulation – Direct Detection
IoT	Internet of Things
ISI	Inter Symbols Interference
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light Emitting Diode
Li-Fi	Light Fidelity
LoS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mmWave	Millimeter-Wave
MS	Mobile Station
MZM	Mach-Zehnder Modulator

NLOS	No Line of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OOK	On Off Keying
OWC	Optical Wireless Communications
PD	PhotoDiode
PIN	Positive Intrinsic Negative
PPM	Pulse Position Modulation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
SC-FDMA	Single-carrier frequency division multiple access
SNR	Signal to Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Télécommunications System
VLC	Visible Light Communication
VPPM	Variable Pulse Position Modulation



Opti Net

GUIDE DE PROJET



INTRODUCTION

Dans le paysage en constante évolution des soins de santé, la quête de l'innovation technologique est incessante. Chaque jour qui passe, les hôpitaux du monde entier recherchent des solutions qui non seulement améliorent les soins aux patients, mais aussi révolutionnent le mode de fonctionnement des professionnels de la santé. Dans cette optique, nous nous lançons dans un voyage révolutionnaire qui promet de redéfinir l'essence même de la connectivité des soins de santé - la mise en œuvre de la technologie Light Fidelity (LiFi).

Le LiFi, une avancée transformatrice dans le domaine de la communication optique sans fil, est sur le point de remodeler la dynamique de la transmission des données dans les environnements hospitaliers. Les technologies sans fil traditionnelles (WiFi), bien qu'elles jouent un rôle essentiel dans les opérations de soins de santé, se heurtent souvent à des difficultés qui nuisent à leur efficacité. Les interférences électromagnétiques (EMI), un problème persistant dans les salles de radiologie et autres zones critiques (les chambres de patients et nouveau-nés et les blocs opératoires) présentent des risques à la fois pour les patients et pour l'intégrité de l'équipement médical. La sécurité des données reste également une préoccupation majeure à une époque où les cybermenaces se multiplient. En outre, un réseau basé sur LiFi peut également être utilisé pour la surveillance en temps réel des mouvements et des signes vitaux du patient sans avoir besoin de câbles. C'est dans ce contexte de défis que notre projet de mise en œuvre du LiFi trouve sa raison d'être.

Notre vision est claire : exploiter le potentiel du LiFi et entrer dans une ère où les hôpitaux ne sont pas seulement connectés, mais connectés de manière sûre et efficace grâce à des faisceaux de lumière visible. Ce projet (**Opti Net**) ne se limite pas à l'adoption d'une nouvelle technologie ; il s'agit de transformer fondamentalement l'expérience des soins de santé. Il s'agit de s'assurer que les données circulent de manière transparente, sécurisée, et en temps réel, ce qui permet aux professionnels de la santé de prendre des décisions éclairées et aux patients d'avoir la plus grande confiance dans les soins qui leur sont prodigués.

1. PRÉSENTATION DU PROJET

OBJECTIFS DU PROJET



Dans le paysage actuel des soins de santé, qui évolue rapidement, la mise en œuvre de technologies de pointe est essentielle pour améliorer les soins aux patients et rationaliser les opérations hospitalières. Le projet **Opti Net** est conçu pour relever les défis critiques dans les environnements hospitaliers, en particulier en ce qui concerne les interférences électromagnétiques (EMI) la sécurité des données, et la surveillance en temps réel. En exploitant les capacités de la technologie LiFi, ce projet vise à fournir des solutions de communication optique sans fil entièrement adapté aux exigences des hôpitaux, en offrant une connectivité fiable, sécurisée et efficace pour les équipements et les dispositifs utilisés au sein de ces environnements. Cela permettra aux professionnels de la santé d'accéder rapidement aux informations médicales, aux dossiers des patients et de collaborer de manière efficace, favorisant ainsi des améliorations dans la prestation des soins de santé.

Objectifs détaillés :

1. Réduction des interférences électromagnétiques (EMI) : L'objectif principal de ce projet est de mettre en œuvre la technologie LiFi dans les salles de radiologie et d'autres zones sensibles des hôpitaux afin de réduire de manière significative les interférences électromagnétiques. Cette réduction des interférences électromagnétiques garantira la sécurité des patients qui subissent des procédures médicales et l'intégrité des équipements médicaux vitaux. En parvenant à réduire d'au moins 70 % les incidents liés aux interférences électromagnétiques, nous visons à créer un environnement propice à la précision des diagnostics et des soins aux patients.

2. Renforcer la sécurité des données : En s'appuyant sur les caractéristiques de sécurité inhérentes au LiFi, notre deuxième objectif est de renforcer la protection des données sensibles des patients contre l'accès non autorisé ou l'interception. Étant donné que le Li-Fi utilise des signaux lumineux qui ne traversent pas les murs, il est plus difficile d'intercepter les données. Cela peut être particulièrement important dans les environnements hospitaliers où la confidentialité des informations médicales est primordiale.

3. Amélioration de la connectivité et de la vitesse de transfert des données : Notre projet vise à fournir au personnel hospitalier une connectivité sans fil fiable et à haut débit, améliorant ainsi sa capacité à accéder aux informations critiques et à les transmettre. Ce qui permettra aux professionnels de la santé d'accéder en temps réel aux données vitales des patients, améliorant ainsi la qualité et l'efficacité de la prestation des soins de santé.

4. Essais pilotes et mise en œuvre réussis : Pour garantir la praticité et l'efficacité du LiFi en milieu hospitalier, nous effectuerons des essais pilotes complets dans les salles de radiologie. L'achèvement réussi d'une phase pilote de trois mois, sans qu'aucun problème critique ne soit signalé, est une étape clé. Nous travaillerons en étroite collaboration avec le service de radiologie afin d'obtenir son accord pour une mise en œuvre à grande échelle du LiFi, préparant ainsi le terrain pour une adoption plus large au sein de l'hôpital.

5. Formation et adoption : Un élément essentiel de ce projet est de s'assurer que le personnel de l'hôpital est bien préparé à utiliser efficacement la technologie LiFi. Pour ce faire, nous fournirons une formation complète et des ressources éducatives, permettant à au moins 90% du

personnel du service de radiologie d'acquérir les connaissances et les compétences nécessaires pour maximiser les avantages du LiFi. Le maintien d'un taux d'utilisation du personnel de 70 % pour les tâches quotidiennes sera un indicateur crucial de la réussite de l'adoption.

6. Mise en œuvre rentable : La gestion efficace des coûts du projet est primordiale pour garantir un retour sur investissement positif. Nous nous engageons à respecter le budget approuvé pendant toutes les phases du projet, tout en calculant le retour sur investissement sur la base des économies réalisées grâce à la réduction des incidents liés à l'IEM et à l'amélioration de l'efficacité opérationnelle.

7. Possibilités de mise à l'échelle et d'expansion : Notre dernier objectif est d'identifier et de planifier les possibilités d'étendre la mise en œuvre du LiFi à d'autres services et installations de l'hôpital. Nous visons à développer un plan de déploiement évolutif pour l'expansion dans l'année qui suit la mise en œuvre initiale de la salle de radiologie. En outre, nous établirons des partenariats avec au moins deux autres établissements de soins de santé intéressés par l'adoption du LiFi dans les deux ans, ouvrant ainsi la voie à une adoption plus large par l'industrie.

8. Devenir le premier projet en Algérie utilisant la technique LiFi dans les établissements de santé et les hôpitaux. On cherche à acquérir des clients initiaux et établir des relations solides avec eux, tout en réalisant des bénéfices initiaux, et élargir la base de clients et augmenter le taux de rétention.

Valeurs proposées

- Une santé préservée
- Une sécurité absolue
- Une empreinte énergétique réduite
- Une vitesse de transmission de données inégalée
- Une mobilité sans-fil sans interférences
- Réduction des factures de consommation électrique
- Augmentation de la précision des équipements médicaux.
- Adaptabilité à l'infrastructure existante

PLANNING POUR LA RÉALISATION DU PROJET



La création d'un plan de projet pour la mise en œuvre d'un projet LiFi dans un environnement hospitalier sur une période de 6 mois implique une planification, une exécution et un suivi minutieux. Vous trouverez ci-dessous un plan de projet simplifié avec des étapes clés pour les six premiers mois :

Mois 1 : Initiation du projet et planification

- **Semaine 1-2** : Lancement du projet
 - Constituer l'équipe du projet.
 - Organiser une réunion de lancement du projet.
 - Définir les rôles et les responsabilités.
- **Semaine 3-4** : Évaluation des besoins et budgétisation
 - Procéder à une évaluation détaillée des salles de radiologie et de l'infrastructure de l'hôpital.
 - Finaliser le budget du projet et trouver des sources de financement.

Mois 2 : Recherche et approvisionnement

- **Semaine 1-2** : Recherche et sélection des fournisseurs
 - Rechercher des fabricants de composants LiFi et des fournisseurs de technologie.
 - Sélectionner les fournisseurs d'ampoules LED LiFi, de clés LiFi et d'autres composants nécessaires.
- **Semaine 3-4** : Approvisionnement et passation de marchés
 - Lancer les processus d'approvisionnement pour les composants LiFi.
 - Négocier des contrats avec les fournisseurs sélectionnés.
 - Acheter le matériel et les logiciels nécessaires.

Mois 3 : Développement et tests

- **Semaine 1-2** : Personnalisation et intégration
 - Personnaliser les composants LiFi pour une utilisation en milieu hospitalier.
 - Intégrer la technologie LiFi aux réseaux hospitaliers existants.
- **Semaine 3-4** : Préparation des essais pilotes
 - Préparer les salles de radiologie pour les essais pilotes.
 - Élaborer des protocoles et des critères d'essai.

Mois 4 : Essais pilotes et évaluation

- **Semaine 1-2** : Phase 1 de l'essai pilote
 - Installer la technologie LiFi dans une salle de radiologie.
 - Effectuer les premiers essais et contrôler les performances.
 - Recueillir les commentaires du personnel de radiologie.
- **Semaine 3-4** : Phase 2 des essais pilotes
 - Étendre la mise en œuvre de la technologie LiFi à d'autres salles de radiologie.
 - Poursuivre les essais et recueillir des données sur les performances.
 - Résoudre les problèmes éventuels et apporter des améliorations en fonction du retour d'information.

Mois 5 : Déploiement et formation

- **Semaines 1-2** : Déploiement à grande échelle
 - Déployer la technologie LiFi dans toutes les salles de radiologie.
 - Assurer une intégration transparente avec les opérations de l'hôpital.
- **Semaines 3 et 4** : Formation et éducation du personnel
 - Fournir une formation complète au personnel du service de radiologie sur l'utilisation du LiFi.
 - Promouvoir la sensibilisation aux avantages du LiFi et aux meilleures pratiques.

Mois 6 : Suivi et rapports

- **Semaine 1-2** : Contrôle des performances
 - Contrôler en permanence les performances de la technologie LiFi dans les salles de radiologie.
 - Traiter rapidement tout problème opérationnel ou technique.
- **Semaine 3-4** : Évaluation et rapports
 - Évaluer l'impact de la mise en œuvre du LiFi sur la réduction des interférences électromagnétiques, la sécurité des données et la connectivité.
 - Générer un rapport de projet détaillé pour les parties prenantes, en soulignant les réalisations et les domaines d'amélioration.
 - Examen du projet et planification future
 - Organiser une réunion d'examen du projet avec les parties prenantes afin d'évaluer le succès de la mise en œuvre de la technologie LiFi.
 - Identifier les possibilités d'étendre la technologie LiFi à d'autres services de l'hôpital.
 - Planifier la maintenance et le soutien continu.

Ce plan de projet de 6 mois fournit une approche structurée de la mise en œuvre de la technologie LiFi dans un environnement hospitalier. Il garantit que chaque phase du projet est soigneusement exécutée, depuis la planification initiale jusqu'au déploiement à grande échelle, tout en permettant une certaine flexibilité pour faire face aux défis inattendus qui peuvent survenir au cours du cycle de vie du projet.

2. INNOVATION

NATURE DE L'INNOVATION



La nature de l'innovation est multiple et peut prendre différentes formes en fonction du contexte et des objectifs. Voici quelques aspects clés qui caractérisent la nature de l'innovation de notre projet :

1. Avancée technologique : notre projet implique l'adoption d'une technologie relativement nouvelle et innovante, le LiFi, qui utilise la lumière visible pour la transmission de données. Il s'agit d'une avancée technologique significative par rapport aux technologies traditionnelles de communication sans fil telles que le Wi-Fi.

2. Résolution de problèmes : Le projet s'attaque à un problème spécifique dans le domaine des soins de santé, à savoir les interférences électromagnétiques (EMI) dans les salles de radiologie. L'innovation réside dans la recherche d'une solution nouvelle et efficace pour réduire les interférences électromagnétiques, améliorant ainsi la sécurité des patients et des données.

3. Application créative : En appliquant la technologie LiFi à l'environnement hospitalier, notre projet adapte de manière créative une technologie initialement conçue pour la communication de données dans diverses industries à un contexte de soins de santé spécialisés. Cette application créative fait preuve d'innovation.

4. Approche centrée sur l'utilisateur : notre projet met fortement l'accent sur l'innovation centrée sur l'utilisateur en visant à améliorer l'expérience et la sécurité des patients et des professionnels de la santé. Il place leurs besoins et leur bien-être au cœur du processus d'innovation.

5. Collaboration interdisciplinaire : Pour réussir, notre projet peut nécessiter la collaboration d'experts en technologie, en soins de santé et en gestion d'infrastructures. Cette approche interdisciplinaire favorise l'innovation en intégrant diverses perspectives et domaines de connaissances.

6. Perturbation potentielle : L'introduction du LiFi dans les environnements hospitaliers a le potentiel de perturber les pratiques existantes en matière de communication et de transfert de données. Elle peut conduire à une transmission de données plus efficace et plus sûre, ce qui pourrait transformer le mode de fonctionnement des établissements de soins de santé.

7. Potentiel commercial : notre projet reconnaît le potentiel commercial de la technologie LiFi dans le secteur des soins de santé. En cas de succès, il pourrait déboucher sur des opportunités commerciales pour les fabricants de composants LiFi et les fournisseurs de solutions.

8. Impact sociétal : Au-delà de ses aspects technologiques, l'innovation de notre projet a le potentiel d'avoir un impact positif sur la société en renforçant la sécurité des données de santé, en réduisant les risques liés aux interférences électromagnétiques et en améliorant les soins aux patients dans les hôpitaux.

En résumé, la nature de l'innovation dans notre projet se caractérise par l'application créative d'une technologie avancée (LiFi) pour résoudre un problème spécifique (interférence EMI) d'une manière interdisciplinaire et centrée sur l'utilisateur. Le potentiel de perturbation et d'impact sur le marché souligne la nature innovante de notre projet dans le secteur des soins de santé.

ASPECTS DE L'INNOVATION

Les aspects liés à l'innovation de notre projet de mise en œuvre de la technologie LiFi :

1. Application créative : En appliquant la technologie LiFi à l'environnement hospitalier, notre projet adapte de manière créative une technologie initialement conçue pour la communication de données dans diverses industries à un contexte spécialisé dans les soins de santé. Cette application créative est une preuve d'innovation.

2. Perturbation potentielle : L'introduction du LiFi dans les environnements hospitaliers a le potentiel de perturber les pratiques existantes en matière de communication et de transfert de données. Elle peut conduire à une transmission de données plus efficace et plus sûre, ce qui pourrait transformer le mode de fonctionnement des établissements de santé.

3. Personnalisation et adaptation : L'adaptation innovante de la technologie LiFi aux besoins uniques et aux nuances infrastructurelles des environnements hospitaliers reflète une approche hautement adaptable et personnalisée.

4. Minimisation des risques liés aux interférences électromagnétiques : Les équipements médicaux sensibles peuvent être perturbés par les interférences électromagnétiques générées par les technologies sans fil traditionnelles telles que le Wi-Fi. En utilisant le Li-Fi, en particulier dans les chambres radiologiques, il est possible de créer un environnement de communication sans fil plus sûr, réduisant les risques pour les patients, les équipements médicaux et le personnel médical.

5. Accent mis sur la sécurité des données : L'accent mis sur la sécurité des données par la mise en œuvre d'un cryptage de bout en bout et d'une transmission sécurisée des données témoigne d'une innovation dans la protection des informations sensibles des patients.

6. la surveillance des patients en temps réel : La surveillance des patients en temps réel est cruciale pour la détection précoce des problèmes de santé et une intervention rapide. Le LiFi peut également être utilisé pour la surveillance en temps réel et le rapport des mouvements et des signes vitaux du patient sans avoir besoin de câbles.

7. Amélioration de l'infrastructure des soins de santé : L'accent mis par notre projet sur la modernisation de l'infrastructure hospitalière par la mise en œuvre du LiFi démontre l'innovation dans l'amélioration de l'ensemble de l'écosystème des soins de santé.

3. ETUDE DE MARCHÉ

LA PART DE MARCHÉ ET CONCURRENCE



STRATÉGIE de MARKETING



1. Taille et croissance du marché :

L'introduction de la technologie LiFi dans les hôpitaux algériens représente un projet d'une importance stratégique, incarnant l'innovation de pointe dans un marché de la santé en constante évolution. Nous nous engageons à fournir une expérience produit exceptionnelle et à démontrer comment notre solution répond aux besoins spécifiques et technologique des zones sensibles de l'hôpital (ex : les chambres radiologiques). Avec une taille de marché estimée à plusieurs milliards de dinars algériens, l'ampleur de ce marché souligne le potentiel de la mise en œuvre du LiFi. En tant que pionniers dans cette entreprise, il est impératif de mener une analyse méticuleuse des coûts et des bénéfices, en présentant une proposition convaincante qui souligne la supériorité de la technologie LiFi par rapport aux solutions WiFi existantes, établissant ainsi une nouvelle norme innovante pour les communications hospitalières en Algérie.

2. Segmentation de clientèle :

La mise en œuvre efficace de la technologie LiFi dans les hôpitaux dépend d'une compréhension précise de la segmentation de la clientèle, un spectre complexe comprenant des institutions médicales renommées, des fournisseurs de soins de santé agiles et des intégrateurs de technologie compétents. Une compréhension nuancée de la segmentation de la clientèle est essentielle pour un marketing ciblé et l'adaptation adroite de stratégies de déploiement personnalisées.

Environ 50 % du marché est constitué d'établissements médicaux et d'hôpitaux de grande envergure qui ont des besoins de communication multiples pour soutenir leurs opérations critiques. Ces entités privilégient la rentabilité tout en adhérant à des normes strictes en matière de sécurité des données et de protection de la vie privée des patients. Les petits prestataires de soins de santé, qui représentent environ 30 % du marché, travaillent souvent avec des ressources limitées. Ils sont plus réceptifs aux solutions de communication innovantes et durables qui permettent de réaliser des économies et d'améliorer l'expérience des patients. Les 20 % restants du marché sont constitués d'intégrateurs technologiques et de fournisseurs de services compétents, spécialisés dans le déploiement de la technologie LiFi, qui jouent un rôle crucial en orchestrant l'intégration réussie de la technologie LiFi dans divers établissements de soins de santé.

Dans ce paysage complexe, il est primordial de répondre avec précision aux besoins uniques de chaque segment de clientèle. Les grands hôpitaux ont besoin de solutions de communication rentables qui respectent les réglementations strictes en matière de gestion des données médicales. En revanche, les établissements de santé de plus petite taille recherchent des systèmes rationalisés et adaptables qui améliorent leur efficacité opérationnelle. Reconnaître ces subtilités est essentiel pour formuler des stratégies sur mesure qui s'alignent parfaitement sur les exigences distinctes de chaque segment, facilitant ainsi l'assimilation réussie de la technologie LiFi dans la tapisserie diversifiée des environnements hospitaliers.

3. Analyse concurrentielle :

Dans le domaine de la mise en œuvre de la technologie LiFi dans les hôpitaux algériens, un paysage concurrentiel distinctif et dynamique se dessine. Contrairement aux marchés traditionnels, le LiFi est confronté à une concurrence minimale, principalement aux technologies WiFi établies.

Fait remarquable, notre entreprise est le seul producteur de solutions LiFi dans ce secteur naissant.

En tant que pionniers dans ce domaine innovant, nous avons la prérogative d'être le fournisseur exclusif de la technologie LiFi dans le paysage hospitalier algérien. Notre positionnement unique sur le marché nous permet de dépasser les frontières conventionnelles de la concurrence. Alors que les technologies WiFi représentent la technologie en place, nos solutions LiFi offrent une alternative avant-gardiste caractérisée par une sécurité des données inégalée, une fiabilité accrue et une immunité aux interférences électromagnétiques - des caractéristiques qui nous distinguent de manière décisive.

Plutôt que de se livrer à une rivalité traditionnelle sur le marché, nous nous attachons à mettre en lumière les avantages de la technologie LiFi par rapport aux technologies WiFi. L'accent est mis sur la sensibilisation des hôpitaux aux capacités supérieures de transfert de données, aux avantages inhérents à la sécurité et au potentiel de communication sans interférence qu'offre le LiFi. Ce paysage concurrentiel dynamique nécessite des efforts de marketing stratégique visant non seulement à rivaliser, mais aussi à remodeler fondamentalement le paysage technologique des hôpitaux algériens.

4. Proposition de vente unique (USP) :

La caractéristique de notre projet de mise en œuvre du LiFi dans les hôpitaux réside dans son approche pionnière, capitalisant sur le pouvoir de transformation de la technologie LiFi. Cette proposition unique offre une myriade d'avantages par rapport aux solutions WiFi conventionnelles, ce qui en fait un choix extrêmement convaincant pour les établissements de santé.

En substance, notre mise en œuvre du LiFi ne résout pas seulement les défis actuels associés au WiFi, mais ouvre également les portes d'une nouvelle ère de connectivité dans le domaine des soins de santé. Sa sécurité des données inégalée, son immunité aux interférences, sa vitesse exceptionnelle et ses avantages pour la santé font du LiFi la solution ultime pour révolutionner la communication au sein des hôpitaux, garantissant ainsi aux patients des soins de la plus haute qualité.

5. Stratégie de tarification :

Notre stratégie de tarification pour la mise en œuvre du LiFi dans les hôpitaux est méticuleusement conçue pour trouver un équilibre harmonieux entre la rentabilité et les économies

substantielles réalisées grâce à l'utilisation de la technologie LiFi. L'objectif principal est de positionner nos solutions LiFi comme une alternative accessible et durable aux technologies WiFi conventionnelles, attirant les établissements de santé qui cherchent à optimiser leurs coûts opérationnels sans compromettre la qualité et la fiabilité de la connectivité du réseau.

Fondé sur un engagement à démocratiser les solutions de connectivité avancées, notre modèle de tarification garantit que l'implémentation du LiFi reste économiquement réalisable pour les hôpitaux de tailles et de budgets variés. En offrant des structures de prix compétitives qui s'alignent ou dépassent le rapport coût-efficacité des installations WiFi traditionnelles, nous favorisons une proposition de valeur convaincante. Cette approche permet aux établissements de santé d'exploiter les capacités de transformation du LiFi sans imposer de contraintes financières prohibitives, améliorant ainsi la qualité des soins aux patients et des services médicaux.

Notre stratégie de tarification reflète l'essence même de notre projet de mise en œuvre de la technologie LiFi, en la positionnant comme un moyen inclusif, accessible et rentable de révolutionner la connectivité des hôpitaux. Cette approche stratégique de la tarification souligne notre engagement à faire de la technologie LiFi de pointe un composant intégral de l'infrastructure moderne des soins de santé, propulsant les hôpitaux dans un royaume de connectivité, de sécurité et d'efficacité accrue.

6. Canaux de distribution :

Dans le cadre de nos efforts visant à garantir l'adoption transparente de la technologie LiFi dans les hôpitaux, nous employons une stratégie de distribution multicanal complète. Cette approche comprend une série de moyens pour atteindre efficacement notre clientèle cible et faciliter l'intégration de la technologie LiFi dans les environnements de soins de santé.

Nos canaux de distribution englobent un éventail de solutions sur mesure pour répondre aux divers besoins des hôpitaux. Il s'agit notamment de :

1. Ventes directes aux établissements de santé: Nous collaborons directement avec les hôpitaux et les établissements de santé, en établissant des relations solides avec les décideurs et les services informatiques. Grâce à cette approche, nous fournissons des informations et une assistance approfondies, permettant à ces établissements de comprendre les nombreux avantages

de la technologie LiFi. Cet engagement direct garantit un processus d'adoption rapide et éclairé.

2. Partenariats avec des hôpitaux de petite et moyenne taille : Reconnaisant la diversité des établissements de santé, nous établissons des partenariats avec des hôpitaux de petite et moyenne taille, nous capitalisons sur leurs réseaux existants pour étendre notre portée. Cette approche collaborative nous permet de toucher une clientèle plus large et de faire en sorte que le LiFi atteigne les hôpitaux de toutes tailles.

3. Collaboration avec les fournisseurs d'infrastructure informatique existants: Pour assurer une présence complète dans le paysage hospitalier, nous collaborons avec les fournisseurs d'infrastructure informatique établis. En tirant parti de leurs canaux de distribution bien établis, nous élargissons la pénétration de la technologie LiFi dans les hôpitaux. Cette collaboration ouvre la voie à une intégration plus étendue et plus efficace de la technologie LiFi dans les établissements de soins de santé.

Notre stratégie de distribution multicanal souligne notre engagement à rendre le LiFi accessible et facilement disponible pour les hôpitaux, indépendamment de leur taille ou de leur infrastructure existante. En adoptant cette approche, nous visons à faciliter une adoption rapide et généralisée du LiFi dans le secteur des soins de santé, en révolutionnant la connectivité et la sécurité des données dans les hôpitaux.

4. LA PRODUCTION

PLAN DE PRODUCTION



L'élaboration d'un plan de production pour la mise en œuvre de la technologie LiFi dans les établissements de santé en Algérie implique un examen minutieux de divers facteurs, notamment les composants de fabrication, le contrôle de la qualité et l'évolutivité. Voici un plan de production professionnel pour notre projet LiFi :

1. Conception et développement : La première étape consiste à concevoir et développer les composants et les systèmes nécessaires pour le Li-Fi. On travaille avec une équipe d'ingénieurs et de développeurs pour concevoir les spécifications techniques, réaliser des prototypes et effectuer des tests approfondis.

2. Approvisionnement des composants : Une fois la conception finalisée, on s'approvisionne en composants Li-Fi de haute qualité. On collabore avec des fabricants de confiance ou des fournisseurs agréés pour obtenir les émetteurs, les récepteurs (clés), les LED, les câbles optiques et autres composants nécessaires à la production.

3. Contrôle de la qualité et essais : Mettre en œuvre des mesures strictes de contrôle de la qualité pour garantir la fiabilité et les performances des composants LiFi, et effectuer des tests approfondis sur les émetteurs LED, les récepteurs LiFi afin de vérifier leur conformité avec les normes industrielles.

4. Assemblage et intégration : À cette étape, on assemble les composants pour l'intégration des composants LiFi dans les systèmes LiFi finaux. Cela peut inclure le montage des émetteurs et des récepteurs, le câblage interne, des circuits électroniques, ainsi que d'autres étapes pour maintenir la cohérence et réduire les erreurs. Des procédures de contrôle qualité sont généralement mises en place pour s'assurer que les produits finis répondent aux normes requises.

5. Assurance de la qualité et installations d'essai : Investir dans une installation dédiée à l'assurance qualité et aux essais afin de tester rigoureusement les systèmes LiFi.

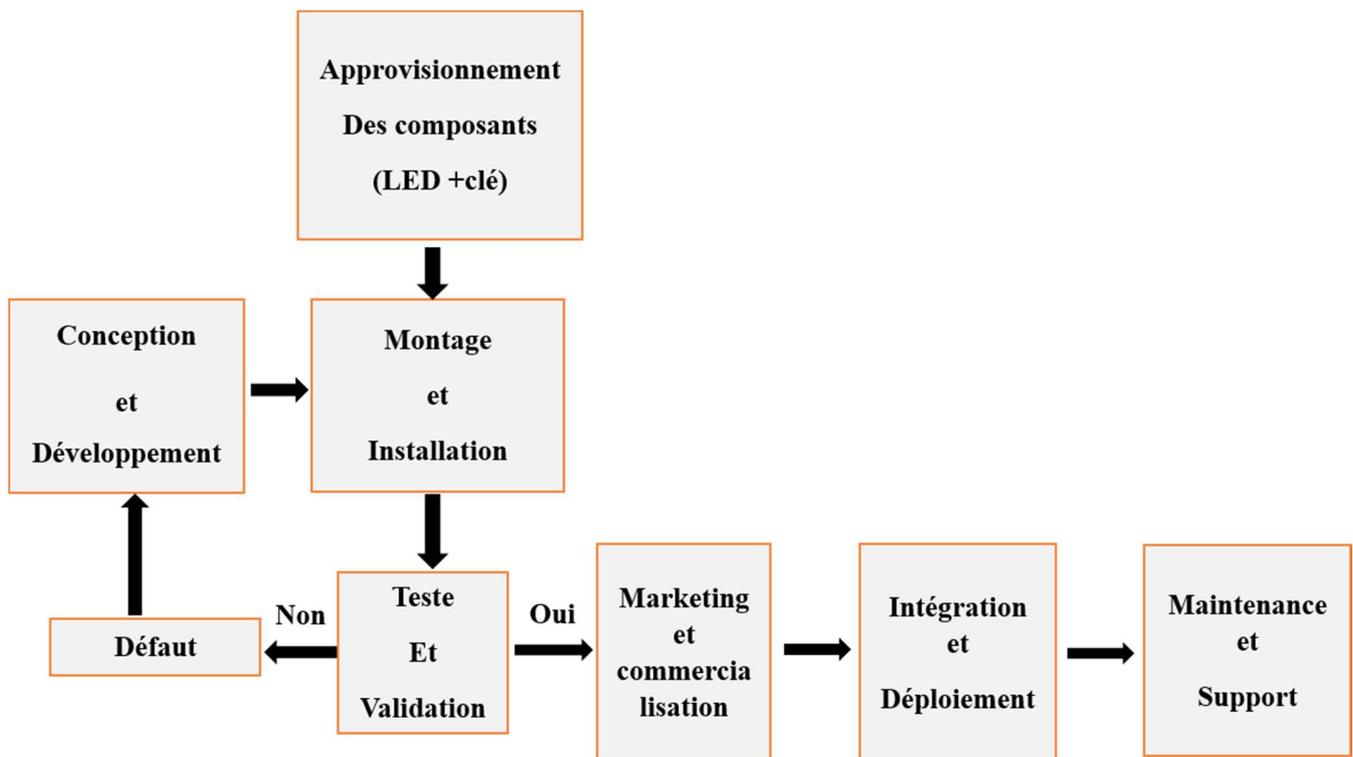
6. Tests et validation : Après l'installation, les systèmes Li-Fi sont soumis à des tests et à une validation approfondis. On réalise des tests de performance, des tests de connectivité, des tests de fiabilité et des tests de sécurité. Les systèmes sont évalués pour s'assurer qu'ils fonctionnent conformément aux spécifications et aux exigences du projet.

7. Marketing et commercialisation : Une fois que les systèmes Li-Fi sont prêts à être commercialisés, une stratégie de marketing est développée pour promouvoir les avantages et les fonctionnalités du produit. Cela peut inclure des campagnes publicitaires, des présentations lors de salons professionnels, des démonstrations en direct, des activités de relations publiques et la création de supports marketing tels que des brochures, des vidéos et des sites web. L'objectif est de sensibiliser les clients potentiels, tels que les hôpitaux et les autres institutions de santé, aux avantages du Li-Fi et de les convaincre de l'adopter.

8. Intégration et déploiement : Une fois les systèmes Li-Fi validés, on les intègre dans les environnements cibles. Cela peut impliquer l'installation physique des émetteurs et des récepteurs Li-Fi dans les hôpitaux, ou d'autres infrastructures spécifiques. On suit les procédures d'installation pour garantir un déploiement correct et fiable du Li-Fi.

9. Maintenance et support : Après le déploiement, on met en place des activités de maintenance et de support pour assurer un fonctionnement continu et optimal des systèmes Li-Fi. Cela peut inclure des mises à jour logicielles, des réparations, des remplacements de composants défectueux et un support technique pour les utilisateurs finaux.

Voici la chaîne de production :



LA FOURNITURE

1. Acquisition d'équipements :

- Identifier les équipements spécifiques nécessaires à la mise en œuvre du LiFi, tels que les émetteurs LED, et les récepteurs (clés).
- Établir des relations avec des fournisseurs et des fabricants fiables capables de fournir des composants de haute qualité.
- Négocier des conditions favorables, notamment en ce qui concerne les prix, les calendriers de livraison et les garanties.

2. Gestion des ressources :

- Affecter les ressources de manière efficace en créant un plan de ressources qui précise la quantité et le type d'équipement nécessaire pour chaque phase du projet.

- Mettez en place un système de gestion des stocks pour suivre les niveaux d'équipement et commander à nouveau des fournitures si nécessaire.
- Envisagez de conserver des stocks tampons de composants essentiels pour éviter les retards en cas de perturbation de la chaîne d'approvisionnement.

3. Stratégie d'approvisionnement :

- Élaborer une stratégie d'approvisionnement qui concilie la rentabilité et l'assurance de la qualité.
- Déterminer s'il convient de s'approvisionner en matériel localement ou internationalement, en tenant compte de facteurs tels que les délais et les coûts.
- Évaluer la possibilité d'acheter en gros pour réduire les coûts unitaires.

4. Relations avec les fournisseurs :

- Entretenir des relations étroites avec les fournisseurs d'équipement afin de garantir des livraisons dans les délais et une qualité constante.
- Maintenir des lignes de communication ouvertes avec les fournisseurs afin de résoudre rapidement tout problème lié à l'approvisionnement.
- Envisager des partenariats à long terme avec les principaux fournisseurs pour obtenir des prix préférentiels.

5. Assurance de la qualité :

- Mettre en œuvre des mesures de contrôle de la qualité afin de vérifier la qualité et la fonctionnalité des équipements achetés.
- Effectuer des inspections à la réception de l'équipement afin d'identifier et de traiter tout défaut ou anomalie.
- Élaborer des normes de qualité et des spécifications claires pour tous les équipements.

6. Allocation budgétaire :

- Affecter une partie de notre budget à la couverture des coûts d'acquisition des équipements et des ressources.
- Examiner régulièrement notre budget d'approvisionnement pour s'assurer qu'il correspond aux exigences du projet.

7. Atténuation des risques :

- Identifier les risques potentiels liés à la chaîne d'approvisionnement, tels que les retards dans la livraison des équipements ou les problèmes de qualité.
- Élaborer des plans d'urgence pour faire face aux ruptures d'approvisionnement et minimiser leur impact sur le calendrier du projet.

8. Approvisionnement local :

- Dans la mesure du possible, il convient d'envisager l'achat d'équipements et de ressources au niveau local afin de soutenir l'économie algérienne et de réduire les complexités logistiques.
- Collaborer avec les fournisseurs et fabricants locaux pour répondre aux besoins du projet.

9. Conformité et documentation :

- Veiller à ce que tous les équipements achetés soient conformes aux normes réglementaires et de sécurité applicables en Algérie.
- Conserver des dossiers d'achat détaillés, y compris les factures, les reçus et les spécifications des équipements, à des fins de conformité et d'audit.

10. Logistique et transport :

- Planifier efficacement la logistique et le transport de l'équipement vers les sites du projet.
- Coordonner avec les partenaires logistiques pour optimiser les itinéraires et minimiser les coûts de transport.

11. Contrôle continu :

- Contrôler en permanence la chaîne d'approvisionnement et l'inventaire des équipements afin d'identifier et de résoudre rapidement tout problème.
- Tenir les parties prenantes informées des mises à jour relatives à l'approvisionnement et des retards potentiels.

Ce plan d'approvisionnement professionnel fournit une approche structurée pour obtenir l'équipement et les ressources nécessaires à notre projet de mise en œuvre du LiFi dans le secteur de la santé en Algérie. En vous concentrant sur l'efficacité de l'approvisionnement, l'assurance qualité et l'atténuation des risques, garantir une chaîne d'approvisionnement fluide et l'exécution du projet dans les délais impartis.

LA MAIN D'OEUVRE

La mise en œuvre réussie de la technologie LiFi dans les hôpitaux nécessite le déploiement d'une main-d'œuvre qualifiée et multidisciplinaire. Notre projet reconnaît l'importance primordiale des ressources humaines dans la mise en œuvre de la technologie LiFi dans les établissements de santé. Voici comment nous prévoyons de répondre aux besoins en main-d'œuvre :

1. Spécialistes de la technologie LiFi : Notre projet emploiera une équipe de spécialistes de la technologie LiFi, notamment des ingénieurs, des architectes de réseau et des experts en sécurité des données. Ces personnes auront une connaissance approfondie du matériel, des logiciels et des protocoles LiFi. Ils seront chargés de concevoir et de configurer des réseaux LiFi adaptés à la configuration et aux besoins uniques de chaque hôpital. En outre, ils veilleront à une intégration transparente avec l'infrastructure informatique existante de l'hôpital.

2. Équipes d'installation et de maintenance : Nous mettrons en place des équipes dédiées à l'installation et à la maintenance. Ces professionnels seront formés à l'installation de points d'accès LiFi, de LED et d'équipements connexes dans les locaux de l'hôpital. Ils assureront également la maintenance de routine et le dépannage afin de garantir une connectivité ininterrompue.

3. Experts en sécurité des données : La sécurité des données étant une préoccupation majeure dans les environnements de soins de santé, notre projet fera appel à des spécialistes de la sécurité des données qui se spécialisent dans la technologie LiFi. Ces experts mettront en œuvre des mesures robustes de cryptage et de cybersécurité pour protéger les données médicales sensibles transmises par le réseau LiFi.

4. Formation et renforcement des capacités : Pour permettre au personnel hospitalier de gérer et d'utiliser efficacement le réseau LiFi, notre projet proposera des programmes complets de formation et de renforcement des capacités. Le personnel informatique de l'hôpital, le personnel médical et les administrateurs recevront une formation pour s'assurer qu'ils peuvent maximiser les avantages de la technologie LiFi dans leurs opérations quotidiennes.

5. Gestion et coordination du projet : Une gestion de projet efficace est essentielle pour garantir que la mise en œuvre de la technologie LiFi progresse sans heurts et respecte le calendrier. Nous emploierons des chefs de projet qui supervisent tous les aspects de la mise en œuvre, de la planification initiale au déploiement final. Ils coordonnent les efforts des différentes équipes et parties prenantes afin de garantir une exécution efficace.

6. Formation et développement continu : L'évolution rapide de la technologie exige un apprentissage et un développement continu. Notre projet investira dans la formation et le développement continu de tous les membres de la main-d'œuvre, en les tenant au courant des dernières avancées de la technologie LiFi et des meilleures pratiques en matière de soins de santé.

Ce projet peut créer environ 15 employeurs :

- 1 Chef de projet
- 2 Gestionnaires de projet.
- 3 Ingénieurs en réseaux et télécommunications,
- 3 Développeurs logiciel,
- 2 Spécialistes en sécurité des données,
- 3 Techniciens d'installation,

PARTENARIAS

Au cœur de notre projet de mise en œuvre de la technologie LiFi pour les hôpitaux, nous mettons l'accent sur le développement de partenariats stratégiques avec des acteurs clés des secteurs de la santé et de la technologie. Ces partenariats sont essentiels pour catalyser le déploiement et l'intégration réussie de la technologie LiFi dans les environnements hospitaliers.

1. Collaboration avec les établissements de santé : Notre projet est fermement engagé à forger des alliances avec des établissements de soins de santé de différentes tailles, allant des petites cliniques aux grands centres médicaux. Grâce à ces collaborations, nous souhaitons obtenir des informations précieuses sur les besoins et les défis spécifiques des hôpitaux en matière de connectivité. En travaillant en étroite collaboration avec les administrateurs des hôpitaux, les départements informatiques et le personnel médical, nous adaptons nos solutions LiFi pour qu'elles s'alignent parfaitement sur leur infrastructure existante et leurs exigences opérationnelles.

2. Engagement des fournisseurs de technologie : Le partenariat avec les principaux fournisseurs de technologie spécialisés dans les composants et les équipements LiFi fait partie intégrante de la réussite de notre projet. Ces collaborations garantissent l'accès à du matériel, des logiciels et de l'expertise LiFi de pointe, ce qui nous permet de fournir des solutions d'avant-garde

aux hôpitaux. En nous alignant sur les leaders technologiques, nous pouvons garantir la fiabilité, la sécurité et l'évolutivité de notre implémentation LiFi, renforçant ainsi sa position en tant que solution de connectivité de premier plan.

3. Collaboration en matière de recherche et de développement : La collaboration avec des instituts de recherche et des universités spécialisés dans la technologie LiFi alimente l'innovation et le progrès continu. Ces partenariats nous permettent de rester à la pointe des développements LiFi, en tirant parti des dernières avancées en matière de transmission de données, de protocoles de sécurité et d'optimisation des réseaux. En intégrant les résultats des recherches en cours, nous pouvons offrir aux hôpitaux les solutions LiFi les plus avancées et les plus pérennes.

4. Associations industrielles et organismes de normalisation : Un engagement actif auprès des associations industrielles et des organismes de normalisation garantit que notre mise en œuvre du LiFi respecte les meilleures pratiques et les références de l'industrie. Cette collaboration garantit que nos solutions répondent aux exigences rigoureuses de qualité, de sécurité et de réglementation du secteur des soins de santé. En outre, en participant activement aux discussions et aux initiatives du secteur, nous contribuons à façonner l'avenir de la technologie LiFi dans le domaine des soins de santé.

5. Partenariats locaux et mondiaux : Nous favorisons les partenariats locaux et mondiaux afin d'étendre notre portée et notre impact. Les partenariats locaux facilitent la mise en œuvre de la technologie LiFi dans des systèmes de soins de santé spécifiques, en tenant compte des nuances et des défis régionaux. Simultanément, les collaborations mondiales nous permettent de puiser dans un pool diversifié d'expertise et de ressources, ce qui nous permet d'adapter les solutions LiFi aux demandes uniques des hôpitaux du monde entier.

Ces partenariats stratégiques soulignent notre engagement à fournir des solutions LiFi de pointe adaptées aux besoins spécifiques des hôpitaux. En travaillant de concert avec les établissements de santé, les fournisseurs de technologie, les organismes de recherche, les associations industrielles et un réseau mondial de partenaires, nous sommes prêts à révolutionner la connectivité et la sécurité des données dans le secteur de la santé, en améliorant les soins aux patients et les services médicaux.

5. PLAN FINANCIER



COUTS ET CHARGE

1. Mise en place de l'infrastructure :

- Émetteurs-récepteurs LiFi (LED, clé) : 30 000 000 DZD
- Installation et câblage : 15 000 000 DZD
- Équipement de réseau (routeurs, commutateurs) : 25 000 000 DZD
- Alimentation électrique : 10 000 000 DZD
- Coûts de la main-d'œuvre pour l'installation : 20 000 000 DZD

2. Logiciel et développement :

- Logiciel de gestion LiFi : 15 000 000 DZD
- Intégration avec les systèmes hospitaliers : 15 000 000 DZD
- Développement de logiciels personnalisés : 10 000 000 DZD

3. Formation et ateliers :

- Formation du personnel : 5 000 000 DZD
- Ateliers et programmes d'éducation : 5 000 000 DZD

4. Essais et assurance de la qualité :

- Équipement et outils d'essai : 7 000 000 DZD
- Assurance qualité et essais : 7 000 000 DZD

5. Gestion de projet et consultation :

- Frais de gestion du projet : 12 000 000 DZD
- Services de consultation et de conseil : 4 000 000 DZD

6. Imprévus :

- Dépenses imprévues et fonds d'urgence : 6 000 000 DZD

7. Marketing et promotion :

- Promotion de la mise en œuvre du LiFi : 4 000 000 DZD

8. Divers :

- Dépenses imprévues : 10 000 000 DZD

Budget total : 200 000 000 DZD

STREAM REVENUES

1. Installation et vente d'équipement LiFi :

- Installation et vente d'équipement LiFi tels que les LEDs et les clés, qui peuvent se connecter au réseau LiFi dans les hôpitaux.

- Revenu annuel estimé :
20 000 000 DZD

2. Solutions de sécurité LiFi

- Développement et vente aux hôpitaux de solutions de sécurité basées sur le LiFi, telles que la transmission sécurisée de données pour les dossiers des patients et les informations confidentielles.

- Revenu annuel estimé : 4 000 000 DZD

3. Vente d'appareils médicaux basés sur le LiFi:

- Collaboration avec des fabricants d'appareils médicaux compatibles avec le LiFi, tels que des équipements de surveillance, afin d'améliorer les soins prodigués aux patients.

- Revenu annuel estimé : 7 000 000 DZD

4. Extension du LiFi à d'autres secteurs :

- Étendre la technologie LiFi au-delà des hôpitaux à des secteurs tels que l'éducation, et générer des revenus grâce à la mise en œuvre dans ces domaines.

- Revenu annuel estimé : 50 000 000 DZD

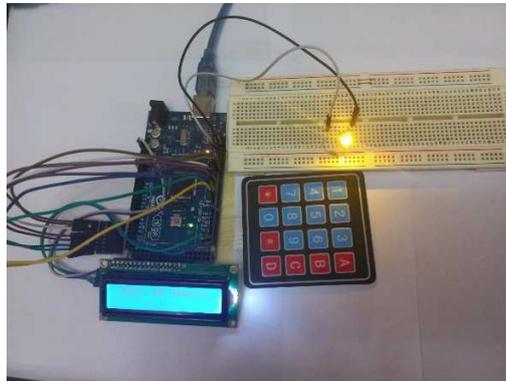
Revenu annuel total estimé (y compris les flux précédents) : 121 000 000 DZD

Ces flux de revenus supplémentaires génèrent non seulement des revenus, mais permettent également à notre projet de tirer parti de la technologie LiFi dans divers secteurs, augmentant ainsi son impact global et sa rentabilité.

6. LE PROTOTYPE

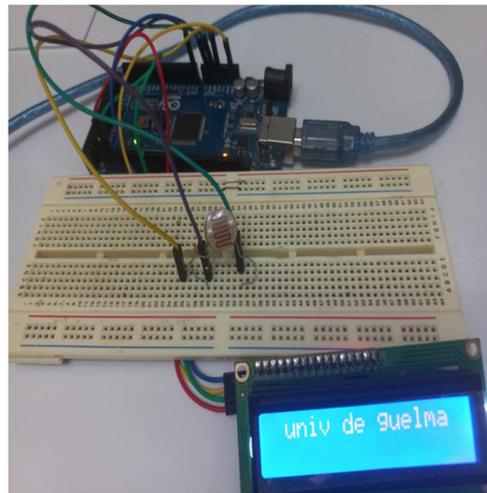


Pour mener à bien ce projet, un prototype a été mis en place. Le travail a été effectué à l'aide d'un ensemble de composants indispensables au bon fonctionnement du système de communication Li-Fi réalisé comme la LED, la photodiode et les microcontrôleurs Arduino UNO. La LED servira à envoyer la source du signal qui sera réceptionnée par un photodétecteur, le tout contrôlé par un microcontrôleur Arduino UNO à l'émission et un autre à la réception.



Partie - émission

1. **La LED** qui fluctue à grande vitesse, avec une fréquence de plusieurs dizaines de milliers voire millions de signaux par seconde, sert à **transformer les données électriques en signal lumineux**,
2. Le signal lumineux est perçu par **la photodiode** qui le **transforme en signal électrique** et le transmet à l'ordinateur ou un afficheur.



Partie - réception

3. **L'ordinateur ou l'afficheur traduit le signal** en informations compréhensibles par l'homme.
4. **Logiciel de gestion** : Un logiciel de gestion peut être utilisé pour configurer et gérer le réseau Li-Fi. Il permet de contrôler les paramètres de transmission, de surveiller les performances du réseau et de gérer les connexions des appareils.

6. BUSINESS MODEL CANVAS (BMC)

<p>PARTENAIRES CLÉS</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Les fabricants des LEDs et photorécepteur (clés). • Fonds d'approvisionnement ASF. • les établissements de santé. • les établissements de recherche et de développement. 	<p>ACTIVITÉS CLÉS</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Montage des LEDs et clés. • Installation et configuration • Les services de support et de maintenance. • Formation du personnel médicale a l'utilisation de LiFi. • Le marketing et les ventes. 	<p>PROPOSITIONS DE VALEUR</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Une sécurité absolue. • Une santé préservée. • La mobilité du sans-fil sans les interférences. • Augmentation de la précision des équipements médicaux. • Adaptabilité à l'infrastructure existante 	<p>RELATION CLIENTS</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Suivi régulier avec les responsables des établissements de santé pour comprendre leur besoin. • service client. 	<p>SEGMENTS CLIENTS</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Les hôpitaux publics. • Les cliniques privées. • Les établissements de santé.
	<p>RESSOURCES CLÉS</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Equipes de montage et d'installation. • Ingénieurs. • programmeurs. 		<p>CANAUX</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Vente directes aux établissements de santé. • Les sites web. • Les réseaux sociaux. 	

	<ul style="list-style-type: none"> • Equipe du vente et marketing. 			
<p>STRUCTURE DES COÛTS</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Mise en place de l'infrastructure. • Coût d'approvisionnement et d'assemblage. • Les dépenses de marketing. • Les salaires des employés. • Coûts de partenariat • Support client et maintenance. • Location de local commercial. 		<p>SOURCES DE REVENUS</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Vente d'équipement LiFi (LED, clés). • Les services d'installation et de maintenance. • Développement et vente de solutions de sécurité basées sur le LiFi. • Vente d'appareils médicaux basés sur le LiFi. • Extension du LiFi à d'autres secteurs. 		