

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



Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique
Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Télécommunication**
Spécialité : **Réseaux et Télécommunication**

Etude d'un système de communication VLC

Présenté par :

HAMOUDA Adib
OUMEDDOUR Doua Hibat Allah

Sous la direction de :

Dr. BOULSINA Fayçal

Année universitaire 2024-2025



Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu qui nous a aidés à réaliser ce travail.

Nous tenons également à remercier chaleureusement nos parents pour leurs encouragements, leur soutien indéfectible et les sacrifices qu'ils ont endurés pour nous.

Nous adressons nos remerciements sincères à notre promoteur **Boulsina Fayçal** pour les efforts déployés, ses précieux conseils, son encouragement constant et ses corrections qui ont été essentielles à l'aboutissement de ce projet.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Notre gratitude va aussi à l'ensemble du corps enseignant du département de **Télécommunications** qui a grandement contribué à notre formation universitaire.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont participé à la réalisation de ce travail.



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes parents, qui ont été pour moi une
source de générosité.*

*Et de patience tout au long de ma carrière scolaire. Que Dieu vous
protège, vous accorde la bonne santé et vous accorde une longue vie.*

À mes frères Mohamed et Abd al alim qui m'ont toujours guidé.

La bonne voie et qui ont su m'aider.

*Aux personnes qui m'ont accompagné durant mon cursus
universitaire.*

*À mes amies Aya et Hind pour leurs encouragements
permanents et leur soutien.*

Oumeddour Doua

Dédicace :

Je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce travail.

*À mon père **ABDELDJALIL HAMOUDA.***

Dont la sagesse, le courage et la bienveillance m'ont toujours guidé. Son soutien constant et ses conseils avisés ont été pour moi une source inestimable de motivation et de force.

*À ma mère **BOUIDDOUN HOUDA.***

Dont l'amour inconditionnel, la tendresse et les prières silencieuses m'ont accompagné tout au long de mon parcours. Elle est la lumière douce qui éclaire mes pas, même dans les moments d'incertitude.

À mes frères et ma sœur,

Mehdi, Walid, Imene, Chiraz, pour leur présence réconfortante, leur soutien moral et leur encouragement permanent.

À Moi.

*À **Mi Corazón.***

À mes chers amis

Mouhab T, Majdi T, Mehdi B, Islam B, Issam C, Ala M, Nidal K, Wassim A, Hicham F, Nadji F, Rami B, Islam Bou, pour leur amitié sincère, leur écoute et leur enthousiasme qui ont souvent allégé le poids du travail.

*À mon encadrant **BOULSINA FAYCAL***

Pour son encadrement rigoureux, ses conseils précieux, et sa disponibilité tout au long de ce projet. Sa confiance et ses orientations ont grandement enrichi cette recherche.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire — par un conseil, un encouragement, ou un simple geste de soutien — je vous adresse ma profonde reconnaissance

Adib

Résumé

La communication par la lumière visible (VLC) est une technologie innovante qui exploite la lumière émise par les LEDs non seulement pour l'éclairage, mais aussi pour la transmission de données. Le travail présenté dans ce mémoire avait comme objectif l'étude d'un système VLC en environnement intérieur. Dans ce cadre, plusieurs configurations d'un système VLC intérieur ont été comparées selon des paramètres comme l'éclairage, la puissance reçue, le rapport signal sur bruit (SNR), et la propagation du retard de canal RMS (RMS-delay). Les résultats obtenus ont démontré que la configuration utilisant six sources à LED offre les meilleures performances. En complément de l'étude théorique, un système VLC simple a été réalisé à l'aide d'un Arduino Nano, d'une LED et d'une photodiode. Ce système est capable de transmettre un message texte via un signal lumineux.

Mots-clés: VLC, LED, Eclairage, SNR, RMS-delay.

Abstract

Visible light communication (VLC) is an innovative technology that exploits the light emitted by LEDs not only for illumination, but also for data transmission. The aim of the work presented in this dissertation was to study a VLC system in an indoor environment. In this context, several configurations of an indoor VLC system were compared according to parameters such as illuminance, received power, signal-to-noise ratio (SNR), and RMS-delay spread. The results show that the configuration using six LED sources offers the best performance. As a complement to the theoretical study, a simple VLC system was built using an Arduino Nano, an LED and a photodiode. This system is capable of transmitting a text message via a light signal.

Key words: VLC, LED, Illumination, SNR, RMS-delay.

ملخص

الاتصالات بالضوء المرئي (VLC) هي تقنية مبتكرة تستخدم الضوء المنبعث من مصابيح LED ليس فقط لغرض الإضاءة، وإنما أيضاً لنقل البيانات. يهدف العمل المقدم في هذه المذكرة إلى دراسة نظام VLC في بيئة داخلية. في هذا السياق، تمت مقارنة العديد من التراكيب لنظام VLC داخلي وفقاً لمعايير مثل الإضاءة، القدرة المستقبلية، نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) وانتشار تأخير القناة RMS. أظهرت النتائج أن التركيب الذي يستخدم ستة مصادر LED قدم أفضل أداء. استكمالاً للدراسة النظرية، تم إنشاء نظام VLC بسيط باستخدام لوحة أودينو نانو، مصباح باعث للضوء وصمام ضوئي. هذا النظام قادر على نقل رسالة نصية عبر إشارة ضوئية.

الكلمات المفتاحية: الاتصالات بالضوء المرئي، الصمام الباعث للضوء، الإضاءة، نسبة الإشارة إلى الضوضاء، انتشار تأخير

القناة RMS.

Table Des Matières

Remerciements

Dédicace

Abstract

Table Des Matières.....	I
Liste Des Tableaux	IV
Liste Des Figures	V
Liste Des Abréviations.....	VIII
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Généralité sur les systèmes VLC

I. 1. Introduction.....	3
I.2. SYSTEMES DE COMMUNICATION SANS FIL	3
I.3. DIFFERENTS SYSTEMES DE COMMUNICATION SANS FIL ACTUELLES.....	3
I.3.1. Bluetooth	4
I.3.2. WLAN (WIFI).....	4
I.3.3. Communication infrarouge	5
I.3.4. Radiodiffusion.....	6
I.3.5. Communication sans fil par satellite	7
I.3.6. Communication sans fil par VLC	8
I.4. SYSTEMES DE COMMUNICATION PAR VLC.....	9
I.4.1. Historique	9
I.4.2. Principe de fonctionnement.....	11
I.4.3. Architecture VLC.....	11
I.4.3.1. Emetteur.....	11
I.4.3.2 Récepteur	13
I.4.4. Modulations dans le domaine de VLC.....	13
I.4.4.1. Modulation OOK.....	13
I.4.4.2. Modulation VPPM.....	14
I.4.4.3. Modulation OFDM.....	14

I.4.4.4. Modulation CSK.....	15
I.4.5. Standards.....	16
I.4.6. Avantages et Inconvénients des systèmes VLC.....	17
I.4.6.1 Avantages.....	17
I.4.6.2 Inconvénients.....	18
I.4.7. Domaines d'application.....	18
I.4.7.1. Systèmes VLC Indoor.....	18
I.4.7.2. Systèmes VLC Outdoor.....	20
I.5. CONCLUSION.....	20

Chapitre II : Etude d'un système VLC indoor

II.1. INTRODUCTION.....	23
II.2. SYSTEME ETUDIE	23
II.3. ILLUMINANCE	25
II.4. Puissance reçue	27
II.5 RAPPORT DE SIGNAL SUR BRUIT (SNR)	29
II.6. PROPAGATION DU RETARD DE CANAL (RMS)	32
II.7. Conclusion.....	35

Chapitre III : Réalisation d'un système VLC

I.1 INTRODUCTION.....	37
III.2. MATERIEL ET COMPOSANTS UTILISES.....	37
III.2.1. Carte Arduino	37
III.2.2. LED.....	40
III.2.3. Photodiode BPW34.....	41
III.3. REALISATION DU SYSTEME	42
III.3.1. Réalisation de l'émetteur	43
III.3.2. Réalisation du récepteur	45

III.4. CONCLUSION	47
conclusion générale.....	49
Référence bibliographique.....	51
ANNEXE.....	55

Liste Des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Caractéristiques des LED.....	12
Tableau I.2 : Modulation CSK.....	16

Chapitre II

Tableau II.1 : Position des émetteurs.....	24
Tableau II.2 : Paramètres utilisés pour tracer la distribution de l'illuminance.....	26
Tableau II.3 : Valeurs de l'illuminance pour les modèles (a), (b), (c) et (d).....	27
Tableau II.4 : Paramètres utilisés pour tracer la distribution de la puissance reçue.....	28
Tableau II.5 : Valeurs de la puissance reçue pour les modèles (a), (b), (c) et (d).....	29
Tableau II.6 : Paramètres utilisés pour tracer la distribution du SNR.....	31
Tableau II.7 : Valeurs du SNR pour les Modèles (a), (b), (c) et (d).....	32
Tableau II.8 : Paramètres utilisés pour tracer la distribution du RMS-Delay.....	34
Tableau II.9 : Valeurs du RMS pour les modèles (a), (b), (c) et (d).....	35

Liste Des Figures

Chapitre I

Figure I.1 : Spectre électromagnétique. Spectre infrarouge.....	6
Figure I.2 : fonctionnement schématique d'une radiodiffusion.....	7
Figure I.3 : Eléments de base d'un système de télécommunication par satellites.....	8
Figure I.4 : Spectre électromagnétique.....	9
Figure I.5 : Dispositifs d'émission et de réception du photophone.....	10
Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un système VLC.....	11
Figure I.7 : Schéma fonctionnel d'un système VLC.....	11
Figure I.8 : Modulation OOK.....	13
Figure I.9 : Modulation VPPM.....	14
Figure I.10 : Modulation CSK.....	15
Figure I.11 : Architecture de périphérique VLC sous la norme IEEE802.15.7.....	17
Figure I.12 : Utilisation du VLC pour la localisation intérieure.....	19

Chapitre II

Figure II.1 : Système VLC étudié.....	23
Figure II.2 : Arrangements des sources à LED pour les quatre modèles.....	24
Figure II.3 : Distribution de l'illuminance pour les modèles (a), (b), (c) et (d).....	26
Figure II.4 : Distribution de la puissance reçue pour les modèles (a), (b), (c) et (d).....	29
Figure II.5 : Distribution du SNR pour les Modèles (a), (b), (c) et (d).....	32
Figure II.6 : Distribution du RMS-Delay pour les modèles (a), (b), (c) et (d).....	34

Chapitre III

Figure III.1 : Arduino Nano.....	39
Figure III.2 : Présentation de l'IDE.....	40
Figure III.3 : LED RGB.....	41
Figure III.4 : Photodiode BPW34.....	42
Figure III.5 : Système de la communication par VLC réalisé.....	43
Figure III.6 : Circuit d'émission.....	44

Figure III.7 : Code pour l'émetteur.....	45
Figure III.8 : Circuit de réception.....	46
Figure III.9 : Code pour le récepteur.....	47

Liste Des Abréviations

BDD	Base De Données
VLC	Visible Light Communication
LED	Light Emitting Diode
Wi Fi	Wireless Fidelity
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
WLAN	Wireless Local Area Network
NCR	National Cash Register
WEP	Wired Equivalent Privacy
WPA	Wi Fi Protected Access
IR	Infrarouge
AM	Amplitude Modulation
FM	Frequency Modulation
VSAT	Very Small Aperture Terminal
RCVO	Reference Controlled Voltage Oscillator
RF	Radiofrequency
GPS	Global Positioning System
GLONASS	Global Navigation Satellite
LCD	Liquid Crystal Display
VLCC	Visible Light Communications Consortium
IrDA	Infrared Data Association
DAC	Digital-to-Analog Converter
TCA	Transconductance Amplifier
LPF	Low-Pass Filter
PIN	P-type, Intrinsic, and N-type
TIA	Transimpedance Amplifier
ADC	Analogue-to-Digital Converter
OOK	On-Off Keying
VPPM	Variable Pulse Position Modulation

PWM	Pulse Width Modulation
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
IES	Interférence Entre Symbole
CSK	Color-Shift Keying
RGB	Red, Green, Blue
RVB	Rouge, Vert, Bleu
LLC	Logical Link Control
MAC	Media Access Control
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
DME	Device Management Entity
SAP	Service Access Point
ISI	InterSymbol Interference
Li Fi	Light Fidelity
STI	Système de Transport Intelligent
SNR	Signal-to-Noise Ratio
RMS	Root Mean square
ISO	International Organization for Standardization
FOV	Field of View
PD	Photodiode
IDE	Integrated Development Environment
USB	Universal Serial Bus
PC	Personal Computer
GND	Ground

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les réseaux sans fil constituent aujourd'hui une infrastructure cruciale, permettant une connectivité aisée sur des distances significatives, de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Leur déploiement ne requiert pas d'aménagements lourds comparables à ceux des réseaux filaires traditionnels (câblage), ce qui favorise une mise en œuvre rapide et adaptable des technologies de communication modernes. Cependant, malgré leur omniprésence et leur fiabilité, les technologies sans fil actuelles, telles que le Wi-Fi, rencontrent des limites croissantes en termes de bande passante, de saturation des réseaux et de préoccupations liées aux ondes radiofréquences. Face à ces défis et à la demande constante d'une connectivité toujours plus performante et sécurisée, de nouvelles approches sont activement explorées.

Dans ce contexte, la communication par la lumière visible (VLC) se présente comme une approche prometteuse, offrant la capacité de transmettre des informations en utilisant la lumière non seulement pour l'éclairage mais aussi pour la communication. La technologie VLC, en particulier grâce aux systèmes d'éclairage à LED, connaît un développement rapide et permet de réduire considérablement les coûts d'installation et de maintenance. Contrairement aux communications radio, qui peuvent être sujettes à des limitations en termes de fréquences disponibles et d'interférences, la VLC offre une bande passante massivement plus large (environ 10 000 fois celle du Wi-Fi) et une absence d'interférences électromagnétiques, la rendant robuste et capable de connecter un grand nombre d'utilisateurs simultanément. De plus, sa caractéristique de ne pas traverser les murs renforce la sécurité des données, rendant le piratage externe impossible.

Ce mémoire a pour objectif l'étude d'un système VLC en environnement intérieur. Il est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur la communication par VLC : Historique, principe de fonctionnement, et domaines d'applications.
- Le deuxième chapitre est dédié à une étude comparative de plusieurs configurations d'un système VLC en environnement intérieur selon quatre paramètres : illuminance, puissance reçue, SNR, et RMS-delay.
- Le troisième chapitre est consacré à la réalisation d'un système VLC simple, visant la transmission d'un message texte via un signal lumineux.

Chapitre I

Généralité sur les systèmes VLC

I.1. INTRODUCTION

La communication sans fil, qui constitue un pilier fondamental des sociétés contemporaines interconnectées, facilite la transmission d'informations sans recours à un support physique, en s'appuyant sur des technologies telles que le Wi-Fi, le Bluetooth et la 5G. Toutefois, la saturation croissante du spectre radioélectrique, couplée à la prolifération exponentielle des dispositifs connectés, impose une nécessité impérieuse d'explorer des alternatives innovantes. Dans ce contexte, La Communication par Lumière Visible (VLC, Visible Light Communication) émerge comme une solution prometteuse, offrant des perspectives nouvelles pour répondre aux défis actuels et futurs en matière de transmission de données.

Dans ce chapitre, nous introduirons les concepts de base du VLC, explorerons les différents systèmes de communication sans fil actuels, et présenterons les avantages, les inconvénients et les applications potentielles de cette technologie.

I.2. SYSTEMES DE COMMUNICATION SANS FIL

Un système de communication sans fil implique la transmission d'informations (données, voix, vidéo, etc.) sur une distance sans l'aide de fils, de câbles ou de toute autre forme de conducteurs électriques entre deux points ou plusieurs. Le concept de communication sans fil est apparu au 19ème siècle, et cette technologie n'a cessé d'évoluer au fil des années qui ont suivi.

Les technologies de communication sans fil ont beaucoup évolué depuis leur création, portées à la fois par les avancées scientifiques et les innovations industrielles. Grâce à leurs avantages, comme leur coût réduit et leur installation facile, elles sont devenues essentielles dans les réseaux d'aujourd'hui, [1] Allant de quelques centimètres (communication à courte portée) à plusieurs kilomètres (communication à longue portée). Dans les zones isolées ou en cas d'urgence, la mise en place d'une communication filaire s'avère complexe, tandis que la communication sans fil représente une alternative viable. Plusieurs avantages justifient le recours à la communication sans fil, tels que l'absence de câbles, une couverture à l'échelle mondiale, une grande flexibilité et la possibilité de maintenir une connexion en permanence [2].

I.3. DIFFERENTS SYSTEMES DE COMMUNICATION SANS FIL ACTUELLES

La communication sans fil s'articule autour de divers systèmes. Nous allons présenter ici les systèmes les plus importants.

I.3.1. Bluetooth

Bluetooth est une technologie de communication sans fil qui permet l'échange de données entre des appareils électroniques sur de courtes distances. La technologie sans fil Bluetooth doit son nom à Harald Blatand, un Viking et roi danois, dont le nom signifie « Bluetooth » en anglais. On lui attribue le mérite d'avoir uni le Danemark et la Norvège, tout comme la technologie sans fil Bluetooth est créditée d'avoir uni deux appareils disparates

La technologie Bluetooth exige que chaque appareil comprenne une puce émettrice-réceptrice peu coûteuse. L'émetteur-récepteur émet et reçoit dans une bande de fréquences de 2,45 GHz, jusqu'alors inutilisée, qui est disponible dans le monde entier - avec une certaine variation de la largeur de bande selon les pays. Outre les données, jusqu'à trois canaux vocaux sont disponibles. Chaque appareil possède une adresse unique de 48 bits selon la norme IEEE 802.15.1. Les connexions Bluetooth peuvent être point à point ou multipoint [3].

Il s'agit d'une spécification (IEEE 802.15.1) pour l'utilisation de communications radio à faible puissance pour relier des téléphones, des ordinateurs, des téléphones aux, une souris, un clavier sans fil et d'autres périphériques réseau sur de courtes distances sans fil. Les signaux sans fil transmis via Bluetooth couvrent de courtes distances, généralement jusqu'à 10 mètres [4].

I.3.2. WLAN (WIFI)

Le Wi-Fi (Wireless Fidelity) est une technologie qui permet à des appareils électroniques, comme les ordinateurs, les smartphones, les tablettes et autres dispositifs compatibles, de se connecter à un réseau local sans fil (WLAN) et d'accéder à Internet. Dans cette configuration, un routeur fonctionne comme un centre de communication sans fil. Le Wi-Fi a été inventé par NCR Corporation/AT&T aux Pays-Bas en 1991 [5].

Le Wi-Fi fonctionne en transmettant des ondes radio à différentes fréquences pour fournir des connexions Internet et réseau sans fil à des vitesses variables. Ces ondes sont généralement regroupées en gammes de fréquences de 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz. Plus la fréquence de la bande Wi-Fi est élevée, plus les vitesses d'accès à Internet sont élevées. Les fréquences inférieures,

comme 2,4 GHz, se déplacent plus loin et offrent une plus grande portée (bien qu'à des vitesses plus faibles), tandis que 6 GHz, qui offre des vitesses plus rapides et des performances plus élevées, a une portée plus courte [6].

La norme IEEE 802.11 est un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (WLAN), et aussi en réalité la norme initiale offrant des débits de 1 ou 2 Mbit/s. Des révisions ont été apportées à la norme originale afin d'optimiser le débit (c'est le cas des normes 802.11a, 802.11b et 802.11g, appelées normes 802.11 physiques) ou bien préciser des éléments afin d'assurer une meilleure sécurité ou une meilleure interopérabilité [7].

La sécurité du Wi-Fi est un aspect crucial pour protéger les réseaux sans fil contre les accès non autorisés, les attaques et les fuites de données. La plus commune est l'utilisation d'une clé dite Wired Equivalent Privacy (WEP), communiquée uniquement aux utilisateurs autorisés du réseau. Toutefois, il a été démontré qu'une telle sécurité était facile à contourner. De nouvelles solutions sont désormais recommandées, comme les méthodes Wi-Fi Protected Access (WPA) ou la version WPA2, a été publiée en 2004 depuis l'adoption de la norme 802.11i [7]. Malgré les avancées, des failles comme Krack (découverte en 2017) ont révélé des vulnérabilités du WPA2, poussant la Wi-Fi Alliance à introduire le protocole WPA3 pour renforcer la sécurité [8].

I.3.3. Communication infrarouge

La communication infrarouge (IR) est une technologie qui utilise la lumière infrarouge pour transmettre des données entre des dispositifs. Cette méthode de communication sans fil est couramment utilisée dans divers domaines, notamment dans les télécommandes, les systèmes de sécurité, les dispositifs médicaux, et même dans certaines applications de communication entre ordinateurs et périphériques.

Pour un fonctionnement d'une communication infrarouge réussie, un émetteur photo LED et un récepteur photo diode sont nécessaires. L'émetteur LED transmet le signal IR sous forme de lumière non visible, qui est capturée et enregistrée par le photorécepteur. Ainsi, les informations entre la source et la cible sont transférées de cette manière. La source et la destination peuvent être des téléphones mobiles, des téléviseurs, des systèmes de sécurité, des ordinateurs portables, etc. prend en charge la communication sans fil [9].

L'infrarouge est situé dans une région spectrale invisible à l'œil humain, entre la lumière et les micro-ondes, d'une longueur d'onde est comprise entre 700 nm et 1mm. D'autre point aussi sont souvent subdivisés en IR proches (0,7-5 μm), IR moyens (5-30 μm) et IR lointains (30-1 000

μm). Toutefois cette classification n'est pas précise, chaque domaine d'utilisation ayant sa propre idée de la frontière entre les différents types [10].

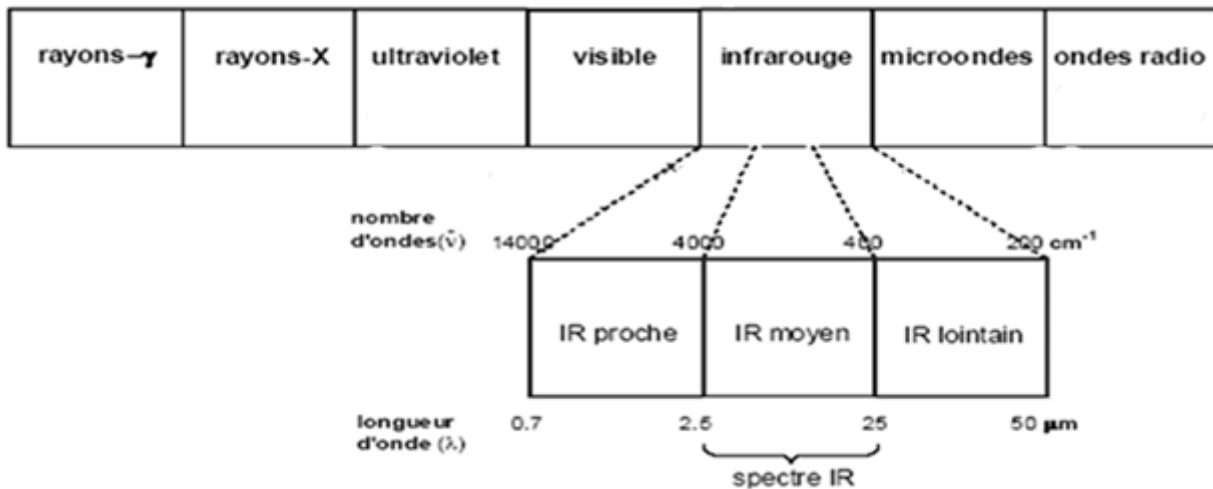


Figure I.1: Spectre électromagnétique. Spectre infrarouge [11].

Parmi les avantages notables de l'infrarouge, on peut citer sa capacité à transmettre des données sans fil sur de courtes distances, son utilisation dans des systèmes de vision nocturne et sa polyvalence dans les applications médicales telles que la thermographie. Néanmoins, il est important de souligner que cette technologie présente également des inconvénients, notamment une portée limitée, une sensibilité aux obstacles physiques et une interférence potentielle avec d'autres sources de lumière infrarouge, ce qui peut affecter son efficacité.

I.3.4. Radiodiffusion

La radiodiffusion est un moyen de communication de masse qui consiste à transmettre des informations, de la musique, des émissions culturelles, éducatives ou divertissantes via des ondes radioélectriques. Cette technologie a joué un rôle crucial dans l'histoire des médias et de la communication, permettant de toucher un large public, souvent à grande distance.

La radiodiffusion est un processus qui repose sur la modulation d'un signal porteur par l'information à transmettre. Le fonctionnement de ce processus est le suivant

- Le signal audio est capté par un microphone ou une autre source, puis transformé en un signal électrique.
- Ce signal est ensuite utilisé pour moduler une onde porteuse de haute fréquence. Les types de modulation les plus courants sont la modulation d'amplitude (AM) et la modulation de fréquence (FM).

- Le signal modulé est amplifié pour augmenter sa puissance avant d'être transmis.
- Il est ensuite envoyé à une antenne, qui le diffuse sous forme d'ondes électromagnétiques.
- À l'autre extrémité, un récepteur radio capte ces ondes, les démodule pour extraire le signal original, et le convertit en son (ou en image).

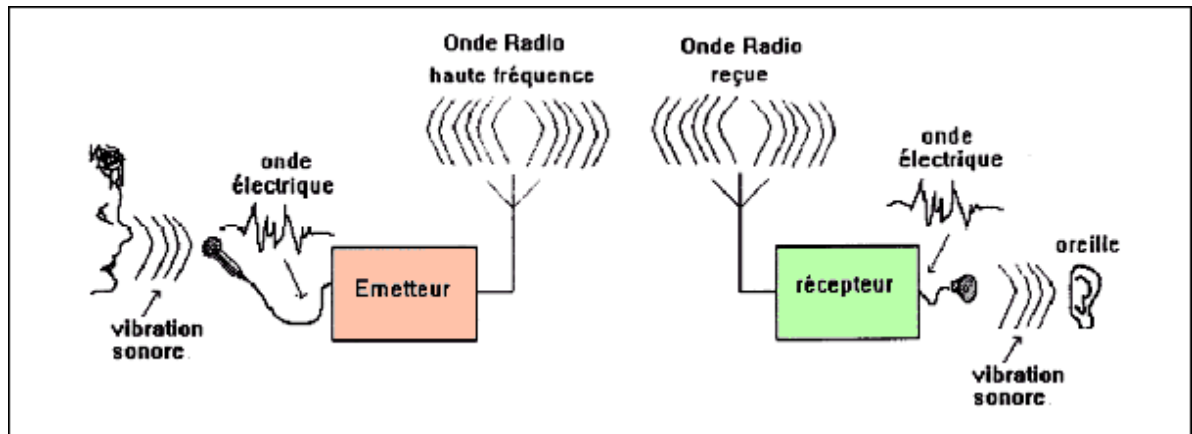


Figure I.2: Fonctionnement schématique d'une radiodiffusion [12].

Les stations radioélectriques sont caractérisées par leur fréquence d'émission. La gamme des fréquences dont elles peuvent disposer constitue ce qu'on appelle généralement le spectre radioélectrique (ou électromagnétique).

I.3.5. Communication sans fil par satellite

La communication sans fil par satellite est une technologie qui utilise des satellites artificiels en orbite autour de la Terre pour transmettre des informations (voix, données, vidéo) entre plusieurs points terrestres. Ces derniers servent de relais pour acheminer les signaux entre des stations au sol, des terminaux mobiles ou d'autres satellites.

Le fonctionnement des communications par satellite repose sur des éléments suivants :

- Le segment spatial : comprend le satellite ainsi que les infrastructures de contrôle au sol, notamment le centre de contrôle et les stations TT&C (poursuite, télémessure et télécommande), qui assurent le maintien et le bon fonctionnement des satellites.
- Le segment terrestre : regroupe les stations terriennes, reliées aux terminaux des usagers via un réseau terrestre ou directement, notamment pour les petites stations (VSAT) et stations mobiles. Ces stations varient en taille selon le type de trafic (téléphonie, télévision, données) et peuvent être fixes, transportables ou mobiles. Certaines sont uniquement réceptrices (RCVO), comme celles utilisées pour la radiodiffusion par satellite.

- Les stations d'émission : élaborent et transmettent les signaux (audio, vidéo, téléphoniques, données) via câble, fibre optique ou relais hertzien jusqu'à la station d'émission proprement dite, où se situe la liaison montante contenant l'émetteur.
- Le lien montant : est assuré par l'émetteur de la station terrestre.
- Le lien descendant : repose sur le transmetteur du satellite, chargé d'amplifier et transmettre le signal RF vers les stations réceptrices [13].

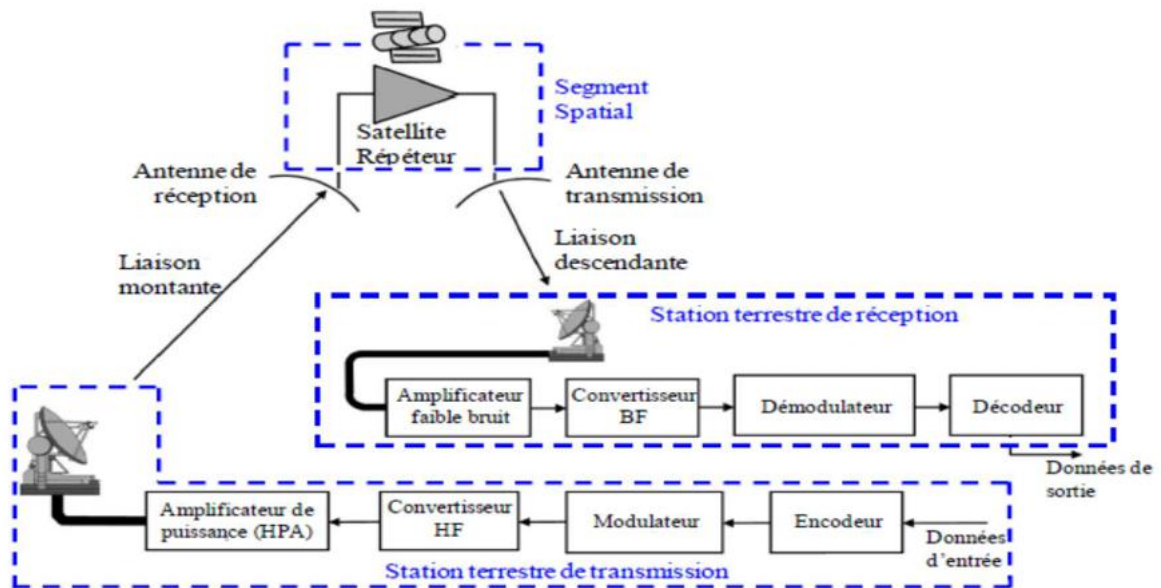


Figure I.3: Eléments de base d'un système de télécommunication par satellites [13].

La communication par satellite trouve des applications variées dans de nombreux domaines. Dans le secteur des télécommunications, elle offre des services de téléphonie, d'internet et de diffusion télévisuelle, notamment dans les zones rurales ou isolées. Pour la navigation et la localisation, des systèmes comme le GPS (États-Unis), Galileo (Europe) et GLONASS (Russie) sont indispensables pour la navigation aérienne, maritime et terrestre. En météorologie, les satellites permettent d'observer les conditions atmosphériques et de fournir des données essentielles pour les prévisions météorologiques. Ils sont également utilisés pour la surveillance et la sécurité, notamment pour le contrôle des frontières, la gestion des catastrophes naturelles et la surveillance environnementale. Enfin, dans le domaine de la recherche scientifique, les satellites jouent un rôle crucial pour l'étude de la Terre, du climat et de l'espace.

I.3.6. Communication sans fil par VLC

La communication par la lumière visible VLC (Visible Light Communication) est une technologie innovante de transmission de données sans fil qui utilise la lumière visible comme

support de communication. Elle fonctionne dans une plage du spectre électromagnétique située entre 380 et 750 nanomètres, ce qui correspond à des fréquences allant de 430 THz à 790 THz, comme le montre la figure I.4. [14].

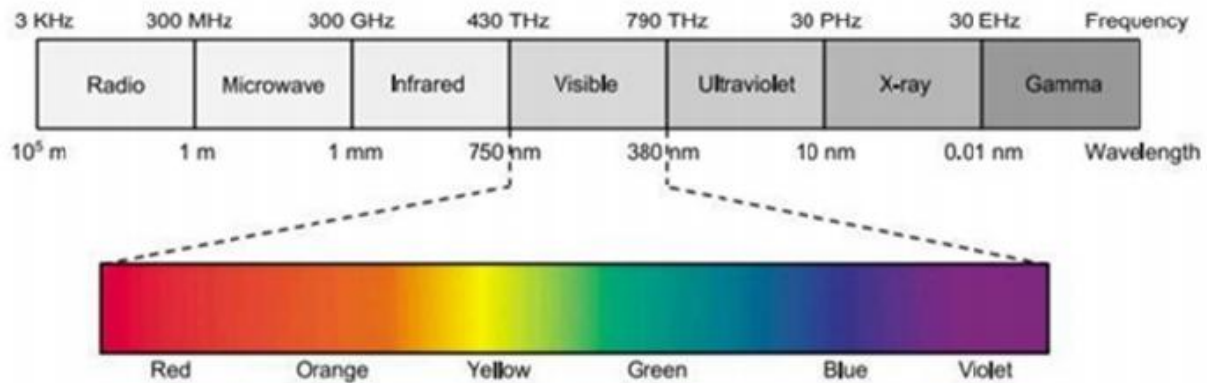


Figure I.4: Spectre électromagnétique [15].

I.4. SYSTEME DE VLC

I.4.1. Historique

Dès les premiers temps de l'humanité, la lumière a servi de moyen de communication, comme en témoignent les signaux lumineux entre navires ou les signaux de fumée utilisés par les tribus amérindiennes. Ces méthodes permettaient de transmettre des informations rapidement et efficacement.

En 1880, Alexander Graham Bell invente le photophone (figure I.5), un dispositif pionnier de communication optique sans fil capable de transmettre la voix grâce à la lumière. Le principe reposait sur un miroir mobile modulant la lumière solaire en fonction des ondes sonores, tandis qu'une parabole captait et convertissait ce signal lumineux en électricité pour reproduire le son. Bien que resté à l'état de prototype, le photophone marque une étape cruciale dans l'utilisation de la lumière visible pour la communication sans fil [16] [17].

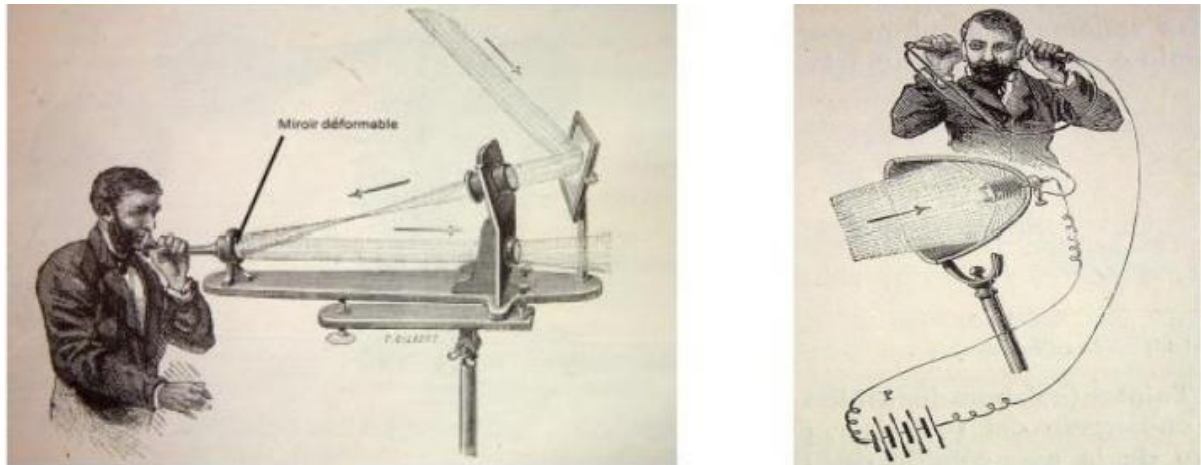


Figure I.5: Dispositifs d'émission et de réception du photophone [17].

Cependant, cette invention fut rapidement éclipsée par le télégraphe sans fil de Guglielmo Marconi en 1894, qui offrait une portée bien supérieure. L'avènement des technologies basées sur les radiofréquences (RF) relégua alors le photophone à l'arrière-plan.

C'est en 1960, avec l'invention des diodes électroluminescentes (LED) et des lasers, que la communication optique a retrouvé un intérêt. Les recherches se multiplient jusqu'aux années 1970, où les fibres optiques s'imposent comme la solution privilégiée pour les transmissions longue distance [16].

En 1979, F. R. Gfeller et G. Bapst démontrent la faisabilité de la communication optique sans fil en intérieur, utilisant des LED infrarouges. Par la suite, les progrès dans les technologies d'éclairage LED, notamment leur capacité de commutation rapide, relancent l'intérêt pour la communication par lumière visible (VLC) à haut débit. Une première proposition est faite par Pang et al. En 1999, utilisant des feux tricolores à LED comme émetteurs de signaux optiques. S. Haruyama et M. Nakagawa, à l'Université Keio au Japon, mènent ensuite des études fondamentales sur l'utilisation des LED blanches pour allier éclairage et communication.

Parallèlement, d'autres chercheurs explorent les systèmes VLC, analysant l'impact de la réflexion de la lumière et des ombres sur les performances, tout en envisageant des applications à débit modéré [18].

En 2004, les premières démonstrations de communication à haut débit par LED voient le jour au Japon, utilisant des photodiodes. Avec l'essor des téléphones portables équipés d'appareils photo, ces derniers deviennent des récepteurs VLC potentiels. Des écrans à cristaux liquides (LCD) et d'autres dispositifs d'affichage sont également exploités comme émetteurs. Le Visible Light Communications Consortium (VLCC) du Japon joue un rôle clé dans la normalisation du

VLC, étendant en 2008 la norme de l'Infrared Data Association (IrDA) pour inclure le spectre de la lumière visible [19].

I.4.2. Principe de fonctionnement

Les LED ont la capacité de s'allumer et de s'éteindre en une nanoseconde. En les activant et les désactivant des milliers de fois par seconde, il est possible de transmettre des informations via des fréquences. Une LED allumée représente un bit 1, tandis qu'une LED éteinte correspond à un bit 0 (voir Figure I.6). Ces changements de fréquence sont si rapides qu'ils sont imperceptibles à l'œil humain, qui ne voit qu'une lumière continue sans scintillement. En termes de débit, cette technologie atteint 1 Gbps, surpassant ainsi le Wi-Fi, qui offre généralement une vitesse d'environ 100 Mbps [20].

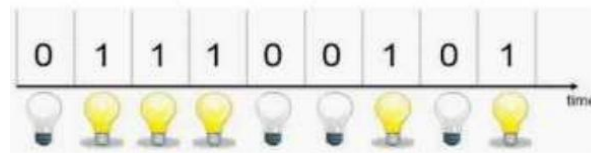


Figure I.6: Principe de fonctionnement d'un système VLC [21].

I.4.3. Architecture VLC

L'architecture du système de transmission VLC est constitué de trois parties principales un émetteur et un récepteur qui sont connectés entre eux via le canal VLC (voir la figure I.7) [22] :

- **Émetteur** : qui module la lumière produite par les LEDs.
- **Canal** : l'environnement dans lequel l'onde se propage (espace libre).
- **Récepteur** : basé sur un photodétecteur, utilisé pour extraire le signal modulé de la lumière.

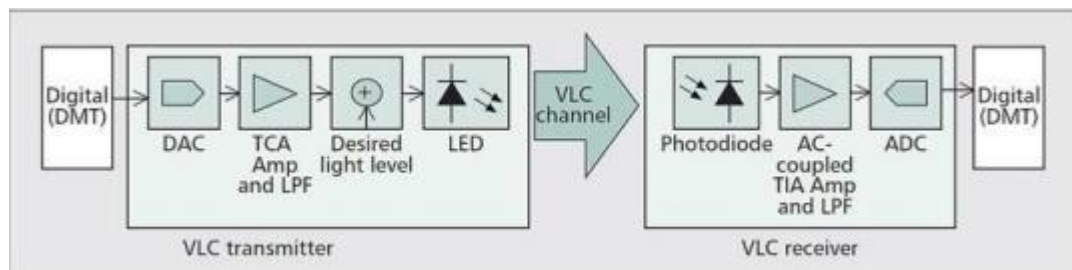


Figure I.7: Schéma fonctionnel d'un système VLC [23].

I.4.3.1. Emetteur

Dans un système de communication par la lumière visible (VLC), l'émetteur repose sur une combinaison de composants clés. Le convertisseur numérique-analogique (DAC) transforme les données numériques en un signal analogique adapté, un amplificateur à transconductance (TCA) ajuste le signal et les filtres passe-bas (LPF). Enfin, une diode électroluminescente (LED) haute vitesse convertit le signal électrique en lumière, assurant à la fois l'éclairage et la transmission des données qui sont enregistrées et modulées en ligne par le DAC avant d'être transmises au signal optique, ce qui implique de modifier l'amplitude ou toute autre qualité de la lumière de la LED [24].

✓ LED:

Grâce à leurs avantages, notamment leur coût abordable, les ampoules LED sont devenues aujourd'hui le support privilégié pour la VLC. Leur popularité grandissante et leur intégration dans divers environnements ont également favorisé leur adoption, d'autant plus que la lumière représente une solution de communication pratique et efficace [25].

Le tableau suivant montre les caractéristiques des 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

Tableau I.1: Caractéristiques des LED [26].

I.4.3.2 Récepteur

Le récepteur est basé sur l'utilisation d'un photodétecteur. Il existe plusieurs types de photodétecteurs, tels que les photomultiplicateurs, les photoconducteurs, les phototransistors et les photodiodes, chacun possédant des qualités spécifiques. Cependant, les photodiodes sont les plus utilisées en raison de leur petite taille, de leur sensibilité élevée et de leur rapidité de réponse. Parmi les différents types de photodiodes, on trouve les photodiodes PIN et les photodiodes à avalanche. Les photodiodes PIN sont souvent préférées en raison de leur réponse plus linéaire et de leur prix plus abordable [27].

Au niveau du récepteur, la photodiode transforme la puissance optique reçue en un signal électrique. Ce signal est ensuite amplifié par un amplificateur transimpédance (TIA), puis filtré par un filtre passe-bas (LPF) pour la démodulation et le décodage. Enfin, un convertisseur analogique-numérique (ADC) intervient pour transformer le signal analogique en un signal numérique, permettant ainsi de reconstituer les bits du message transmis par l'utilisateur [28].

I.4.4. Modulations dans le domaine de VLC

I.4.4.1. Modulation OOK

La modulation OOK (On-Off Keying) est une technique de modulation numérique qui consiste à coder l'information binaire en modifiant l'amplitude de signal. Dans le cas de l'OOK, les bits 0 et 1 sont représentés respectivement par l'absence ou la présence de ce signal, respectivement. Cette méthode est bien adaptée à la communication par lumière visible (VLC). Elle permet de transmettre des données en modulant l'intensité lumineuse d'une source, généralement une diode électroluminescente (LED). L'allumage et l'extinction de la LED correspondent alors aux bits 1 et 0, respectivement. Bien que simple, l'OOK présente certaines limitations, notamment en termes de scintillement potentiel et de débit de données maximal [25].

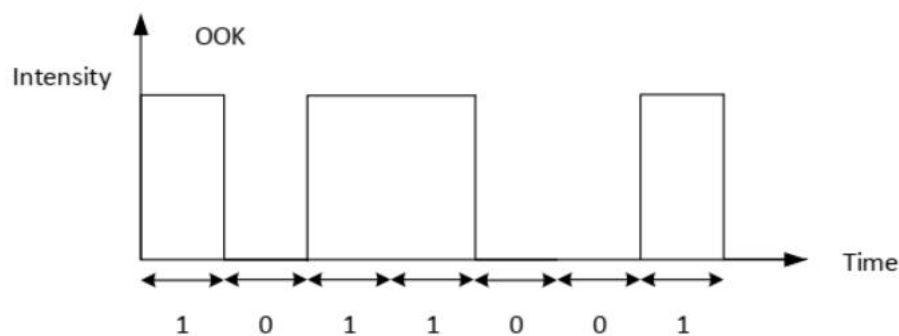


Figure I.8: Modulation OOK [25].

I.4.4.2. Modulation VPPM

La modulation VPPM (Variable Pulse Position Modulation) est une technique de modulation dérivée de la modulation de position d'impulsion (PPM : Pulse Width Modulation), spécialement conçue pour les systèmes de communication par lumière visible (VLC). Dans la modulation PPM, l'information est codée par la position temporelle d'une impulsion. La modulation VPPM, quant à elle, introduit une variation de la largeur de l'impulsion (PWM) en fonction du niveau d'intensité lumineuse (Figure I.9). Il s'agit d'une modulation Manchester OOK à laquelle on applique un rapport cyclique variable. L'utilisation de la modulation VPPM permet de résoudre les problèmes de scintillement souvent rencontrés avec d'autres techniques de modulation. En effet, elle élimine les séquences prolongées de symboles "0" et offre un contrôle précis de l'intensité lumineuse [29].

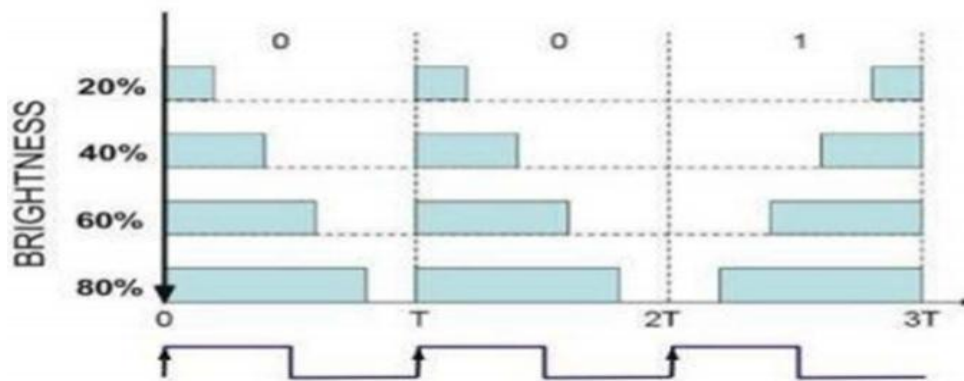


Figure I.9: Modulation VPPM [30].

I.4.4.3. Modulation OFDM

Dans les systèmes de communication à haut débit, la transmission de données est souvent limitée par la bande passante des sources et la présence d'interférences entre les symboles (IES). Pour résoudre ces difficultés, une technique de modulation efficace est l'OFDM (Multiplexage par Répartition Orthogonale de Fréquence). Cette méthode consiste à répartir les données à transmettre sur plusieurs sous-porteuses, créant ainsi un ensemble de canaux parallèles. Chaque sous-porteuse transporte une partie des données, ce qui augmente la durée du symbole associé et réduit considérablement l'impact des IES. De plus, l'OFDM permet une utilisation optimale de la bande passante disponible [16].

I.4.4.4. Modulation CSK

La modulation Color-Shift Keying (CSK) est une technique de modulation spécifiquement conçue pour la communication par lumière visible (VLC), introduite par la norme IEEE 802.15.7 afin de surmonter les limitations de débit des autres modulations. Alors que la production de lumière blanche à partir de LED bleues associées à du phosphore jaune peut induire une commutation lente, une alternative consiste à employer des LED RVB (rouge, vert, bleu) pour générer la lumière blanche. La modulation CSK repose sur l'ajustement de l'intensité des trois couleurs de la source LED RVB et est étroitement liée au diagramme de chromaticité de l'espace colorimétrique.

Contrairement à d'autres méthodes de modulation, les symboles de la modulation CSK sont sélectionnés de manière à maintenir une émission lumineuse constante tout en faisant varier les composantes chromatiques associées à chaque couleur. Cette technique permet de mapper toutes les couleurs perceptibles par l'œil humain sur deux paramètres de chromaticité, généralement désignés par x et y . Le tableau I.2 présente les sept bandes de longueur d'onde visibles par l'œil avec leurs centres représentés sur le diagramme de chromaticité [14] [16].

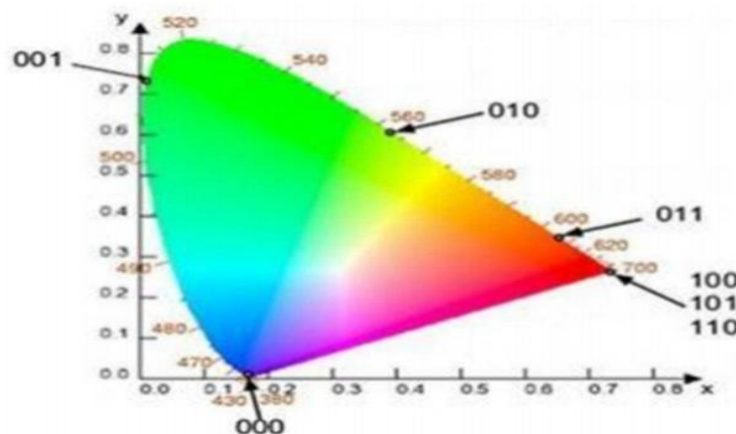


Figure I.10: Modulation CSK [14].

Band (nm)	Code	Centre (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)

Tableau I.2: Modulation CSK [14].

I.4.5. Standards

La norme IEEE 802.15.7 pour la VLC définit une architecture en couches spécialisée. Chaque couche a une fonction dédiée et offre des services à la couche supérieure, avec des connexions logiques entre elles. Les couches réseau et application ne sont pas définies par cette norme. La couche de Contrôle de Liaison Logique (LLC) communique avec la couche d'Accès au Médium (MAC) via la sous-couche de Convergence Spécifique au Service (SSCS). Une Entité de Gestion de Dispositif (DME) accède aux informations du variateur (dimmer) des couches MAC et Physique (PHY) et peut contrôler la sélection des sources lumineuses et des détecteurs par la couche PHY. La couche PHY se connecte au Point d'Accès au Service optique (SAP), qui relie au support de communication optique (émetteurs/récepteurs) [31].

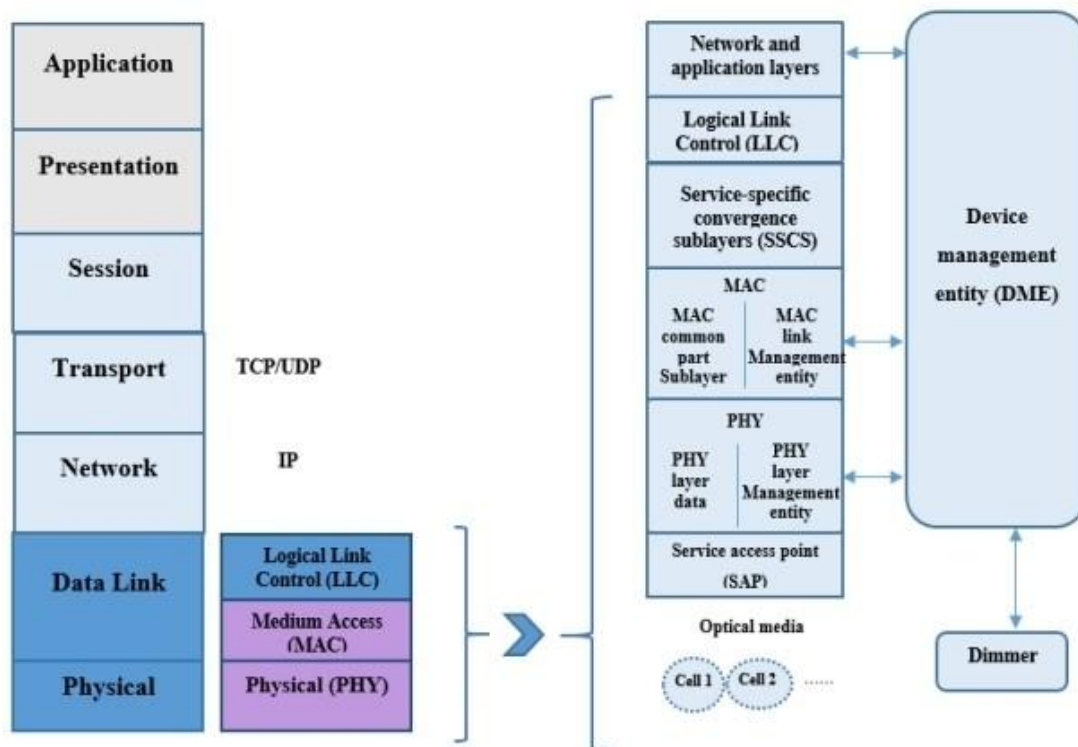


Figure I.11: Architecture de périphérique VLC sous la norme IEEE802.15.7 [31].

I.4.6. Avantages et Inconvénients des systèmes VLC

I.4.6.1 Avantages

➤ Pas d'interférence électromagnétique

Les systèmes de communication par lumière visible (VLC) offrent une solution idéale pour les environnements où les interférences électromagnétiques sont une préoccupation majeure. En utilisant la lumière comme moyen de transmission, ces systèmes évitent les perturbations causées par les ondes électromagnétiques, un avantage crucial dans les lieux sensibles comme les hôpitaux, les centrales nucléaires et les avions [32].

➤ Sécurité sanitaire

La sécurité sanitaire est un aspect important à considérer dans les systèmes de communication. Alors que l'utilisation inappropriée de l'infrarouge (IR) peut entraîner des dommages corporels, tels que des brûlures cutanées ou des lésions rétinienne, la VLC ne présente pas ces risques dans des conditions d'éclairage standard [33].

➤ **Large bande passante**

La lumière visible offre un spectre de fréquences de 430 THz à 790 THz, environ 10 000 fois supérieur à celui des ondes radio qui est de 3 kHz à 300 GHz. Cette différence significative offre un avantage majeur pour les communications optiques, car elle permet de transmettre davantage d'informations et de prendre en charge un nombre croissant d'appareils, contrairement au spectre radio qui est de plus en plus congestionné [31].

➤ **Sécurité de l'information**

La lumière contrairement aux ondes radiofréquences, ne traverse pas les murs. Cette caractéristique fondamentale de la VLC offre une sécurité renforcée contre les écoutes indiscretes. Il suffit de fermer une porte pour confiner les données et garantir leur confidentialité, ce qui rend la VLC particulièrement adaptée aux applications militaires et aux environnements de haute sécurité [34].

I.4.6.2 Inconvénients

➤ **Interférences et bruits provenant d'autres sources lumineuses et Interférences intercellulaires**

Les systèmes de communication par lumière visible (VLC) peuvent être perturbés par d'autres sources lumineuses, qu'elles soient artificielles (non modulées) ou naturelles. Si ces interférences sont suffisamment intenses, elles peuvent saturer le récepteur VLC et affecter son bon fonctionnement [33].

➤ **Mobilité**

Dans les systèmes de communication, la mobilité des utilisateurs représente un défi majeur. Le déplacement ou la rotation des terminaux peut entraîner une perte de connexion. Pour assurer un fonctionnement fiable, il est essentiel de mettre en place des mécanismes de récupération de liaison, d'adaptation du débit et de transfert [35].

➤ **Distorsion par trajets multiples**

Dans les systèmes de communication avec des faisceaux larges, le signal peut emprunter plusieurs chemins entre l'émetteur et le récepteur. Ces différents trajets, de longueurs variables, provoquent des retards dans l'arrivée du signal au récepteur. Cette distorsion, connue sous le nom de trajets multiples, peut entraîner des interférences intersymboles (ISI) qui dégradent les performances du système [35].

I.4.7. Domaines d'application

I.4.7.1. Systèmes VLC Indoor

➤ Localisation indoor

Outre la transmission de données via le Li-Fi, le VLC offre une solution de localisation intérieure très performante. Cette technologie utilise l'intensité du signal lumineux reçu ou le temps de propagation de la lumière pour déterminer la position d'un objet ou d'une personne. Grâce à la technique de triangulation, le VLC peut atteindre une précision de l'ordre du centimètre, surpassant ainsi les autres méthodes de localisation en intérieur. Cette précision est particulièrement utile dans les environnements où le GPS traditionnel ne fonctionne pas, comme à l'intérieur des bâtiments. Le VLC s'avère donc être une alternative ou un complément précieux pour de nombreuses applications nécessitant une localisation précise en intérieur [36].

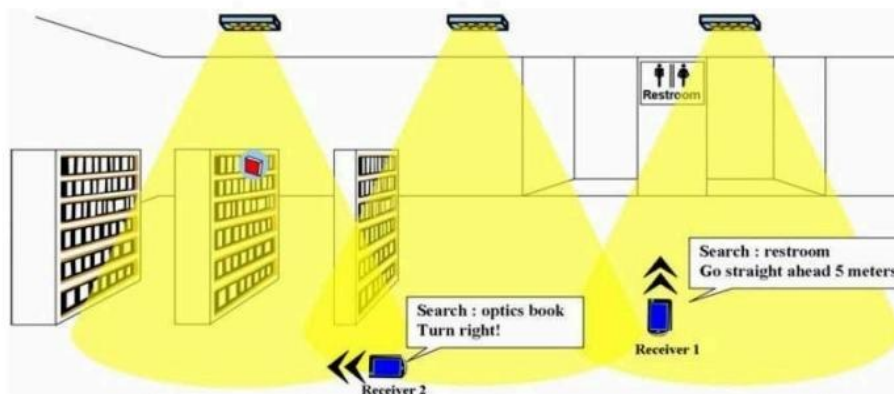


Figure I.12: Utilisation du VLC pour la localisation intérieure [36].

➤ Hôpitaux

Dans les environnements hospitaliers, notamment les zones sensibles aux interférences électromagnétiques comme les salles d'IRM, le recours à la technologie VLC pourrait s'avérer très avantageux. En effet, contrairement aux ondes radio utilisées par d'autres appareils, le VLC n'interfère pas avec les équipements médicaux [14].

➤ Li-Fi

Parmi les applications prometteuses de la VLC, on trouve le Li-Fi (Light Fidelity), ou "Wi-Fi optique", qui offre une connexion internet ultra-rapide. Le Li-Fi est particulièrement adapté aux

espaces où les distances sont courtes, typiquement de quelques mètres, comme entre un plafond et un bureau. Dans ce contexte, le VLC est capable de fournir des débits de plusieurs Gb/s [34].

I.4.7.2. Systèmes VLC Outdoor

➤ Transports intelligents

L'émergence des communications par lumière visible (VLC) en extérieur a été grandement stimulée par l'intérêt de l'industrie automobile pour la communication entre véhicules via leurs phares. Cette idée a donné naissance à trois types d'applications complémentaires, qui s'inscrivent dans le développement des systèmes de transport intelligents (STI) :

- Communication de véhicule à véhicule (V2V) : Permet aux voitures d'échanger des informations directement entre elles.
- Communication de véhicule à infrastructure (V2I) : Permet aux véhicules de communiquer avec les infrastructures routières, telles que les feux de signalisation ou les panneaux d'information.
- Communication d'infrastructure à véhicule (I2V) : Permet aux infrastructures routières de transmettre des informations aux véhicules.

L'objectif principal est de créer un réseau où chaque véhicule peut détecter les obstacles et les dangers environnants, lui permettant de réagir de manière autonome ou d'alerter les autres usagers. Les principaux défis de ces applications sont le bruit optique ambiant élevé, notamment à cause du soleil, les longues distances impliquées et l'impact des conditions météorologiques [16].

➤ Communications sous-marines

Grâce à sa capacité à gérer d'importants volumes de données en milieu aquatique, une performance que les technologies sans fil traditionnelles comme les fréquences radio ne peuvent égaler, le VLC offre la possibilité d'établir des communications efficaces entre plongeurs ou engins sous-marins télécommandés [30].

I.5. CONCLUSION

Ce chapitre a exploré la communication par lumière visible (VLC), une technologie innovante qui vient compléter et enrichir les systèmes de communication sans fil existants. En complément des technologies bien établies comme le Bluetooth et le Wi-Fi, la VLC propose une alternative attrayante en utilisant les infrastructures d'éclairage déjà en place pour transmettre des données. La VLC a été étudiée en détail, de ses racines historiques à ses principes de fonctionnement, son architecture, ses techniques de modulation et ses domaines d'application. Bien que des défis tels que les interférences provenant d'autres sources lumineuses et les

limitations de mobilité existent, la VLC offre des avantages tels qu'une large bande passante, la sécurité et une réduction des interférences électromagnétiques, ce qui la rend adaptée à diverses applications intérieures et extérieures, y compris le Li-Fi, la localisation intérieure et les systèmes de transport intelligents.

Chapitre II

Etude d'un système VLC indoor

II.1. INTRODUCTION

Ce chapitre aborde la conception d'un système Visible Light Communication (VLC) pour un environnement intérieur. Notre objectif est d'analyser théoriquement des paramètres clés tels que la puissance reçue, l'éclairement lumineux, le rapport signal sur bruit (SNR) et la Propagation du retard de canal (RMS). Ces métriques seront évaluées pour plusieurs configurations des sources à diodes électroluminescentes (LED) afin d'identifier un modèle garantissant une transmission stable et des performances homogènes, indépendamment de la position des utilisateurs dans la pièce.

II.2. SYSTEME ETUDIE

Nous avons considéré un système de communication VLC installé à l'intérieur d'une pièce. La pièce est un bureau de dimensions ($X=7$ m ; $Y=5$ m ; $Z=3$ m) équipé des sources LED fixées au plafond à des positions spécifiques (l_x, l_y, l_z). Ces sources émettent de la lumière et sont utilisées à la fois pour l'éclairage et la transmission des données. Le photorécepteur est placé à une hauteur de 0,85 mètre à partir du sol (Figure II.1).

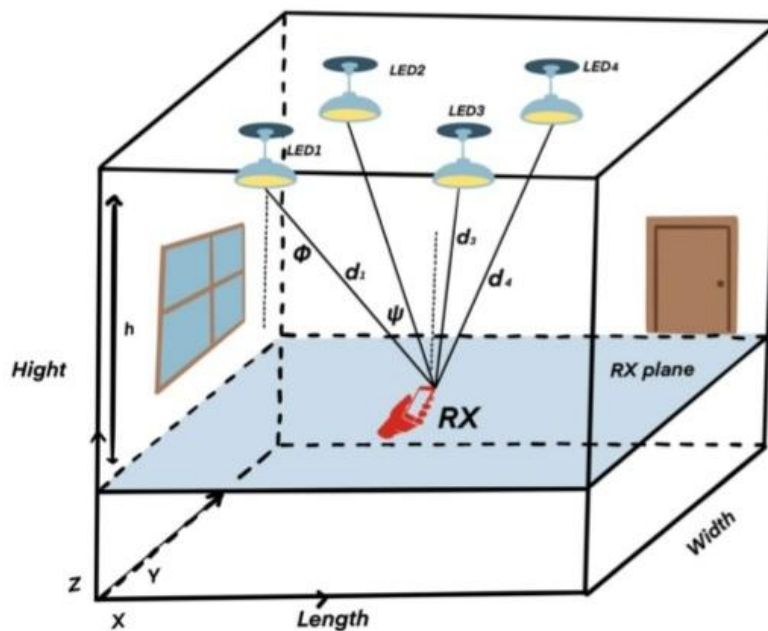


Figure II.1 : Système VLC étudié.

Nous avons étudié quatre configurations différentes de sources à diodes électroluminescentes (LED), illustrées par la figure II.2. Celles-ci comprennent :

- Le modèle (a) avec une unique source à LED positionnée au centre de la pièce.
- Le modèle (b) comportant quatre sources à LED réparties aux quatre coins formant un carré.
- Le modèle (c) utilisant également quatre sources à LED mais disposées dans la pièce selon une forme de losange.
- Le modèle (d) avec six sources à LED disposées dans la pièce selon une forme d'un rectangle.

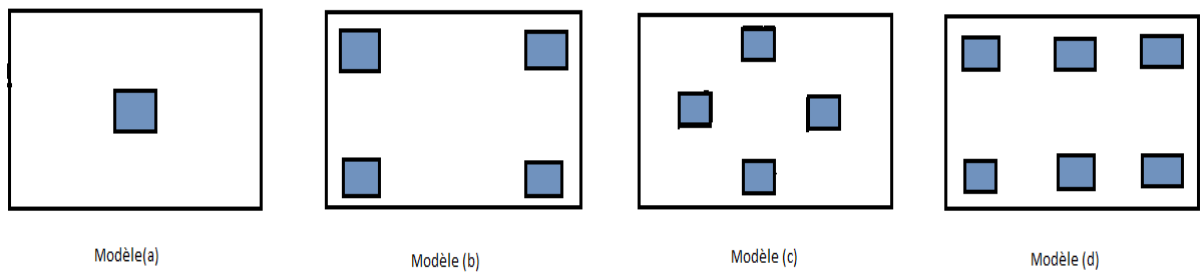


Figure II.2: Arrangements des sources à LED pour les quatre modèles.

Modèle (a)	Modèle (b)	Modèle (c)	Modèle (d)
$(0 \quad 0 \quad lz/2)$	$(-2.1 \quad -1.5 \quad lz/2)$ $(2.1 \quad -1.5 \quad lz/2)$ $(2.1 \quad 1.5 \quad lz/2)$ $(-2.1 \quad 1.5 \quad lz/2)$	$(0 \quad -1.5 \quad lz/2)$ $(2.1 \quad 0 \quad lz/2)$ $(0 \quad 1.5 \quad lz/2)$ $(-2.1 \quad 0 \quad lz/2)$	$(-2.5 \quad -1.2 \quad lz/2)$ $(2.5 \quad -1.2 \quad lz/2)$ $(-2.5 \quad 1.2 \quad lz/2)$ $(2.5 \quad 1.2 \quad lz/2)$ $(0 \quad -1.2 \quad lz/2)$ $(0 \quad 1.2 \quad lz/2)$

Tableau II.1: Position des émetteurs

Pour chacun des modèles (a), (b), (c) et (d) nous avons examiné l'illuminance, la puissance reçue, le rapport signal sur bruit (SNR) et la propagation du retard de canal (RMS). L'étude a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB.

II.3. ILLUMINANCE

Pour avoir un intérieur confortable et pratique, il faut bien choisir son éclairage. La luminosité doit être adaptée à l'usage qui est fait de la pièce, par exemple un travail précis demande plus de lumière. Il est également important que la lumière soit bien répartie pour éviter les zones trop sombres ou trop éclairées, qui fatiguent les yeux. Seuls certains espaces, comme les musées, peuvent jouer sur les contrastes pour créer une ambiance. La quantité de lumière, mesurée en lux, dépend surtout de l'illuminance horizontal qui est un élément important pour évaluer si l'éclairage est bon, l'illuminance est donné par la formule suivante [37] :

$$I_{\text{hor}} = I(0) \cos^m(\phi) / d^2 \cos(\psi)$$

Où $I(0)$ est l'intensité lumineuse centrale, ϕ est l'angle d'éclairement par rapport à l'axe normal à la surface de l'émetteur, d est la distance entre la LED et le récepteur, ψ est l'angle d'incidence et m est l'ordre de lambertien qui dépende de l'angle de demi-puissance de la LED donné par la formule suivante [37] :

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})}$$

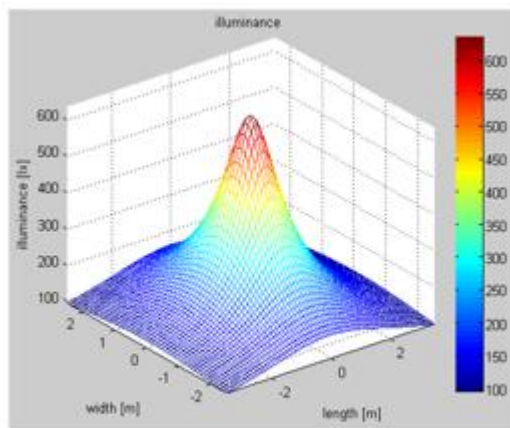
L'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) préconise un niveau d'éclairement de 300 à 1500 lux pour un bureau de travail, ce qui est jugé comme un éclairage optimal.

La distribution de l'illuminance est tracée en utilisant les paramètres présentés dans le tableau (II.2). La figure II.3 illustre la distribution de l'illuminance pour les quatre modèles. L'analyse des résultats met en évidence des écarts notables entre les différents modèles d'éclairage. Le modèle (d) se révèle être la solution la plus performante, affichant une luminance moyenne de 1039,8 lux avec des extrêmes bien équilibrés (660,8-1368,1 lux), ce qui correspond parfaitement aux exigences d'un éclairage de bureau conforme aux normes ISO. Les modèles (b) et (c), bien que satisfaisants, présentent des performances légèrement inférieures, avec des moyennes respectives de 671,3 lux et 730,9 lux. Quant au modèle (a), ses résultats (moyenne : 199,7 lux,

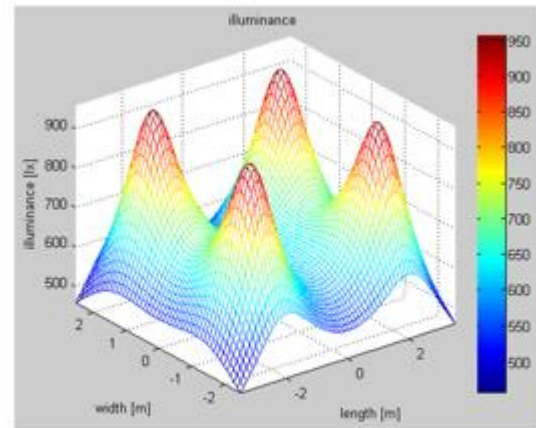
minimum : 95,8 lux) le situent en dessous des standards requis, révélant une inadéquation pour un usage professionnel. Ces observations démontrent clairement que la configuration optimale du système VLC, incarnée par le modèle (d), est essentielle pour garantir à la fois une intensité lumineuse adéquate et une répartition homogène de la lumière dans l'espace de travail.

Paramètres	Valeurs
Dimension de la pièce	7×5×3
Nombre des LED	900 (30×30)
Intensité lumineuse au centre de LED	625 (lx)
FOV (Field of View)	70°
Angle à mi puissance ($\phi_{1/2}$)	70°

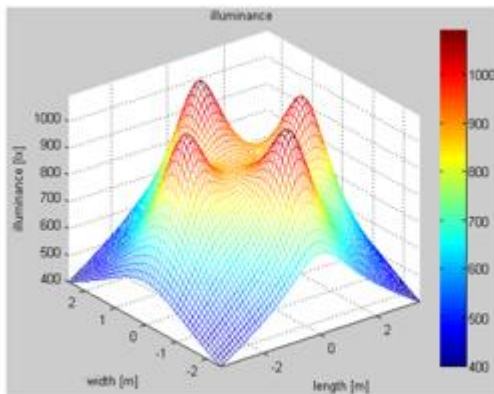
Tableau II.2 : Paramètres utilisés pour tracer la distribution de l'illuminance.



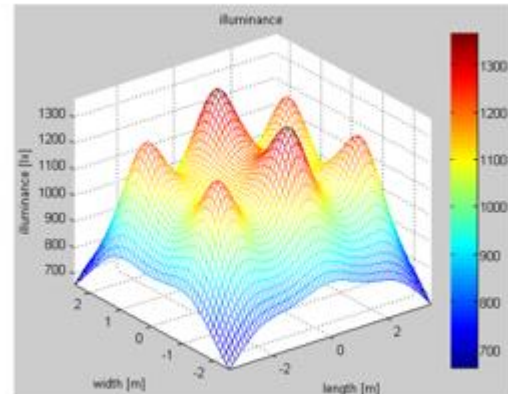
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II.3: Distribution de l'illuminance pour les modèles (a), (b), (c) et (d).

	Modèle (a)	Modèle (b)	Modèle (c)	Modèle (d)
I_hor_max	637.1347	956.0556	1090.6	1368.1
I_hor_min	95.7854	456.7851	399.8762	660.8044
Moyenne	199.7272	671.3007	730.9754	1039.8

Tableau II.3 : Valeurs de l'illuminance pour les modèles (a), (b), (c) et (d).

II.4. PUISSANCE REÇUE

Dans les systèmes VLC, la manière dont la lumière est émise par une diode électroluminescente (LED) suit généralement un schéma prévisible, appelé rayonnement lambertien. La quantité de lumière captée par le récepteur, appelée puissance optique reçue (P_r) peut être estimée en fonction de la quantité de lumière émise par la LED (puissance optique transmise P_t) par la formule suivante [37]:

$$P_r = \sum_{LEDs} P_t \cdot H(0)_{LOS}$$

$H(0)_{LOS}$ est le gain du canal LoS (liaison en visibilité directe) c'est-à-dire lorsque la lumière se propage directement de la LED au récepteur. Ce facteur est exprimé avec la formule suivante [38] :

$$H_{Los} = \begin{cases} \frac{A_r(m+1) \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi)}{2\pi d^2} & 0 \leq \psi \leq \psi_c (FOV) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

Où A_r représente la surface de la photodiode (PD), d est la distance entre la LED et le récepteur, ϕ est l'angle d'irradiance, ψ est l'angle d'incidence, $T_s(\psi)$ est le gain du filtre optique, ψ_c est le FOV (Field of view) le champ de vision qui est l'angle maximal auquel le récepteur recevra et détectera efficacement les signaux lumineux, $g(\psi)$ est le gain du concentrateur optique. Il donné par la formule suivante :

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\psi_c)} & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases}$$

La distribution de la puissance reçue est tracée en utilisant les paramètres présentés dans le tableau (II.4). La figure (II.4) illustre la puissance reçue pour les quatre modèles. Le modèle (a) présente une puissance reçue maximale de seulement 0.0888 mW et une puissance minimale très basse de 0.0106 mW, résultant en une moyenne de 0.0358 mW, ce qui indique une faible réception. Le modèle (b) améliore significativement ces valeurs avec un maximum de 0.1315 mW et un minimum de 0.0664 mW, portant la moyenne à 0.1095 mW. Le modèle (c) atteint une puissance maximale de 0.1785 mW, mais sa puissance minimale est plus faible que celle du modèle (b) à 0.0493 mW, avec une moyenne de 0.1251 mW. Enfin, le modèle (d) se distingue avec la puissance maximale la plus élevée de 0.2215 mW et la puissance minimale la plus haute de 0.0915 mW, ce qui se traduit par la meilleure moyenne de 0.1730 mW, suggérant une réception supérieure et plus stable.

Paramètres	Valeurs
Dimension de la pièce	7×5×3
Nombre des LED	900 (30×30)
Center de lumineuse intensité	625 (lx)
Champ de vision (FOV)	70°
Angle à mi puissance ($\phi_{1/2}$)	70°
Surface de détection (A)	1(cm^2)
Indice de réflectivité	1.5
Gain de filtre optique	1
Puissance émise	20(mW)

Tableau II.4 : Paramètres utilisés pour tracer la distribution de la puissance reçue.

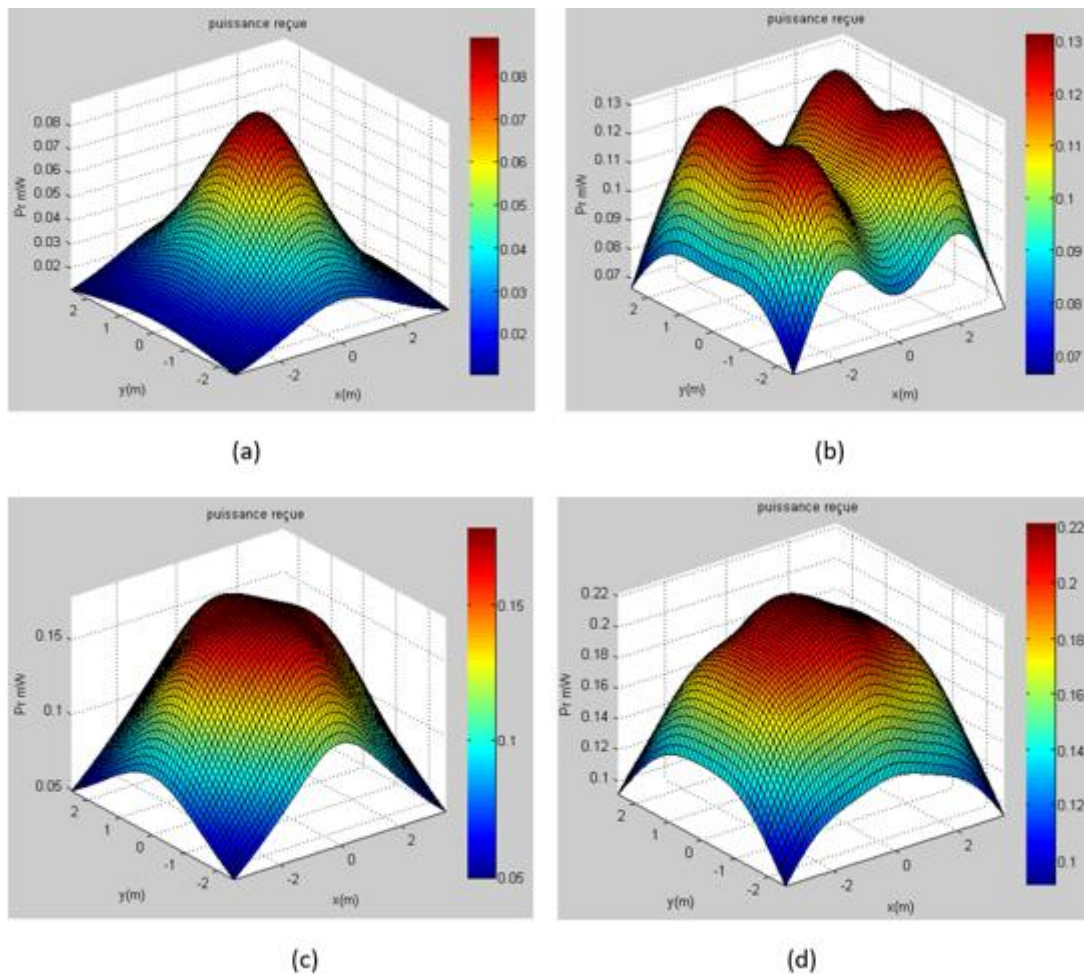


Figure II.4 : Distribution de la puissance reçue pour les modèles (a), (b), (c) et (d).

	Modèle (a)	Modèle (b)	Modèle (c)	Modèle (d)
P_rec_max	0.0888	0.1315	0.1785	0.2215
P_rec_min	0.0106	0.0664	0.0493	0.0915
Moyenne	0.0358	0.1095	0.1251	0.1730

Tableau II.5 : Valeurs de la puissance reçue pour les modèles (a), (b), (c) et (d).

II.5 RAPPORT DE SIGNAL SUR BRUIT (SNR)

Le rapport signal / bruit (SNR - Signal-to-Noise Ratio) est le rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit. C'est un paramètre très important qui influence directement la qualité et la fiabilité de la transmission.

Afin de quantifier l'impact du bruit optique et thermique sur les performances des quatre modèles, le SNR a été déterminé selon l'expression suivante [37] :

$$SNR = \frac{(RP)^2}{N}$$

Où R est la sensibilité du récepteur

avec:

$$N = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2$$

et:

$$\sigma_{shot}^2 = 2_q (P_{r;tx} + P_{r;bg}) R_{pd} B$$

Où $P_{r;tx}$ désigne la puissance optique reçue à partir des émetteurs, $P_{r;bg}$ désigne la puissance reçue de la lumière ambiante, et B est la largeur de bande de bruit qui est déterminée par la largeur de bande de modulation du signal, ou la largeur de bande du récepteur qui a été utilisée.

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi k T_e}{G_{ol}} C_{pd} A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_e \Gamma}{g_m} C_{pd}^2 A^2 I_3 B^3$$

Où B est la bande passante du filtre électrique, g_m est la transconductance FET, k est la constante de Boltzmann, C_{pd} est la capacité fixe du photodétecteur par unité de surface, T_e est la température absolue, G_{ol} est le gain de tension en boucle ouverte, Γ est le Facteur de bruit du canal FET, A est la surface du photodétecteur et $I_2 = 0,562$ et $I_3 = 0,0868$ sont les facteurs de bande passante du bruit [37].

La distribution du SNR est tracée en utilisant les paramètres présentés dans le tableau (II.6). La figure (II.5) illustre le SNR obtenu pour les quatre modèles. Le modèle (a) présente un SNR maximale de seulement 45,03 dB, minimal de 19,75 dB, et une moyenne de 32,67 dB. Les modèle (b) et (c) montrent une amélioration significative, avec des moyennes respectives de 44.16 dB et 44.87 dB, ce qui les place sur un pied d'égalité en termes de qualité de signal global. Toutefois, le modèle (c) a un maximum de 49,04 dB, supérieur à celui du modèle (b) (46,86 dB), ce qui suggère une meilleure performance. Les performances du modèle (d) sont encore meilleures, avec un SNR maximal de 50,49 dB, minimal de 40,95 dB, et une moyenne de 47,99 dB.

Un SNR élevé indique une meilleure qualité de transmission et une plus grande fiabilité de la communication. Dans notre étude, le modèle (d) est clairement le meilleur parmi les quatre, offrant les performances les plus élevées en termes du SNR.

Parameters	Valeurs
Dimension de la pièce	$7 \times 5 \times 3 \text{ (m}^3\text{)}$
Nombre des LED	900(30×30)
Puissance émise	20 (mW)
Champ de vision (FOV)	70°
Angle à mi puissance ($\phi_{1/2}$)	70°
Hauteur de récepteur	0.85 (m)
Position de récepteur	(x, y, -lz/2)
Sensibilité de photodiode (R)	0.8 (A/W)
Coeff pour le bruit thermique (I2)	0.52
Coeff pour le bruit en haute fréquence (I3)	0.0868
Débit (B)	60 (Mb/s)
Surface de détection (A)	$1 \text{ (cm}^2\text{)}$
Facteur de bruit de canal (T)	1.5
Gain de filtre optique	1
Température (Tk)	298 (K)
FET transconductance (Gm)	30 (ms)
Courant de base de récepteur (Ib)	5100 (uA)
La charge d'électron (q)	1.6×10^{-19}
Constante de Boltzmann (k)	$1.38064852 \cdot e^{-23}$
Le gain de voltage de la boucle ouvert (G_ol)	10

Tableau II.6 : Paramètres utilisés pour tracer la distribution du SNR.

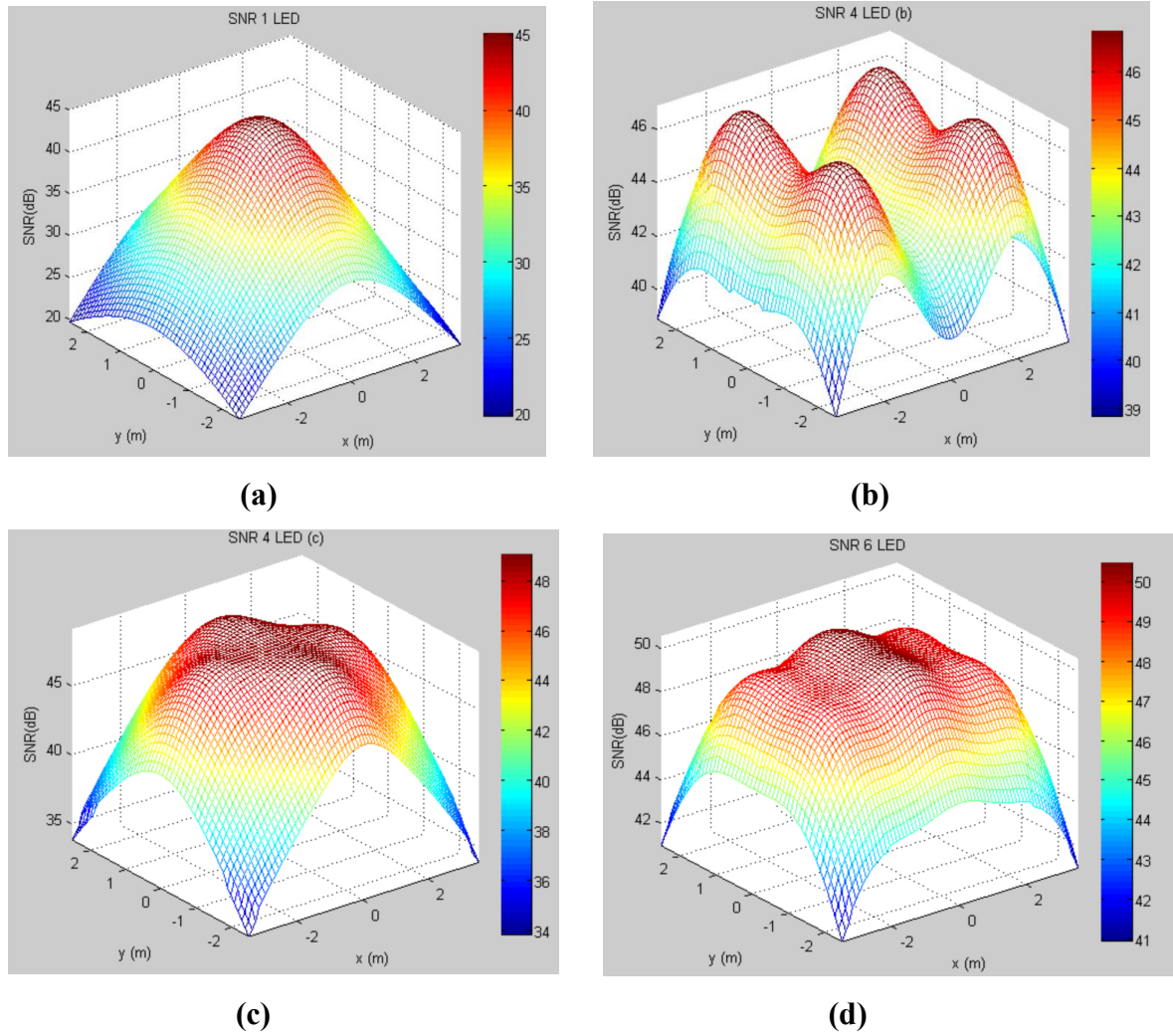


Figure II.5 : Distribution du SNR pour les Modèles (a), (b), (c) et (d).

	Modèle (a)	Modèle (b)	Modèle (c)	Modèle (d)
Minimum SNR (dB)	19.7559	38.8490	33.7784	40.9552
Maximum SNR (dB)	45.0340	46.8622	49.0417	50.4912
Moyenne SNR (dB)	32.6728	44.1607	44.8732	47.9912

Tableau II.7: Valeurs du SNR pour les Modèles (a), (b), (c) et (d).

II.6. PROPAGATION DU RETARD DE CANAL (RMS)

L'étalement du retard RMS (Root Mean Square) est une mesure de la richesse en trajets multiples d'un canal de communication. En général, cela peut être interprété comme la différence

entre l'heure d'arrivée du premier composant à trajets multiples important (généralement le composant de visibilité directe) et l'heure d'arrivée des derniers composants à trajets multiples. La propagation du retard RMS peut être calculée par [37] :

$$D_{RMS} = \sqrt{\mu^2 - (\mu)^2}$$

Avec :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i}}{P_T}$$

$$\mu^2 = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i}^2}{P_T}$$

Où μ est la moyenne des retards de propagation pondérée par la puissance reçue de chaque trajet, et μ^2 est la moyenne des carrés des retards, toujours pondérée par la puissance reçue. Avec M : nombre de trajets (ou composantes du canal), $P_{d,i}$: puissance reçue du i -ème trajet, $t_{d,i}$: retard associé au i -ème trajet, P_T : puissance totale reçue.

La distribution du retard RMS est tracée en utilisant les paramètres présentés dans le tableau (II.8). La figure (II.6) illustre la distribution de retard RMS. Le modèle (a) affiche une valeur maximale de 255.4995 ns et une valeur moyenne de 121.7191 ns. Le modèle (b) présente une valeur maximale de 125.2962 ns et une valeur moyenne de 77.7413 ns. Quant au modèle (c), la valeur maximale est 160.9945 ns et la valeur moyenne est 82.1748 ns. Enfin, le modèle (d) se distingue avec une valeur maximale de 85.8021 ns et une valeur moyenne de 53.0264 ns. Ces résultats montrent que le modèle (d) offre les meilleures performances avec le plus faible délai RMS moyen (53.0264 ns). Le modèle (a) est le moins performant, caractérisé par des délais élevés et une variabilité importante. Bien que les modèles (b) et (c) présentent des améliorations significatives par rapport au modèle (a), leurs performances restent inférieures à celles du modèle (d).

Paramètres	Valeurs
Dimension de la pièce	$(7 \times 5 \times 3 \text{ (m}^3\text{)})$
Nombre des LED	900 (30×30)
Puissance émise	20 (mW)
Champ de vision (FOV)	70°
Angle à mi puissance ($\phi_{1/2}$)	70°
Surface de détection (A)	$1 \text{ (cm}^2\text{)}$
Indice de réflectivité	1.5
Gain de filtre optique	1
Vitesse de lumière	$3 \cdot 10^8$

Tableau II.8 : Paramètres utilisés pour tracer la distribution du RMS-Delay

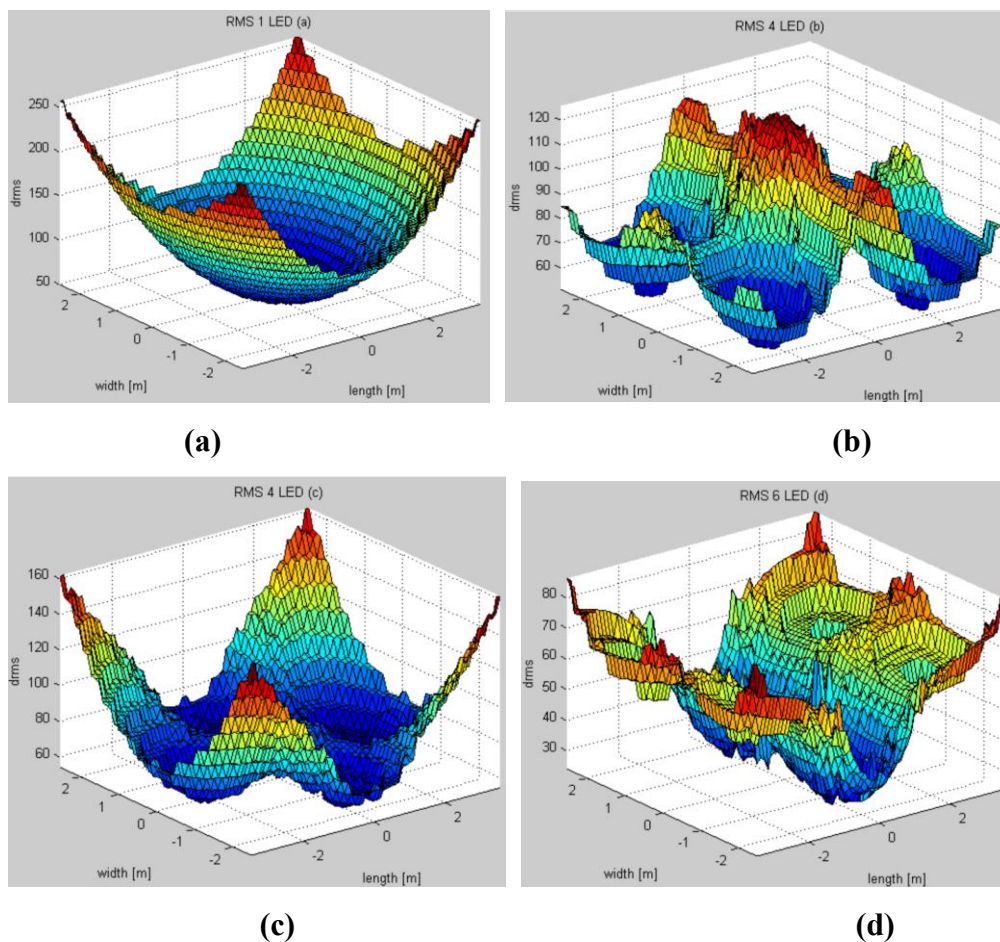


Figure II.6 : Distribution du RMS-Delay pour les modèles (a), (b), (c) et (d).

	Modèle (a)	Modèle (b)	Modèle (c)	Modèle (d)
Minimum RMS Delay (ns)	48.4974	50.9401	53.6993	23.7981
Maximum RMS Delay (ns)	255.4995	125.2962	160.9945	85.8021
Moyenne RMS Delay (ns)	121.7191	77.7413	82.1748	53.0264

Tableau II.9: Valeurs du RMS pour les modèles (a), (b), (c) et (d).

Dans une étude précédente [39], les performances des modèles (a), (b) et (c) ont été évaluées dans une pièce de 5x5x3 mètres. Les résultats de cette étude avaient désigné le modèle (c) comme le plus performant. Notre travail actuel introduit un nouveau modèle, le modèle (d), qui utilise six sources à LED. L'évaluation des modèles a été menée dans une chambre de dimensions différentes, soit 7x5x3 mètres. Les résultats obtenus démontrent clairement que le modèle (d) surpasse les autres modèles.

II.7. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté une analyse détaillée des performances d'un système VLC en environnement intérieur. Plusieurs configurations de sources à LED ont été proposées. Les résultats obtenus montrent clairement que le modèle avec six sources à LED offre les meilleures performances globales en termes d'éclairage, de puissance reçue, de qualité du signal (SNR) et de stabilité temporelle (RMS-delay). L'étude menée confirme que la qualité et la stabilité de la transmission dépendent fortement de la disposition des LEDs et de leur nombre. Ceci souligne l'importance d'une architecture bien optimisée pour assurer une communication fiable et homogène dans un espace couvert.

Chapitre III

Réalisation d'un système VLC

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons construire un système VLC permettant de transmettre un message texte en utilisant un signal lumineux. Dans un premier temps, nous présenterons le matériel et les composants essentiels à la réalisation de ce système. Nous mettrons particulièrement l'accent sur la carte Arduino Nano, la LED, et la photodiode. Par la suite, nous exposerons les différentes étapes de l'implémentation de ce système, ainsi que son principe de fonctionnement.

III.2. MATERIEL ET COMPOSANTS UTILISES

III.2.1. Carte Arduino

Arduino est une plateforme open-source de prototypage électronique, reposant sur une carte à microcontrôleur programmable et un environnement de développement (IDE) permettant d'écrire, compiler et transférer du code vers le matériel. Contrairement à un ordinateur classique, Arduino interagit directement avec son environnement physique, ce qui en fait un outil idéal pour créer des systèmes interactifs. Il peut lire des signaux provenant de capteurs ou d'interrupteurs, puis piloter divers actionneurs (moteurs, LEDs, etc.). Les projets Arduino fonctionnent de manière autonome ou en liaison avec un logiciel installé sur un PC. Le système Arduino a plusieurs fonctionnalités :

- Communication USB pour l'échange de données avec un ordinateur.
- Moniteur série permettant d'afficher des messages et des valeurs en temps réel, facilitant le débogage.
- Traitement numérique (entiers, nombres flottants) et fonctions mathématiques intégrées.
- Gestion optimisée des chaînes de caractères pour une programmation plus intuitive.
- Connexion à des modules externes (capteurs, écrans, etc.) via différents protocoles.
- Convertisseur analogique-numérique (CAN) multi-canaux, adapté à divers capteurs analogiques.
- Prise en charge des interruptions pour une exécution réactive des tâches critiques [40].

✓ Gammes de la carte Arduino

La gamme Arduino comprend actuellement plus d'une vingtaine de versions différentes, nous allons mentionner quelques-unes :

- Le NG d'Arduino, avec une interface USB et un microcontrôleur ATmega8.

- L'Arduino Nano, une petite carte avec une interface USB et un microcontrôleur ATmega168 (ATmega328 pour la nouvelle version).
- Le LilyPad Arduino, avec un microcontrôleur ATmega168. Il est conçu spécifiquement pour les projets e-textiles et les objets connectés portables ("wearables").
- Le NG d'Arduino plus, avec une interface USB et un ATmega168.
- L'Arduino Bluetooth, avec une interface Bluetooth et un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Diecimila, avec une interface USB et un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Duemilanove ("2009") avec un microcontrôleur l'ATmega168 (ATmega328 pour la nouvelle version).
- L'Arduino Mega 1280, qui utilise un microcontrôleur ATmega1280.
- L'Arduino UNO, avec un microcontrôleur ATmega328.
- L'Arduino Mega 2560, avec un microcontrôleur ATmega2560, et une mémoire flash de 256 KB. Il intègre le ATmega8U2, ou le ATmega16U2 dans sa révision 3.
- L'Arduino Leonardo, avec un microcontrôleur ATmega32U4. Il élimine le besoin de raccordement d'USB et peut être employé comme clavier [41].

Dans notre système, nous utiliserons la carte Arduino Nano.

✓ **Arduino NANO**

L'Arduino Nano, une carte plus spécialisée que les modèles Uno et Mega, est particulièrement appréciée pour sa taille miniature. Cette caractéristique la rend idéale pour les projets compacts, tout en garantissant une faible consommation d'énergie, un aspect essentiel pour les objets intelligents et portables.

Sur le plan technique, la Nano offre 14 ports d'entrée/sortie numériques, dont six peuvent être utilisés pour la modulation en largeur d'impulsion (PWM). Elle dispose également de 8 broches d'entrée analogiques, d'un connecteur mini-USB distinct du port USB classique, d'un port ICSP et d'un bouton de réinitialisation [42].



Figure III.1 : Arduino Nano [43].

✓ Structure générale du programme (Arduino IDE)

Le logiciel Arduino se présente comme un environnement de développement intégré (IDE) spécialement développé pour le langage et la programmation des cartes Arduino. Son interface graphique est structurée comme suite :

- Une barre de menus classique.
- Une barre de boutons permettant un accès direct aux fonctionnalités essentielles pour une prise en main facile.
- Un éditeur de code avec coloration syntaxique et navigation par onglets pour la rédaction des programmes.
- Une zone de messages fournissant des informations sur l'état des actions en cours.

Une console texte qui affiche les messages relatifs au succès ou aux erreurs de la compilation du code [40].

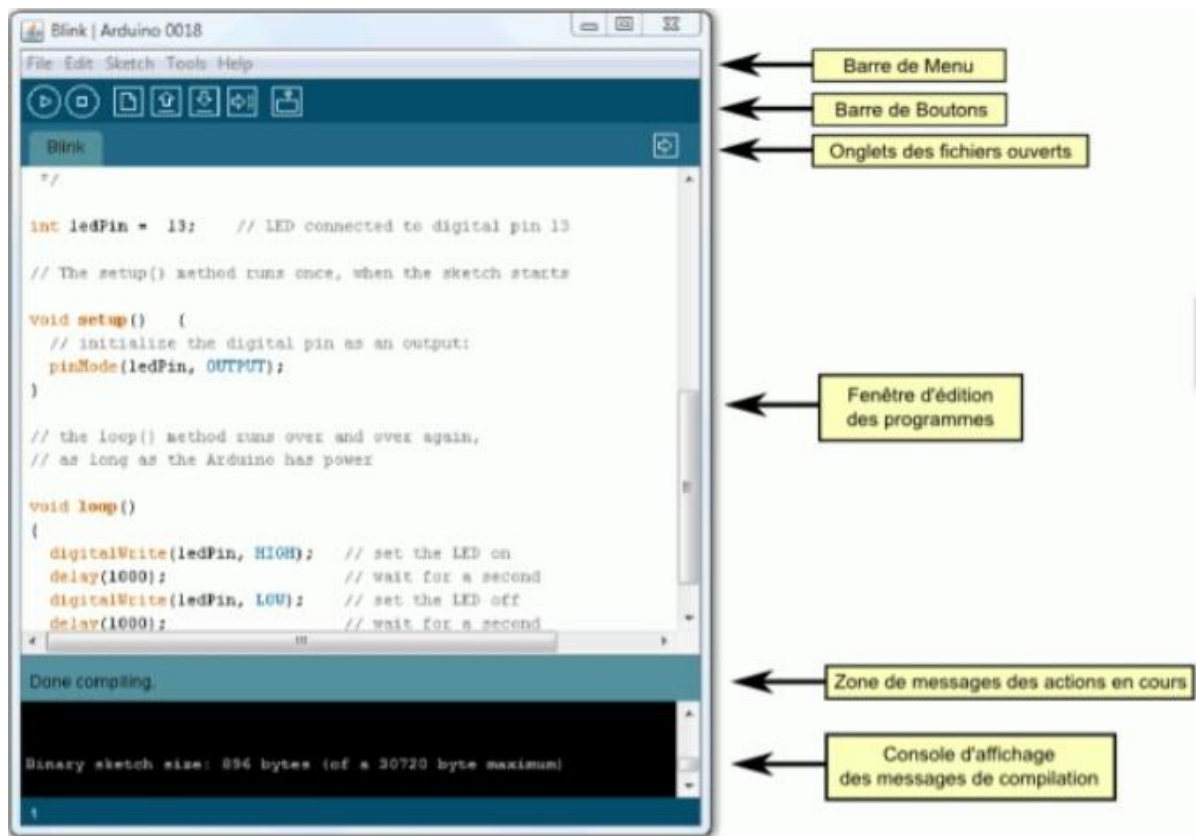


Figure III.2 : Présentation de l'IDE [40].

III.2.2. LED

LED signifie Light Emitting Diode ou diode électroluminescente (DEL). Une LED est un semi-conducteur (diode) qui émet de la lumière quand du courant le traverse. Les matériaux semi-conducteurs que les LED utilisent transforment l'énergie électrique en un rayonnement électromagnétique visible, c'est-à-dire en lumière [44].



Figure III.3 : LED RGB.

Caractéristiques :

- Couleur : Rouge, verte, bleue.
- Intensité lumineuse 10000 mcd.
- Diamètre LED : 5 mm
- Courant direct typique : Environ 20 mA pour une LED standard.
- Tension de fonctionnement : Entre 1.8V et 3.3V.
- Angle de vision : Entre 20° et 120°.

III.2.3. Photodiode BPW34

Le BPW34 est une photodiode PIN rapide et très sensible, dans un boîtier plastique miniature et plat. Grâce à son époxy transparent, le composant est sensible aux rayonnements visibles et infrarouges. Sa grande surface active, associée à son boîtier plat, offre une sensibilité élevée avec un large angle de vision [45].



Figure III.4: Photodiode BPW34.

Caractéristiques :

- Grande surface photosensible : $A = 7,5 \text{ mm}^2$.
- Large angle de demi-sensibilité : $\phi = \pm 65^\circ$.
- Haute sensibilité lumineuse.
- Temps de réponse rapides.
- Faible capacité de jonction.
- Adapté aux rayonnements visibles et proche infrarouge.

III.3. REALISATION DU SYSTEME

L'objectif de cette section est la réalisation d'un système VLC simple, spécifiquement conçu pour transmettre un message texte (« hello ») via un signal lumineux. Ce système est développé en utilisant une carte Arduino Nano, une LED (pour l'émission), une photodiode (pour la réception) et des résistances.

Le système VLC réalisé se compose d'un circuit d'émission et d'un circuit de réception. Chacun de ces circuits a fait l'objet d'une optimisation, à travers une série de tests, afin de garantir une transmission des données fiable. Ce système est présenté sur la figure III.5.

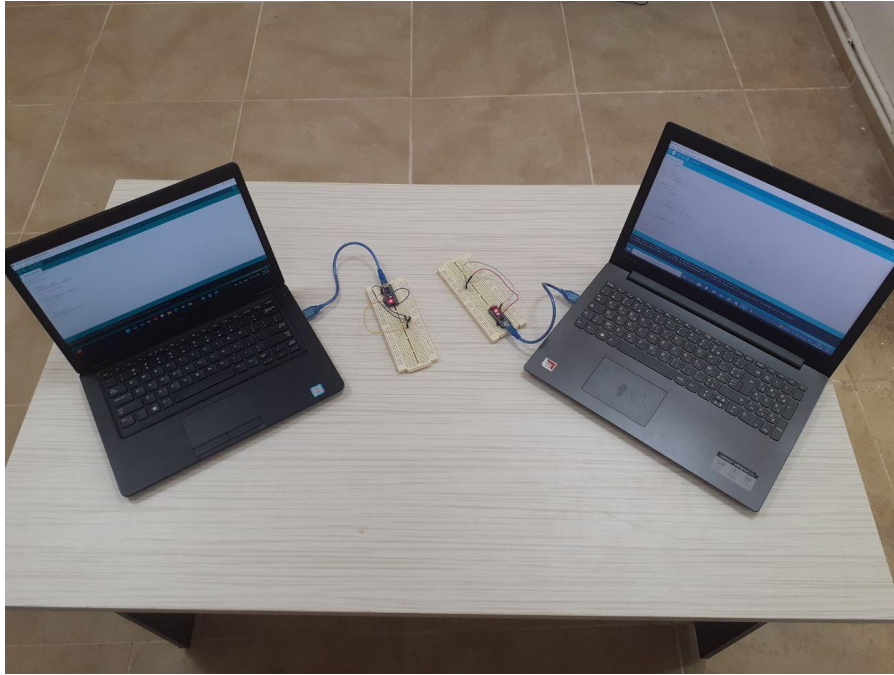


Figure III.5 : Système de la communication par VLC réalisé.

III.3.1. Réalisation de l'émetteur

Le circuit d'émission est réalisé sur une plaque d'essai (Figure III.6). Au cœur des dispositifs se trouve une carte Arduino Nano qui assume le rôle de centre de contrôle. La transmission de l'information s'opère par l'intermédiaire d'une LED. Cette LED, qui possède la capacité d'émettre une gamme de couleurs, est connectée à la carte Arduino par des fils de connexion. Une résistance est insérée en série afin de protéger la LED.

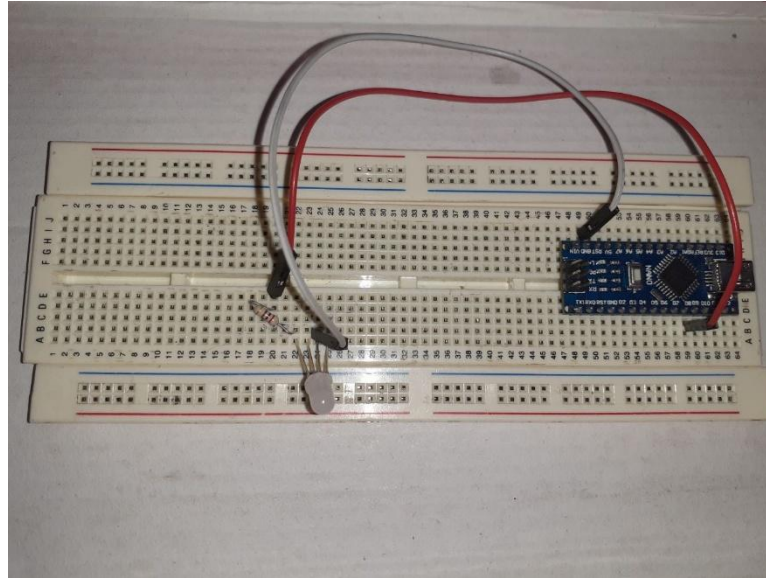


Figure III.6 : Circuit d'émission.

La carte Arduino Nano est alimentée et programmée via le port USB d'un PC (Figure III.5). Pour ce faire, il est nécessaire de sélectionner le port COM (par exemple, COM8) dans l'IDE Arduino. La LED est associée à une broche numérique de l'Arduino (par exemple, la broche D9), suivie de la résistance, puis connectée à la masse GND.

Le protocole de transmission implique l'envoi d'un bit START (niveau HIGH), suivi des 8 bits de données (LSB first) et d'un bit de STOP (niveau LOW). Les délais entre les bits sont contrôlés précisément pour assurer une communication fiable. Lorsqu'un message comme "hello" est envoyé depuis le PC via le port série, chaque caractère est converti en signal lumineux selon un protocole précis : un bit START (1 ms de lumière), suivi des 8 bits de données (2 ms par bit, où 1 = LED allumée et 0 = LED éteinte), et enfin un bit STOP (10 ms d'obscurité). Par exemple, pour le caractère 'h' (01101000 en binaire), la LED s'allume et s'éteint selon le motif 0-0-0-1-0-1-1-0 après le bit START.

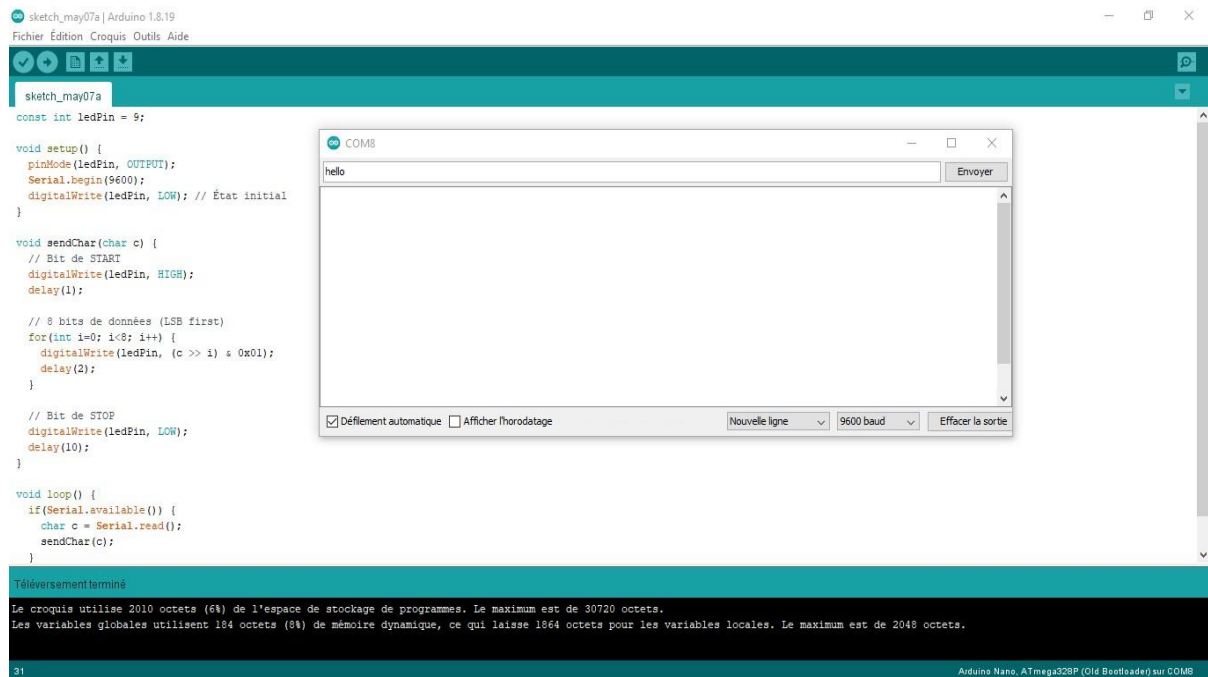


Figure III.7 : Code pour l'émetteur.

III.3.2. Réalisation du récepteur

Le circuit réception est réalisé sur une plaque d'essai (Figure III.8). Une photodiode BPW34 est positionnée pour capter la lumière transmise. Cette dernière est connectée à une résistance, formant ainsi un montage de conversion courant-tension. Cette conversion permet de transformer le signal optique reçu en un signal électrique exploitable. La carte Arduino Nano, fixée sur la plaque, reçoit ce signal converti via l'une de ses entrées analogiques pour l'analyser ou le décoder. Ce montage permet ainsi de recevoir et de traiter les informations transmises par la lumière.

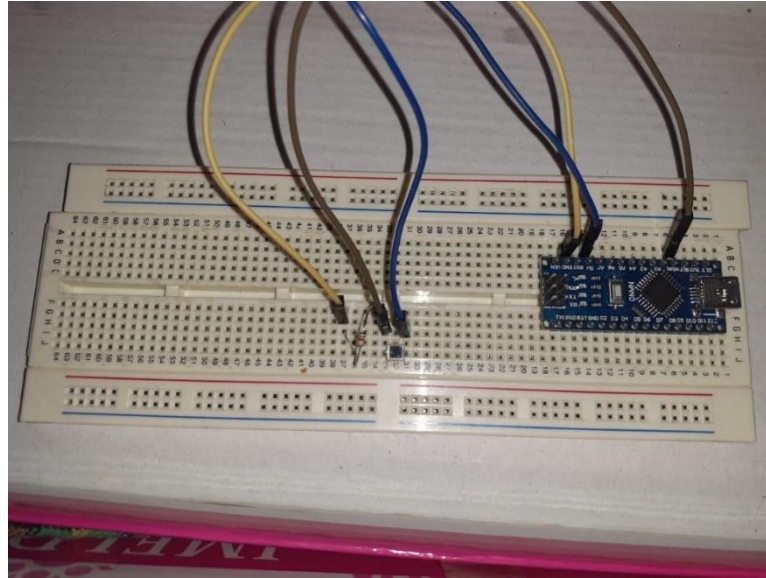


Figure III.8 : Circuit de réception.

Dans la partie réception du système VLC, une autre carte Arduino Nano est utilisée. Cette dernière est alimentée et programmée via le port USB d'un deuxième PC (Figure III.5), avec une communication série pour correspondre à la configuration de l'émetteur.

La procédure de branchement implique la connexion d'une broche de la photodiode au +5V et l'autre à l'entrée analogique A0, ainsi qu'à la masse par l'intermédiaire d'une résistance de 10 k Ω (Figure III.8).

Dans l'IDE Arduino, pour une lecture optimale des données reçues, il est impératif de sélectionner le port COM9. Il est également crucial de configurer le moniteur série : activation de l'autoscroll, affichage du timestamp, et réglage du paramètre sur «Newline». Ces réglages garantiront une meilleure lisibilité des données reçues.

Le code du récepteur est conçu pour fonctionner en plusieurs étapes. Tout d'abord, il recherche le bit START en surveillant le signal analogique : dès qu'il dépasse un seuil de 124, la détection est confirmée. Une fois le bit START identifié, le récepteur procède à la lecture des 8 bits de données. Cette lecture se fait par échantillonnage au milieu de chaque période de bit, selon des délais préétablis : 1 milliseconde après le bit START pour le premier échantillon, puis 2 millisecondes pour chaque bit suivant.

Les bits ainsi lus sont ensuite assemblés pour reconstituer un caractère. Cela est réalisé via une opération de décalage binaire (représentée par l'expression : $c \mid= (1 \ll i)$) qui place chaque bit à sa position correcte. Si le système fonctionne correctement, le message transmis (dans cet exemple, "hello") s'affiche sur le moniteur série.

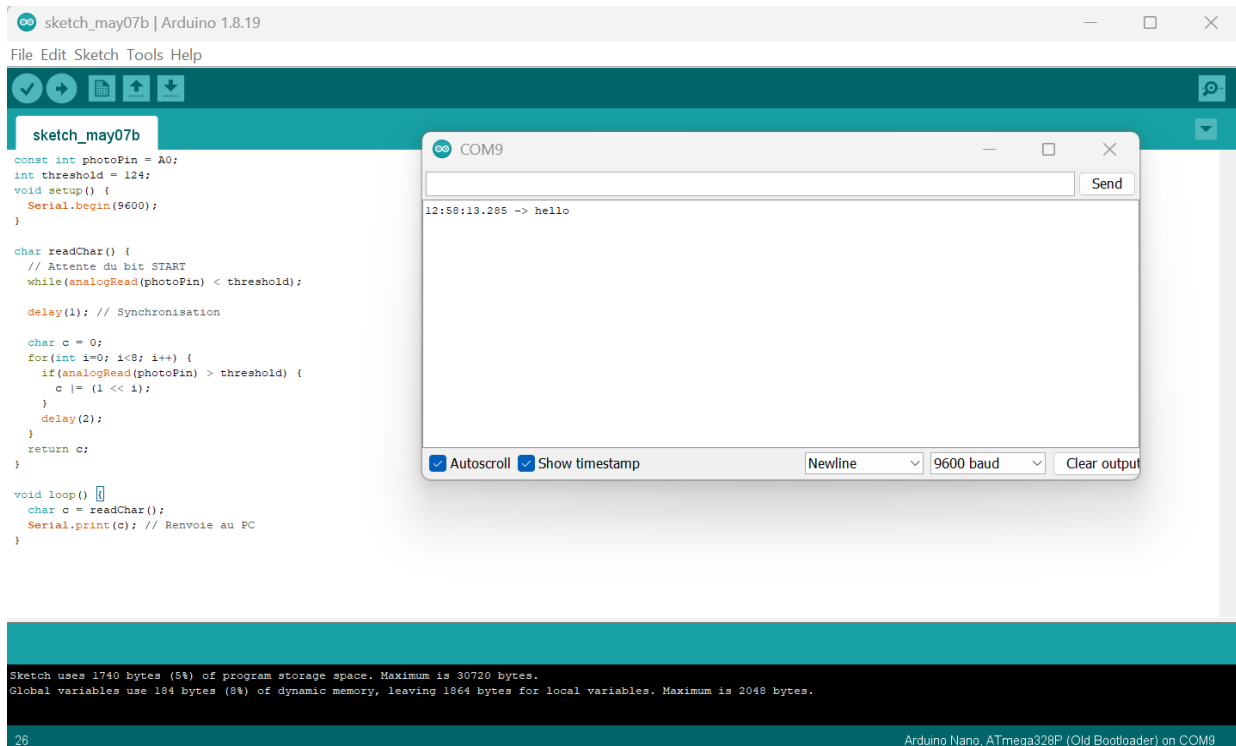


Figure III.9 : Code pour le récepteur.

Ce montage, malgré sa simplicité, prouve l'efficacité de la communication VLC pour des applications bas débit. L'implémentation de ce système avec Arduino a permis la transmission d'un message sous forme de lumière, sa réception et son affichage corrects. Le test a démontré que la communication par lumière visible est fonctionnelle avec un montage simple et des outils accessibles. Cette réalisation confirme la fiabilité de l'échange de données par VLC, et les résultats obtenus ouvrent la voie à des développements futurs plus complexes, tels que l'augmentation du débit ou l'intégration dans des systèmes embarqués avancés.

III.4. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté la conception et la réalisation d'un système VLC simple utilisant une carte Arduino Nano. À travers une approche pratique, nous avons démontré comment des composants électroniques courants, tels qu'une LED et une photodiode, peuvent être utilisés pour transmettre et recevoir des données de manière fiable. Les tests effectués ont confirmé l'efficacité du protocole de communication mis en place, avec la transmission réussie d'un message simple ("hello") entre l'émetteur et le récepteur. Ceci illustre le potentiel de la lumière comme moyen de transmission de données entre deux points.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire était consacré à l'étude d'un système de communication par la lumière visible (VLC) en environnement intérieur. Notre travail a débuté par des généralités sur la communication VLC. Par la suite, une étude comparative de plusieurs configurations d'un système VLC intérieur a été menée. Ces configurations ont été analysées en fonction de paramètres clés tels que l'éclairement lumineux, la puissance reçue, le rapport signal sur bruit (SNR), et la propagation du retard (RMS-delay). Les résultats obtenus ont démontré que la configuration avec six sources à LED offre les meilleures performances. Notre étude confirme l'importance d'une architecture optimisée pour garantir une communication VLC fiable. En effet, la qualité et la stabilité de la transmission dépendent fortement de la disposition et du nombre de LEDs. L'étude s'est poursuivie par la réalisation d'un système VLC simple, capable de transmettre un message texte via un signal lumineux. Ce système a été conçu en utilisant une carte Arduino Nano, une LED, et une photodiode.

Perspectives

- Pour l'architecture du système

Il serait utile :

- De tester plus d'arrangements géométriques de LED (par exemple : en ligne, en cercle).
- D'étudier d'autres dimensions de pièce ou types de locaux (salles de classe, couloirs).
- D'étudier l'influence des meubles, des murs et d'autres obstacles sur la propagation du signal VLC et analyser la couverture du signal dans chaque coin de la pièce.
- D'étudier l'effet du mouvement dans la pièce (d'un utilisateur ou d'un objet) sur la stabilité du signal reçu.

- Pour la réalisation du système VLC

Il serait utile :

- D'utiliser des techniques de modulation plus avancées pour augmenter le débit de transmission (comme PWM ou OFDM).
- D'améliorer la sensibilité du récepteur, en utilisant des photodiodes plus performantes ou des capteurs optiques spécifiques.
- D'étudier l'impact de la lumière ambiante sur la qualité du signal et proposer des solutions pour réduire le bruit.
- D'augmenter la portée de transmission tout en gardant une bonne qualité de réception.

- De développer une communication bidirectionnelle, permettant l'envoi et la réception de données entre deux dispositifs VLC.
- D'intégrer le système dans un réseau de plusieurs LED pour créer une couverture plus large, comme dans une maison.

Bibliographie

- [1] Bilal Ben Amrouche. *Efficacité énergétique des architectures de communication sans fil IR-UWB pour les réseaux de capteurs sans fil Electronique*. INSA de Toulouse. France. 2018.
- [2] www.elprocus.com/types-of-wireless-communication-applications/ (Consulté le 2 fév. 2025).
- [3] www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/Bluetooth (Consulté le 23 fév. 2025).
- [4] www.elprocus.com/how-does-bluetooth-work/ (Consulté le 24 fév. 2025).
- [5] www.elprocus.com/how-does-wifi-technology-work/ (Consulté le 25 fév. 2025).
- [6] www.proofpoint.com/fr/threat-reference/wifi (Consulté le 26 fév. 2025).
- [7] www.techno-science.net/definition/3915.html (Consulté le 26 fév. 2025).
- [8] www.noodo-wifi.com/faq/securite-wifi-wep-wpa-wpa2/ (Consulté le 17 juin 2025).
- [9] Affoune Oussama, Naidja Abderaouf. *Visible light communication : Etude des performances d'un système MIMO*. Mémoire de Master. Université 8 mai 1945 Guelma. 2020.
- [10] www.techno-science.net/definition/7250.html (Consulté le 26 fév. 2025).
- [11] Dr. Maghchiche. Support du cours : *Spectroscopie de vibration dans l'infrarouge*. Université de Batna 2. 2025.
- [12] <https://promocom.r-e-f.org/radioamateur/la-radio-comment-ca-fonctionne/> (Consulté le 26 fév. 2025).
- [13] L. Graini. Support de cours : *La technologie VSAT*. Université 8 mai 1945 Guelma. 2025.
- [14] Latif Ullah Khan. *Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges*. Digital Communications and Networks, Volume 3, Issue 2, Pages 78-88, ISSN 2352-8648. 2017.
- [15] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, 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.
- [16] C. Le Bas. *Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil*. Thèse de doctorat, Université de Limoges. France. 2017.
- [17] C. L. Dizes, O. Coponet, R. Pavec, S. Dorgere, S. Jeanneteau. *Les enjeux et les opportunités offertes face au Wi-Fi*. Mémoire de master, Institut national des sciences appliquées, Rennes. 2015.
- [18] Z. Wang, Q. Wang, W. Huang, Z. Xu. *Visible light communications: modulation and signal processing*. Hoboken. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2017.
- [19] R. U.-R. Sm. *Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande*. Union International des Télécommunications. 2018.
- [20] 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.

- [21] R.H.E. Sellaoui. *Commande d'un robot à base de la Technologie VLC*. Mémoire de Master. Université 8 mai 1954 Guelma. 2021.
- [22] A. Cailean. *Etude et réalisation d'un système de communications par lumière visible (VLC/LiFi)*. Application au domaine automobile. Thèse de doctorat. Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines. France. 2014
- [23] Chaabna, A. Babouri, X. Zhang. *An Indoor Positioning System Based on Visible Light Communication Using a Solar Cell as Receiver*. Chapter book: Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems, Springer. DOI:10.1007/978-3-319-73192-6_5, ISBN-13: 978-3319731919. 2018.
- [24] P. Goswami, M. K. Shukla. *Design of a Li-Fi Transceiver*. Wireless Engineering and Technology, vol. 08, n° 04, p. 71-86. 2017.
- [25] L. E. M. Matheus, A. B. Vieira, L. F. M. Vieira, M. A. M. Vieira and O. Gnawali. *Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.21, n°4, pp.3204-3237, Fourth quarter, doi:10.1109/COMST.2019.2913348. 2019.
- [26] B. Hamami. *Intégration du système hybride RF/VLC dans les réseaux d'accès 5G -Internet de lumière : vers un hôpital intelligent*. Mémoire de Master. Université 8 mai 1954 Guelma. 2021.
- [27] T. Cevik, S. Yilmaz. *An Overview of Visible Light Communication Systems*. International journal of Computer Networks & Communications, v7, n 6, p. 139 150. 2015.
- [28] I. Hamamdia. *Etude des performances d'un système de communication optique hybride SDM/FSO utilisant la lumière laser à 2 μ m*. Mémoire de master. Université 8 mai 1945 Guelma. 2022.
- [29] Michael Margolis, Nicholas Weldin. *Arduino Cookbook*. 2^{ème} édition, ISBN9782100727124, 5 rue Laromiguière, 75005 Paris, 453 pages. 2015.
- [30] W.N.E. Nabli, A. Hallaci. *Etude et évaluation des performances d'un système de communication par lumière visible dans les applications Indoor*. Mémoire de Master. Université 8 mai 1954 Guelma. 2024.
- [31] Chergui Safia. *Conception et réalisation d'un système de communication bureautique par lumière visible (Li-Fi)*. Mémoire de Master. Université 8 mai Guelma 1954. 2019.
- [32] Azizi Haoua, Benhamdi Nada. *Application de VLC-OFDM pour la technologie LIFI*. Mémoire de Master. Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued. 2021.
- [33] 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.
- [34] Alin-Mihai Căilean. *Study, implementation and optimization of a visible light communications system. Application to automotive field*. Thèse de doctorat. Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines. 2014.

- [35] C. Medina, M. Zambrano, et K. Navarro. *LED based visible light communication: technology, applications and challenges – a survey*. vol. 8, n°4, p. 15. 2015.
- [36] Hyun-Seung Kim, Deok-Rae Kim, Se-Hoon Yang, Yong-Hwan Son, Sang-Kook Han. *An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique*. Lightwave Technology, Journal of, vol.31, n°1, pp.134,144, Jan.1. 2013.
- [37] Chouabia Halim. *Système MIMO multifonctionnel dans le concept VLC*. Thèse de doctorat. Université 8 mai 1954 Guelma. 2023.
- [38] Saleh Sally S., et al. *Efficient three-dimensional indoor dark light visible light positioning with received signal strength technique*. Optical and Quantum Electronics, vol. 56, no. 17. 2024.
- [39] Mahyadine Said Ali, Benmares Ali Khayreddine. *Système de commande à base de la communication VLC : Application indoor*. Mémoire de Master. Université 8 mai 1954 Guelma. 2019.
- [40] Abed Sadek, Mehiaoui Mohammed. *Interface graphique pour piloter un bras de robot à travers une carte Arduino*. Mémoire de Master. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. 2015.
- [41] Iabbaden Zinedine, Lahlou Farid. *Réalisation d'un module de distribution d'énergie à base d'une carte Arduino méga 2560*. Mémoire de Master. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. 2017.
- [42] Midou Oussama, Salhi Soraya. *Système Intelligent de gestion de bibliothèque en Utilisant la technologie RFID et le Business Intelligence*. Mémoire de Master. Université AMO de Bouira. 2021.
- [43] https://vakits.com/sites/default/files/imagecache/product_full/ARDUINO_NANO_03.png (Consulté le 20 mai 2025).
- [44] https://www.etaplighting.com/sites/default/files/uploads/Papers/leddossier%20update%202018_FR.pdf (Consulté le 20 mai 2025).
- [45] <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf> (Consulté le 20 mai 2025).

Annexes

Code source Arduino

Code de l'émission :

```
// Déclaration d'une constante entière pour le numéro de broche connectée à la LED
const int ledPin = 9;

// Fonction d'initialisation qui s'exécute une fois au démarrage
void setup() {
  // Configure la broche ledPin (broche 9) comme une sortie
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  // Initialise la communication série avec un débit de 9600 bauds
  Serial.begin(9600);
  // Met la broche ledPin à l'état LOW (0V) initialement
  digitalWrite(ledPin, LOW);
}

// Fonction pour envoyer un caractère via la LED
void sendChar(char c) {
  // Envoi du bit de START (toujours HIGH pour marquer le début)
  digitalWrite(ledPin, HIGH);
  delay(1); // Attend 1 milliseconde pour que le récepteur détecte le bit
  // Boucle pour envoyer les 8 bits de données (LSB first - bit de poids faible en premier)
  for(int i=0; i<8; i++) {
    // Écrit l'état de la broche ledPin selon le i-ème bit du caractère c
    // (c >> i) décale le caractère c de i positions vers la droite
    // & 0x01 fait un ET bit à bit pour isoler le bit le plus à droite
    digitalWrite(ledPin, (c >> i) & 0x01);
    delay(2); // Attend 2 millisecondes entre chaque bit pour la stabilité
  }
  // Envoi du bit de STOP (toujours LOW pour marquer la fin)
  digitalWrite(ledPin, LOW);
}
```

```
    delay(10); // Attend 10 millisecondes avant de pouvoir envoyer le prochain caractère
}

// Fonction principale qui s'exécute en boucle indéfiniment
void loop() {
    // Vérifie si des données sont disponibles sur le port série
    if(Serial.available()) {
        // Lit le caractère reçu
        char c = Serial.read();
        // Envoie le caractère via la fonction sendChar
        sendChar(c);
    }
}
```

Code de réception :

```
const int photoPin = A0;
    // Broche analogique connectée au capteur de lumière (LDR, photodiode, etc.)
int threshold = 124;
    // Seuil pour différencier un 0 et un 1 logique à partir de la lecture analogique
void setup() {
    Serial.begin(9600);    // Initialisation de la communication série à 9600 bauds
}
char readChar() {
    // Attente du bit START (niveau lumineux supérieur au seuil)
    while(analogRead(photoPin) < threshold);
    // Tant que le signal est inférieur au seuil, on attend le début de la transmission
    delay(1);    // Petite pause pour se synchroniser avec le début du 1er bit
    char c = 0;    // Variable pour stocker le caractère (8 bits)
    for(int i = 0; i < 8; i++) {
        // Boucle pour lire les 8 bits du caractère
        if(analogRead(photoPin) > threshold) {
            // Si le niveau lumineux est au-dessus du seuil, c'est un bit 1
            c |= (1 << i);    // Met le bit i à 1 dans la variable c
        }
        delay(2);    // Pause entre chaque bit (temps de transmission)
    }
    return c;    // Retourne le caractère reconstruit
}
void loop() {
    char c = readChar();    // Appelle la fonction pour lire un caractère optique
    Serial.print(c);    // Envoie le caractère lu au port série (affichage sur moniteur série du PC)
}
```