

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID DE TLEMCCEN

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS

MÉMOIRE DE MASTER EN TELECOMMUNICATIONS

OPTION : RESEAUX ET TELECOMMUNICATIONS

Étude et développement d'un système domotique exploitant la technologie Li-Fi

Soutenu le 25 Jun 2023 devant le jury :

Président :	Pr Kameche Samir	Professeur	UABT Tlemcen
Examineur :	Pr Hadjila Mourad	Professeur	UABT Tlemcen
Représentant de l'incubateur I2E :	Dr Derfouf Mohammed Amine	MCB	CUM Maghnia
Encadrant :	Pr Bouacha Abdelhafid	Professeur	UABT Tlemcen
Partenaire Socioéconomique :	M.Habri Abdelkader	Entrepreneur	/
Invité d'honneur :	Dr Sari Hassoun Zakaria	MCA	UABT Tlemcen
Invité d'honneur :	Pr Soulimane Sofiane	Professeur	UABT Tlemcen

Présenté par :

CHAREF Oussama
Matricule : 181837019192

AIS Oussama
Matricule : 181837019190

Remerciements

Par les premières lignes de ce document, nous éprouvons une immense gratitude et une reconnaissance infinie à l'égard de Dieu Tout Puissant, créateur des Cieux et de la Terre, et à nos familles qui par leur soutien et encouragements nous boostent et nous poussent à aller aussi loin que possible, et à poursuivre nos ambitions les plus grandes.

Nous tenons ensuite à adresser toute notre gratitude au **Pr BOUACHA Abdelhafid** pour son écoute, son encadrement et sa disponibilité ainsi qu'au **Pr Tarun Shrivastava CEO Tishitu India**, pour son engagement, son aide et ses précieux conseils qu'il a sus nous transmettre tout au long de ce projet.

Nous tenons à remercier **Dr Nadia Moulay** pour son aide précieuse dans l'élaboration du mémoire et le soutien moral durant les phases difficiles rencontrées lors de ce long chemin.

Nos remerciements aux représentants de I2E, en particulier au Pr Soulimane Sofiane. qui nous ont ouvert leurs portes, afin de voir notre projet devenir réalité et se concrétiser.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury : **Pr Hadjila Mourad , Pr Kameche Samir Pr Derfouf Amine et M Habri Abdelkader** pour l'honneur et l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous désirons aussi exprimer toute notre reconnaissance envers notre département de télécommunications, nos professeurs pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont prodigué au cours de ces cinq années passées à l'université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen.

Nous remercions également Monsieur **Hennane Djawed** Directeur commercial de la société Djezzy Oran et son staff, pour leur précieuse prise en charge, lors de notre séjour de stage au sein de leurs institutions respectives.

Enfin, nous remercions nos parents, familles et amis pour leurs encouragements ainsi que tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin dans l'élaboration de la présente recherche.

À tous, nous adressons un GRAND MERCI !

Oussama CHAREF et Oussama Ais

Dédicaces

Je voudrais dédier ce mémoire à toutes les personnes qui ont toujours cru en moi.

A mes parents qui m'ont soutenu toute ma vie, merci pour toutes vos prières, votre aide, votre bienveillance et tous vos sacrifices pour m'offrir les meilleures conditions de vie et d'études, je vous aime très fort.

A ma très chère grand-mère maternelle ; ma deuxième mère que j'adore et qui me le rend si bien...

A mes chers frère et sœurs Rabie, Aya et Alae, qui ont toujours été là et auxquels je souhaite à mon tour succès et réussite.

A la mémoire de mes chers défunts grands-parents que Dieu les accueille dans son vaste paradis

A ma chère amie Amira, merci d'être une source constante de soutien et d'encouragement. Ton dévouement à notre succès et ta volonté d'aider de toutes les manières possibles sont vraiment inestimables. Je te suis reconnaissant pour les bons moments que nous avons partagés et les défis académiques que nous avons relevés ensemble. Merci pour cette belle amitié.

A mes oncles, tantes, cousins et cousines maternels et paternels

A mes amis, depuis toujours, Amine Bouarfa, Amine Taourite, Oussama Ais, , Bilal Laidouni , Salim Noui

Ce modeste travail soigneusement élaboré, sera, je l'espère, un hommage de la confiance que vous avez un jour placée en mes compétences.

Oussama Charef

Je dédie ce modeste travail aux personnes qui me sont chères, et qui m'ont épaulé durant toutes ces années.

A mes parents qui m'ont soutenu toute ma vie, merci pour toutes vos prières, votre aide, votre bienveillance et tous vos sacrifices pour m'offrir les meilleures conditions de vie et d'études, je vous aime très fort.

A mes très chers grands parents maternels.

A mes chers frère et sœur Mohammed et Bouchra qui ont toujours été là et auxquels je souhaite le meilleur pour l'avenir.

A la mémoire de mes chers défunts grands-parents paternels que dieux les accueillent dans son vaste paradis

A mon cher oncle Omar KEFENEMER que j'estime énormément.

A mes oncles, tantes, cousins et cousines maternels et paternels

A mes chers amis Amine Bouarfa, Amine Taourtit, Oussama Charef, Salim Noui, Bilal Laidouni et Rabie Charef .

Ce modeste travail soigneusement élaboré, sera, je l'espère, un hommage de la confiance que vous avez un jour placée en mes compétences.

Oussama Ais

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Classification des périphériques IEEE 802.15.7	34
Tableau 2.1 : Comparaison entre le Li-Fi et le Wi-Fi.....	54
Tableau 2.2: Caractéristiques des techniques de modulation du Li-Fi	59
Tableau 2.3: Caractéristiques de la LED 5mm.....	69
Tableau 2.4: Caractéristiques du phototransistor.....	71
Tableau 2.5: Analyse du rendement du modèle Li-Fi.....	75

Liste des figures

Figure 1.1: Schéma des 4 piliers du bâtiment intelligent	24
Figure 1.2:Ecosystème du bâtiment intelligent	25
Figure 1.3:Champs couverts par la domotique	25
Figure 1.4: Spectre électromagnétique.....	28
Figure 1.5: Principe de fonctionnement des VLC	31
Figure 1.6: Schéma fonctionnel d'un système VLC.	31
Figure 1.7: Architecture de périphérique VLC sous la norme IEEE 802.15.7.35	
Figure 1.8 : Classification des réseaux sans fil.....	35
Figure 1.9: Système de radiodiffusion sans fil	36
Figure 1.10: Système de radiotélévision sans fil	37
Figure 1.11: Communication sans fil par satellite	38
Figure 1.12: Téléphonie mobile cellulaire	39
Figure 1.13: Communication sans fil infrarouge.....	40
Figure 1.14: Spectre de fréquences des ondes infrarouges	40
Figure 1.15: Communication sans fil par Wi-Fi.....	41
Figure 1.16: Communication sans fil par Bluetooth.....	42
Figure 1.17: Spectre de fréquence de la lumière visible	44
Figure 2.1: Présentation du Li-Fi.....	50
Figure 2.2 : Schéma fonctionnel de la communication Li-Fi.....	56
Figure 2.3 : Fonctionnement du système de communication Li-Fi.	57
Figure 2.4: Techniques de modulation pour Li-Fi.....	58

Figure 2.5: Allocation de ressources pour TDMA et OFDMA	60
Figure 2.6: Architecture d'un système Li-Fi.	62
Figure 2.7: Présentation de la carte Arduino UNO.....	66
Figure 2.8: Présentation du phototransistor.....	67
Figure 2.9: Présentation du la source LED	68
Figure 2.10: Architecture du modèle proposé	69
Figure 2.11: Schéma électronique du système adopté	69
Figure 2.12: Prise de vue réelle du modèle proposé sur la base de deux systèmes (TX, RX) (effectuée en date du 1/5/23).....	70
Figure 2.13: Évolution de la précision en fonction de la distance pour différents débits en Baud.	76
Figure 3.1: Arduino Nano	80
Figure 3.2 : ULN 2803	80
Figure 3.3: HC-05	81
Figure 3.4: Alimentation 200V /12V/60W	81
Figure 3.5: LED omnidirectionnelle (5w).....	82
Figure 3.6: Capteur de température et d'humidité DHT 11	82
Figure 3.7: LED (petits format RGB)	83
Figure 3.8: Phototransistor L14G1	83
Figure 3.9: Capteur de luminosité.....	84
Figure 3.10: Relais	84
Figure 3.11: Supports	85
Figure 3.12: Boitiers en PVC	86
Figure 3.13: Application Li-Fi Home	87
Figure 3.14: Architecture de base du prototype Li-Fi Home.	88
Figure 3.15: Récepteur R2, relié à un Ventilateur.	89
Figure 3.16: Connexion du récepteur R2.	90
Figure 3.17: Récepteur R1, relié à un rideau ou volet roulant.	91
Figure 3.18: Connexion du récepteur R1.	91
Figure 3.19: Récepteurs R3 et R4, reliés aux LED Rouge et Bleue.	92
Figure 3.20: Connexions des récepteurs R3 et R4.....	92
Figure 3.21: Prototype en fonctionnement.	93
Figure 3.22: connexion du smartphone au système	94
Figure 3.23: Contrôle de la LED Bleue	94

Figure 3.24: Contrôle de la LED Rouge.	95
Figure 3.25: Contrôle du Ventilateur.	95
Figure 3.26: Contrôle du volet roulant (Rideau)	96

Acronyms

ADC: Analog Digital Converter

BAN: Body Area Network

BMC: Business Model Canvas

CSK: Color Shift Keying

DAC: Digital Analog Converter

DD: Direct Detected

EIBG: European Intelligent Building Group

EM: Electromagnetic

GTC : Gestion Technique Centralisée

GTB : Gestion Technique du Bâtiment

GPS : Global Positioning System

HQE : Haute Qualité Environnementale

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IDE: Integrated Development Environment

IM: Intensity Modulated

IR: Infra Rouge

IrDA: Infrared Data Association

ISI: Inter-Symbol Interference

JEITA: Japan Electronics and Information Technology Industries Association

KNX: Konnex

LAN: Local Area Network

LCD: Liquid Crystal Display

LD: Laser Diodes

LED: Light-Emitting Diode

Li-Fi: Light Fidelity

LLC: Logical Link Control

LoS: Line of Sight

LPF: Low Pass Filter

LDR: Light Dependent Resistor

MAC: Media Access Control

MCM: Multiple Carrier Modulation

MCPS: MAC Common Part Sublayer

MCU: MicroController Unit

MFR: MAC Footer

MHR: MAC Header

MIME: Multipurpose Internet Mail

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OOK: On Off Keying

OWC: Optical wireless communications

PAN: Personal Area Network

PD: Photodiode

PPM: Pulse Position Modulation

PWM: Pulse Width Modulation

QAM : Quadrature amplitude modulation

RF : Radiofréquence

RVB : Rouge Vert Bleu

TDMA : Time Division Multiple Access

TCA : Transconductance

TDMA : Time Division Multiple Access

TIA : Transimpedance

UV : Ultraviolet

VLC : Visible Light Communication

VLAN: VLC Personal Area Network

VLCC: Visible Light Communication Consortium

VPPM: Variable Pulse Position Modulation

Wi-Fi: Wireless Fidelity

Résumé

La présente étude se concentre sur la conception d'un système domotique qui exploite la technologie Li-Fi pour la communication entre les différents éléments. Dans un premier temps, nous abordons les définitions et les caractéristiques de la domotique ainsi que des technologies de communication par VLC (Visible Light Communication). Ensuite, nous mettons l'accent sur la technologie Li-Fi. Par la suite, nous développons une première application du Li-Fi dans un système de communication bidirectionnelle. L'objectif de cette application est ensuite étendu à la conception d'un système domotique utilisant le Li-Fi pour la gestion de l'éclairage, des volets roulants et de la ventilation, et qui peut être étendu à l'ensemble des équipements d'une maison intelligente. Enfin, nous discutons des avantages et des limites de cette conception.

Mots clés : Domotique, Li-Fi (Light Fidelity), VLC (Visible Light Communication), LED (Light Emitting Diodes), Gestion à distance sécurisée.

Summary :

This research focuses on the design of a home automation system that utilizes Li-Fi technology for communication between various components. It begins by addressing the definitions and characteristics of home automation and Visible Light Communication (VLC) technologies, with a specific emphasis on Li-Fi technology. Subsequently, a preliminary application of Li-Fi in a bidirectional communication system is developed, followed by a second application relating to the design of a home automation system that utilizes Li-Fi for managing lighting, roller shutters, and ventilation, which can be extended to control the entire smart home equipment. Finally, the advantages and limitations of this design are discussed.

Keywords: Home Automation, Li-Fi (Light Fidelity), VLC (Visible Light Communication), LED (Light Emitting Diodes), Secure Remote Management.

الملخص:

تركز هذه الدراسة على تصميم نظام الأتمتة المنزلية الذي يستخدم تقنية Li-Fi للاتصال بين مكونات مختلفة. يبدأ البحث بمناقشة تعريفات وسمات الأتمتة المنزلية وتقنيات الاتصال عبر الضوء المرئي (VLC)، مع تركيز خاص على تقنية Li-Fi. بعدها، يتم تطوير تطبيق أولي لتقنية Li-Fi في نظام اتصال ثنائي الاتجاه، ثم يتم توسيع هدف هذا التطبيق لتصميم نظام الأتمتة المنزلية الذي يستخدم تقنية Li-Fi لإدارة الإضاءة والستائر والتهوية، والذي يمكن توسيعه للتحكم في جميع معدات المنزل الذكي. في النهاية، يتم مناقشة مزايا وقيود هذا التصميم.

الكلمات المفتاحية: أتمتة المنزل، Li-Fi (دقة الضوء)، VLC (اتصال الضوء المرئي)، LED (الثنائيات الباعثة للضوء)، الإدارة الآمنة عن بعد.

Tables des matières

Remerciements.....	II
Dédicaces.....	III
Liste des tableaux.....	V
Liste des figures	V
Acronymes.....	Error! Bookmark not defined.
Résumé	XI
Summary :	XII
:ملخص.....	XIII
Tables des matières	XIV
Introduction Générale.....	XIX
Chapitre 1:	22
La technologie VLC au service de la Domotique.....	22
Introduction :	23
1. L'intelligence dans la durabilité du bâtiment.....	23
1.1.1. Définition de l'intelligence dans le bâtiment	23
1.1.2.Caractéristiques principales d'un bâtiment intelligent.....	25
1.1.3.Définition de la domotique :.....	25
1.1.4.Définition de l'immotique	26
1.1.5. Gestion technique du bâtiment :	26
1.1.5.1. Gestion technique centralisée (GTC) :.....	26
1.1.5.2. La télégestion.....	26
1.1.6. Standardisation du bâtiment intelligent : la norme KNX.....	27
2. La Communication sans fil et technologie VLC.....	27
1.2.1. Définition d'un système de communication sans fil.....	28
1.2.2 Émergence de la technologie VLC	29
1.2.3 Principe de fonctionnement des VLC	31

1.2.4	Architecture d'un système VLC	31
1.2.4.1	Émetteur VLC	32
1.2.4.2	Récepteur VLC	32
1.2.5	Standardisation	32
1.2.6	Catégories de communications sans fil	35
1.2.6.1	La radiodiffusion.....	36
1.2.6.2	Communication sans fil par satellite	37
1.2.6.2.1	Réseaux étendus sans fil (WWAN) : Téléphonie mobile cellulaire	38
1.2.6.2.2	La communication infrarouge.....	39
1.2.6.2.3	WLAN (Wi-Fi)	41
1.2.6.2.4	Bluetooth	42
1.2.6.2.5	Communication sans fil par la lumière visible	43
1.2.6	Avantages et inconvénients des réseaux sans fil	44
1.2.6.1	Avantages pour les utilisateurs :	44
1.2.6.2	Avantages pour les responsables du déploiement du réseau sans fil :	44
1.2.6.3	Les inconvénients des réseaux sans fils	45
3.	Communications VLC dans la maison intelligente.....	45
	Conclusion	47
	Chapitre 2: Introduction à la technologie LI-FI.....	48
	Introduction :	49
2.1	Définition de la technologie Li-Fi	50
2.2	Emergence et évolution du Li-Fi.....	50
2.3	Domaines d'application du Li-Fi	52
2.4	Avantages du Li-Fi	53
2.5	Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi	54
2.6	Contraintes et défis de conception Li-Fi.....	55

2.7.Fonctionnement de la communication Li-Fi.....	56
2.8.Catégories de modulation dans un système Li-Fi	58
2.8.1.Caractéristiques des techniques de modulation du Li-Fi	59
2.8.2.Caractéristiques d'un réseau Li-Fi.....	60
2.8.2.1.Accès multiples.....	60
2.8.2.2.Duplex	61
2.8.2.3.L'attocell	61
2.8.2.4.Effet Handover.....	61
2.9.Architecture d'un réseau Li-Fi	61
2.10 . Normalisation de la technologie Li-Fi.....	62
2.11 Distinction entre Li-Fi et VLC.....	63
2.12 Etat de l'art des systèmes Li-FI.....	63
2.13 Développement d'un système Li-Fi bidirectionnel.....	65
2.13.1 .Composants relatifs à l'application.....	65
2.13.1.1 Carte Arduino UNO	65
2.13.1.2.Phototransistor	67
2.13.1.3.Source LED	68
2.13.2 .Architecture du modèle proposé.....	68
2.13.2.1.Transmetteur.....	69
2.13.2.2.Récepteur.....	70
2.13.2.3.Signal codé	71
2.13.2.4.Logiciel Li-Fi.....	71
a) Déroulement du processus.....	71
b) Analyse du rendement	74
Conclusion	77
Chapitre 3: Conception d'un système domotique basé sur la technologie Li-Fi	
.....	78

Introduction :	79
3.1.Architecture des systèmes alloués et protocoles adoptés	79
3.1.1.Composants utilisés	79
3.1.1.1.Cartes Arduino	79
3.1.1.2.Circuit intégré ULN 2803	80
3.1.1.3.Module de communication HC-05	80
3.1.1.4.Alimentation 200V /12V/60W	81
3.1.1.5.LED omnidirectionnelle (5w)	82
3.1.1.6.Capteur de température et d'humidité DHT 11	82
3.1.1.7.LED (petits formats)	83
3.1.1.8.Phototransistor L14G1	83
3.1.1.9.Capteur de luminosité	84
3.1.1.10.Relais	84
3.1.1.11.Supports	85
3.1.1.12.Boitiers en PVC	86
3.1.2.Protocoles adoptés	86
3.1.2.1.Le protocole I2C	86
3.1.2.2.Le Bluetooth	86
3.2.Conception de l'application Li-Fi Home	87
3.2.1.Description de l'architecture du prototype	87
3.2.1.1. Un Système Centralisé « Master »	88
3.2.1.2. Le « Slave 1 »	88
3.2.1.3.Le « Slave 2 »	89
3.2.1.4.Les récepteurs	89
3.2.1.4.1.Le récepteur R2	89
3.2.1.4.2.Le récepteur R1	90
3.2.1.4.3.Récepteurs R3et R4	92

3.2.2.Fonctionnement du prototype	93
3.2.3.Evaluation du système proposé et discussion des résultats	96
Conclusion	98
Conclusion générale	99
Bibliographie	100
Annexe (BMC)	107
1. Proposition de valeur (Value proposition) :.....	108
2. Segments de clients (Customer segments) :	108
3. Relations avec les clients (Customer Relationship) :.....	108
4. Canaux de distribution (Channels) :.....	109
5. Partenaires stratégiques (Key partners)	110
6. Activités clés (Key Activities) :	110
7. Ressources principales (Key resources) :	111
8. Structure des coûts (Cost structure) :	111
9. Sources de revenus (Revenue streams) :	112

Introduction Générale

La domotique, ou la maison intelligente, est un ensemble de technologies et de systèmes intégrés dans un bâtiment pour automatiser et contrôler les fonctions domestiques telles que l'éclairage, le chauffage, la climatisation, la sécurité... Les systèmes domotiques peuvent être contrôlés à distance à l'aide d'un smartphone, d'une tablette ou d'un ordinateur. L'objectif principal de la domotique est de rendre la vie des occupants plus facile, plus confortable et plus sûre tout en améliorant l'efficacité énergétique et la durabilité des bâtiments.

De ce fait, l'apparition de la domotique est étroitement liée à la crise climatique actuelle et au besoin de durabilité des bâtiments. En effet, l'utilisation des systèmes domotiques peut aider à réduire la consommation d'énergie des bâtiments. Les systèmes domotiques peuvent également surveiller la consommation d'énergie des bâtiments et aider à identifier les gaspillages d'énergie, ce qui permet aux occupants de prendre des mesures pour les réduire.

L'efficacité énergétique est devenue une préoccupation majeure dans le domaine de la construction, car la consommation d'énergie des bâtiments contribue de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique. Les bâtiments représentent environ 40% de la consommation d'énergie mondiale et sont responsables de près de 30% des émissions de gaz à effet de serre.

En outre, la durabilité est devenue un facteur clé dans la conception des bâtiments, car les bâtiments durables ont un impact environnemental réduit tout au long de leur cycle de vie. Les bâtiments durables sont conçus pour maximiser l'utilisation des ressources naturelles, minimiser les déchets et les émissions de gaz à effet de serre et améliorer la qualité de l'air intérieur. Dans ce contexte, l'utilisation des systèmes domotiques peut aider à répondre aux défis de la crise climatique en réduisant la consommation d'énergie et en améliorant la durabilité des bâtiments.

En Algérie, malgré le développement des technologies de l'information et de la communication, l'adoption des systèmes domotiques est encore à un stade précoce. En effet, bien que la domotique puisse offrir des avantages considérables, tels que l'efficacité énergétique, le confort, la sécurité et la convivialité, la grande majorité des habitations n'a pas encore adopté cette technologie. Il y a plusieurs raisons à cela,

notamment le manque de connaissances et de sensibilisation sur les avantages de la domotique, les coûts élevés des équipements et des installations, ainsi que les problèmes liés à la fiabilité et à la maintenance.

Cependant, avec l'augmentation de la demande pour les maisons intelligentes, il est de plus en plus important de trouver des solutions pour surmonter ces obstacles et encourager l'adoption de la domotique en Algérie, à l'instar de tous les pays du monde, en quête de systèmes intelligents concrétisant la durabilité du bâtiment à usage de logement ; principal responsable d'émission de gaz à effet de serre (GES) au même titre que les secteurs de l'énergie et du transport, induisant la crise climatique que connaît la planète actuellement.

C'est là où l'application de la technologie Li-Fi dans les systèmes domotiques peut jouer un rôle important. En offrant des avantages tels que la vitesse, la sécurité et la résistance aux interférences, le Li-Fi peut être une solution efficace pour stimuler l'adoption des systèmes domotiques en Algérie.

Dans une vision plus globale, la technologie VLC (Visible Light Communication) est une technologie de communication sans fil utilisant des signaux lumineux pour transmettre des données. Elle offre des avantages par rapport aux technologies de communication sans fil traditionnelles telles que le Wi-Fi, notamment en termes de vitesse, de sécurité et de fiabilité. Cependant, la technologie VLC n'est pas encore largement utilisée dans les systèmes domotiques, en raison de certains défis techniques.

Le Li-Fi, ou Light Fidelity, est une technologie de communication sans fil qui utilise la lumière pour transmettre des données. Il a été développé pour résoudre les défis de la communication sans fil traditionnelle, tels que la saturation du spectre radioélectrique et la sécurité. Le Li-Fi peut offrir une vitesse de transmission des données plus rapide, une sécurité accrue et une résistance accrue aux interférences. Il utilise des signaux lumineux pour transmettre des données, ce qui le rend moins sujet aux interférences et permet une transmission bidirectionnelle.

Dans ce travail, nous allons explorer la manière dont la technologie Li-Fi peut être appliquée dans la conception d'un système domotique efficace.

Nous commencerons au premier chapitre, par une introduction à la domotique et à la technologie VLC. Nous examinerons également les défis actuels auxquels sont

confrontées les technologies de communication sans fil traditionnelles, telles que le Wi-Fi, dans le contexte de la domotique.

Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrerons sur la technologie Li-Fi et son application pour la communication dans un système domotique. Nous examinerons les avantages de la communication Li-Fi pour les systèmes domotiques, ainsi que les défis auxquels est confrontée cette technologie. Nous présenterons également un modèle de transmission Li-Fi bidirectionnel pour la communication dans un système domotique.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous mettrons en place un prototype de système domotique Li-Fi Home et l'évaluerons en termes de performance, de sécurité et de convivialité. Nous allons également discuter des perspectives pour l'application de la communication Li-Fi dans la conception de systèmes domotiques.

En conclusion, ce mémoire a pour objectif de démontrer comment la communication Li-Fi peut offrir une alternative efficace aux technologies de communication sans fil traditionnelles pour les systèmes domotiques. Nous allons explorer les avantages et les défis de la communication Li-Fi pour les systèmes domotiques, ainsi que les meilleures pratiques pour la conception et la mise en œuvre de ce type de système.

Chapitre 1:

La technologie VLC au service de la Domotique

Introduction :

Dans ce chapitre, sera traité l'ensemble des notions liées au bâtiment intelligent (Domotique, immotique), ainsi qu'à la définition de la communication sans fil et de la technologie VLC (visual light communication), en l'occurrence, le Li-Fi. De ce fait, l'accent sera mis sur la pertinence de ces solutions actives pointues utilisées dans la gestion technique du bâtiment (GTB) pour en garantir la réponse aux besoins de ses utilisateurs (Efficacité du système) ; ceci, avec le moindre de ressources possible (Efficience du système) en vue de l'inscrire dans une vision, désormais, impérative, de développement durable.

Dans cette optique, Le développement des dispositifs d'éclairage à l'état solide (SSL, Solid State Lighting), en particulier des diodes électroluminescentes (LED, Light Emitting Diode) a connu une croissance considérable. A l'époque actuelle, les LEDs sont extrêmement fiables, efficaces et ont une durée de vie qui dépasse de loin les sources de lumière classiques. Suite à ces nombreux avantages, les LEDs ont commencé à être utilisées dans de plus en plus d'applications d'éclairage et il est considéré que, dans un proche avenir, elles remplaceront complètement les sources d'éclairage traditionnel.

Outre ces caractéristiques remarquables, les LEDs sont capables de commuter rapidement, ce qui leur permet d'être utilisées non seulement pour l'éclairage, mais aussi pour la communication. Cette fonctionnalité a donné naissance à une nouvelle technologie de communication, connue sous le nom de communication par lumière visible (VLC, Visible Light Communication), permettant d'utiliser des luminaires à LED pour le transfert de données à grande vitesse. Ceci, en faveur de multiples applications domotiques.

1. L'intelligence dans la durabilité du bâtiment

1.1.1. Définition de l'intelligence dans le bâtiment

Aujourd'hui, la forme la mieux connue de l'évolution technologique de la construction éco-responsable est le « bâtiment intelligent » se situant à l'intersection des domaines de l'architecture et des télécommunications. Ce concept est né aux USA et a évolué depuis les années 80, sans définition fixe ou standardisée [1] Devenu

actuellement, un concept international, son adoption est donc incontournable, représentative du développement et du progrès.

« L'intelligence [2] » est l'ensemble des facultés permettant de comprendre les choses et les faits. L'intelligence peut être perçue comme la capacité à traiter l'information pour atteindre ses objectifs, en dépensant le moins de ressources possible. Appliquée au secteur de la construction, cela signifie qu'un bâtiment doit pouvoir fonctionner de façon autonome et communiquer avec son environnement de sorte à satisfaire aux besoins des usagers.

Le bâtiment intelligent se définit comme un bâtiment à haute efficacité énergétique intégrant, dans la gestion intelligente du bâtiment, les équipements consommateurs, les équipements producteurs et les éventuels équipements de stockage. [3]Une autre définition lui est attribuée :

« C'est un bâtiment qui intègre à la fois, les meilleurs concepts, matériaux, systèmes et technologies, existants pour satisfaire ou surpasser les exigences des possesseurs, gestionnaires, et usagers, à la fois à l'échelle locale et globale. Il devrait maximiser l'efficacité de ses occupants et permettre une gestion effective des ressources avec un minimum de coûts » [4]

Les quatre piliers du bâtiment intelligent concernent la technologie au service des occupants [5]:

- L'efficacité énergétique,
- Systèmes, de sécurité
- Gestion des équipements de confort, (thermique, acoustique, optique, qualité de l'air)
- Systèmes de télécommunications.

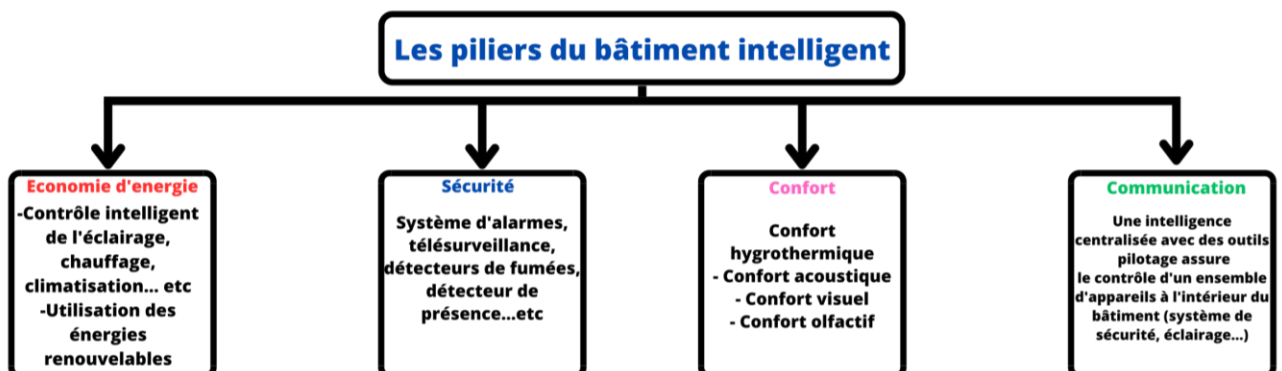


Figure 1.1: Schéma des 4 piliers du bâtiment intelligent

1.1.2. Caractéristiques principales d'un bâtiment intelligent

Le Bâtiment intelligent est interactif, autogestionnaire, mais aussi protecteur de l'environnement (label HQE) [6] et de ses occupants (label ISO) [7]. Il est doté [8]:

- D'une peau interactive (façades interactives, façades végétalisées, systèmes de capteurs/réacteurs d'éclairage, de températures, d'humidité, utilisation des matériaux intelligents et des nanotechnologies).
- D'un système nerveux intégré (installations intégrées de transmissions des données, d'information, systèmes de gestion des situations exceptionnelles, incendies, agressions, séismes, systèmes de communication moderne).
- D'un métabolisme contrôlé (consommation des énergies, consommation de l'eau, recyclage partiel des déchets liquides ou solides, recyclage des matériaux)

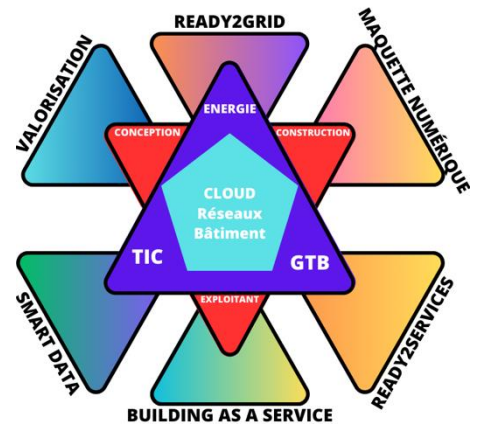


Figure 1.2: Ecosystème du bâtiment intelligent

1.1.3. Définition de la domotique :

La domotique, du latin « domus » signifiant maison, est l'ensemble des technologies de l'électronique, de l'information et des télécommunications permettant d'automatiser des bâtiments [9].



Figure 1.3: Champs couverts par la domotique

1.1.4. Définition de l'immotique

L'immotique est un mix du mot immeuble et électronique et désigne l'ensemble des systèmes automatiques, électroniques, informatiques et télécommunications installées dans un grand bâtiment (immeuble, site industriel, hôpitaux, etc). Cette définition est apparue dans les années 1990 et vient compléter le terme domotique [10].

1.1.5. Gestion technique du bâtiment :

La GTB ou Gestion Technique du Bâtiment, est souvent utilisée pour désigner le système informatique d'aide à la gestion des équipements techniques d'un bâtiment. [11].

Il s'agit de permettre au gestionnaire d'avoir une vue globale du fonctionnement et des automatismes d'un bâtiment ou d'une installation industrielle. Tels que des alarmes (Panne, arrêt anormal, mesure dépassant un seuil...) ; ou des états (fonctionnement d'un équipement, position, retour de commande...) ; ou encore des mesures (température, temps de fonctionnement, nombre de pannes...) [12].

1.1.5.1. Gestion technique centralisée (GTC) :

La GTC [13] est un système de traitement des informations d'un seul domaine technique (chauffage ou climatisation) provenant d'un même site qui utilise généralement un réseau de communication propriétaire.

1.1.5.2. La télégestion

La télégestion est la gestion à distance d'une installation technique incluant le traitement de données et statistiques. Elle permet donc le contrôle continu et automatisé du fonctionnement d'une installation en assurant les fonctions suivantes :

- Acquisition, conditionnement et mesure de données,
- Détection et enregistrement des événements et changement d'état,
- Synthèse et présentation des informations,
- Automatisation d'actions locales ou distantes.

1.1.6. Standardisation du bâtiment intelligent : la norme KNX

KNX est une technologie qui contrôle l'automatisation des fonctions intégrales de tout bâtiment résidentiel, commercial ou industriel, comme le CVC, les systèmes d'éclairage, le multimédia, la sécurité, la gestion de l'énergie et plus encore. Le KNX est la seule norme mondiale ouverte pour la gestion de la maison et des bâtiments. Elle respecte les normes UE et ISO, et elle est approuvée dans de nombreux pays à travers le globe. KNX fonctionne en assurant que tous les composants, dispositifs, caractéristiques et fonctions de n'importe quel bâtiment (ou espace extérieur) communiquent via un langage commun instantanément et à distance.

Le bus KNX est le principal système nerveux central de tous les appareils KNX. Il s'agit d'un câble vert qui est installé en plus de l'alimentation secteur conventionnelle lors d'une nouvelle construction ou d'un projet de rénovation. Tous les différents éléments de la technique du bâtiment sont alors reliés entre eux par le bus KNX principal, conformément à la norme KNX pour l'automatisation des bâtiments.

Le système de câbles est alors géré par des capteurs, des détecteurs, des paramètres, etc., qui peuvent ensuite être contrôlés confortablement par les utilisateurs finaux à l'aide d'un ordinateur portable, d'un téléphone intelligent ou d'une tablette. [14].

2. La Communication sans fil et technologie VLC

Le concept de communication sans fil a été introduit au 19^{ème} siècle, et depuis lors, la technologie de communication sans fil a connu une croissance exponentielle. À l'heure actuelle, la plupart des appareils électroniques intègrent des fonctionnalités de connexion à un ou plusieurs types de systèmes de communication sans fil tels que le Wi-Fi, le Bluetooth ou l'infrarouge [15].

Dans cette technologie, les informations peuvent être transmises par voie aérienne sans nécessiter de câble ou de fils ou d'autres conducteurs électroniques, en utilisant des ondes électromagnétiques comme IR, RF, satellite, etc.

La technologie VLC est un sous-ensemble des communications sans fil optique (OWC, Optical Wireless Communications). Les longueurs d'onde des communications OWC comprennent la lumière infrarouge, visible et ultraviolette, tandis que les communications 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 [16].

La raison pour laquelle la VLC est devenue une technologie en soi tient du fait que sa lumière peut être vue par l'œil humain et peut donc fournir à la fois un éclairage et une communication, contrairement aux OWC qui ne peuvent fournir qu'une communication.

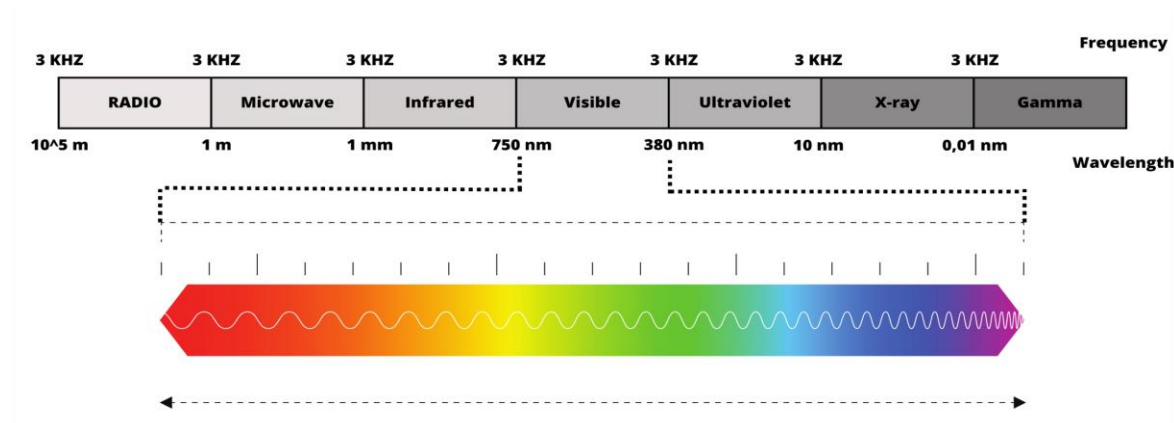


Figure 1.4: Spectre électromagnétique

Les systèmes VLC peuvent utiliser toute la gamme du spectre de la lumière visible. Le problème de la faible bande passante de la communication RF est résolu dans ces communications grâce à une grande disponibilité de la bande passante (plus de 10 000 fois supérieures à la largeur de bande du spectre RF [17]).

1.2.1. Définition d'un système de communication sans fil

Un réseau sans fil (en anglais Wireless network) est, comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaison filaire. Grâce aux réseaux sans fil, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on entend parfois parler de "mobilité ». Les systèmes de communication sans fil sont basés sur une liaison utilisant des ondes (radio, infrarouges ou lumière visible) au lieu des câbles habituels. Il existe plusieurs technologies se distinguant d'une part par la fréquence d'émission utilisée ainsi que le débit et la portée des transmissions. Les technologies de communication sans fil permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres.

1.2.2 Émergence de la technologie VLC

L'utilisation de l'optique fut l'une des premières méthodes de communication employées par l'humanité. On peut prendre pour exemple les signaux lumineux envoyés entre deux bateaux ou encore les signaux de fumées des peuples indiens d'Amérique. Très rudimentaires par leur aspect, ces techniques permettaient néanmoins de transmettre de manière rapide et efficace des informations essentielles. L'historique du concept VLC peut être synthétisé comme suite :

- **Au début des années 1800** : L'héliographe, un télégraphe solaire sans fil basé sur des éclairs réfléchis en code morse, a été mis au point par l'armée américaine. Ce dispositif permettait grâce à un miroir de renvoyer la lumière du soleil dans une direction pour communiquer en code morse.
- **1880** : Le premier véritable dispositif de communication par optique sans fil voit le jour. Le photophone d'Alexander Graham Bell permettait de transmettre le son de la voix par communication lumineuse sans fil. Bien que le photophone soit resté au stade de prototype fonctionnel, cette invention est la première utilisation complexe de la communication sans fil par lumière visible.
- **1894** : Invention du télégraphe, Cette technologie permettait de couvrir de plus grandes distances. Le photophone fût par la suite délaissé au profit du développement d'appareils utilisant les radiofréquences (RF).
- **Années 60** : Invention des premières diodes électroluminescentes LED et des dispositifs laser.
- **Années 70** : Développement des fibres optiques qui supplantent alors l'optique sans fil pour les transmissions longues distances. [18].
- **1979** : F. R. Gfeller et G. Bapst ont démontré la faisabilité technique de la communication optique sans fil en intérieur, utilisant des LEDs à infrarouge.
- **1999** : Recherches actives sur le VLC à haute vitesse. Un concept a d'abord été proposé par Pang et al. En 1999, en utilisant le feu tricolore LED comme émetteur de signal optique. Par la suite, S. Haruyama et M. Nakagawa ont étudié la possibilité de fournir un éclairage et une communication simultanés à l'aide de LEDs blanches pour les systèmes VLC.
- **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.

- **2008** : 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. Ce dernier 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 [19].
- **Travaux de normalisations actuels 2015** : Le Groupe de travail IEEE 802.15 a achevé l'élaboration de la norme IEEE 802.15.7-2011, intitulée « Communications optiques sans fil à courte portée utilisant la lumière visible »
- **Décembre 2014** : Un projet de révision de la norme IEEE 802.15.7-2011, appelé « Communications optiques sans fil » (OWC), qui comprend les techniques de communication LED-ID, les communications par caméra optique (OCC) et le LiFi, a été approuvé. L'objectif est d'élaborer une norme relative au support à transparence optique utilisant des longueurs d'onde de lumière comprises entre 10 000 nm et 190 nm.
- **2016** : Le Groupe de travail IEEE 802.11 a créé un groupe spécialisé (TIG) sur la communication optique, afin de déterminer les possibilités techniques et économiques qu'offre l'utilisation de la lumière pour les communications sans fil.
- **2017** : Le Groupe a été scindé en deux, le Groupe 802.15.7m poursuivra ses travaux sur les communications par caméra optique, tandis que le Groupe d'étude IEEE 802.15.13 sera chargé du projet « Communications optiques sans fil (OWC) à des débits de l'ordre de plusieurs gigabits par seconde », au moyen de photodiodes à haut débit. De plus, le Groupe IEEE 802.15 s'occupant des « Technologies d'assistance aux véhicules » (VAT) envisage de recourir aux communications VLC en tant qu'option de communication.
- **2018** : La Commission d'études 15 de l'UIT-T est responsable, à l'UIT-T, de l'élaboration de normes pour les infrastructures des réseaux de transport optiques, des réseaux d'accès, des réseaux domestiques et des réseaux électriques, les systèmes, les équipements, les fibres optiques et les câbles.

1.2.3 Principe de fonctionnement des VLC

Grâce à leur nature semi-conductrice, les LED ont la capacité de s'éteindre et de s'allumer d'une manière extrêmement rapide, de l'ordre de la nanoseconde, cela permet de transmettre des informations à grande fréquence. Si une LED est allumée, elle transmet un bit 1, si elle est éteinte, un bit 0. 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 Mbits/s pour le Wi-Fi, soit 100 fois plus faible [20].

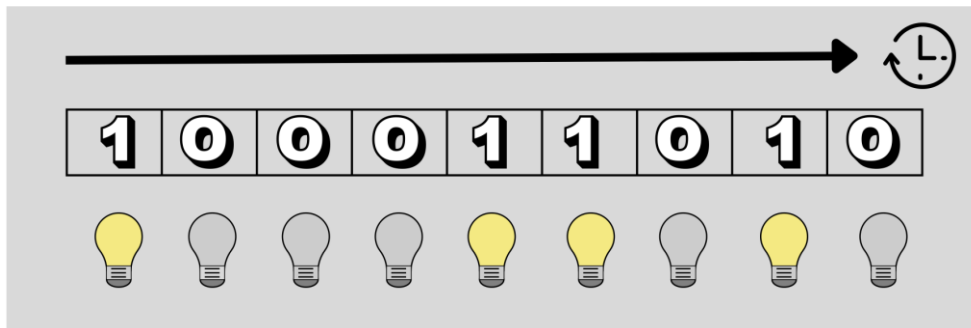


Figure 1.5: Principe de fonctionnement des VLC

1.2.4 Architecture d'un système VLC

Un système VLC est constitué principalement d'un émetteur qui module la lumière produite par les LEDs et d'un récepteur basé sur un photodétecteur, utilisé pour extraire le signal modulé de la lumière (Figure 1.6). L'émetteur et le récepteur sont séparés physiquement les uns des autres, mais sont connectés via le canal VLC [21].

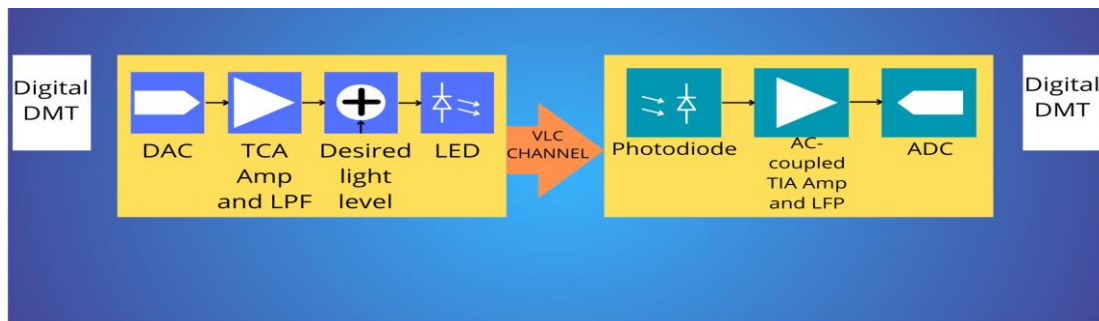


Figure 1.6: Schéma fonctionnel d'un système VLC.

1.2.4.1 Émetteur VLC

Un émetteur VLC est un dispositif transducteur électro-optique qui transmet des informations en utilisant des ondes lumineuses visibles sur un support de transmission sans fil [22]. L'émetteur est constitué d'un convertisseur numérique-analogique (DAC, Digital to Analog Converter) qui prend en charge la modulation des bits de l'information et les convertit en un signal de courant analogique, d'un amplificateur à transconductance (TCA, Transconductance Amplifier), de filtres passe-bas (LPF, Low Pass Filter) et de LEDs à haute vitesse [23]. La LED convertit un signal électrique en énergie optique fournissant à la fois un éclairage et une communication. Les informations sont codées en ligne et modulées par le DAC, puis transmises au signal optique en modulant l'amplitude ou une autre caractéristique de la lumière LED [24].

1.2.4.2. 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.

Il existe de nombreux types de photodétecteurs, tels que les photomultiplicateurs, les photoconducteurs, les phototransistors et les photodiodes, chacun possédant des qualités spécifiques. Cependant, les photodiodes sont les dispositifs les plus appréciés en tant que photodétecteur en raison de leur petite taille, de leur grande sensibilité et de leur réponse rapide. Les diodes P-I-N (Positive Intrinsic Negative Diode) et les photodiodes APD (Avalanche Photodiode) sont les types favoris de photodiodes utilisées en tant que photodétecteur [25].

1.2.5. Standardisation

Avec l'évolution rapide des technologies VLC, il a été impératif d'élaborer des normes pour standardiser les protocoles de la couche physique (PHY) et ceux de la couche de contrôle d'accès au médium (MAC, Media Access Control). De nombreux organismes nationaux de normalisation se sont intéressés à cette technologie considérée

comme très prometteuse en raison du développement rapide de l'éclairage à semi-conducteurs.

La normalisation du VLC a été réalisée par le Consortium de Communication de Lumière Visible (VLCC) au Japon et par l'organisme IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Le VLCC a publié les normes JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association) CP-1221, JEITA CP-1222 et JEITA CP-1223. La norme 802.15.7 est la norme complétée par l'IEEE en 2011 pour les couches physiques et MAC [26].

La norme IEEE 802.15.7 fournit une référence minimale pour le développement de nouveaux produits. Les trois différentes classes d'appareils prises en compte par cette norme sont les véhicules, les mobiles et les infrastructures.

En 2014, un nouveau groupe de travail 802.15.7r1 a été formé pour apporter des modifications à la norme précédente. La nouvelle norme, appelée IEEE 802.15.7r1, a été publiée en 2017 [27].

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).

Tableau 1.1 : Classification des périphériques IEEE 802.15.7

	Infrastructure	Mobile	Véhicule
Coordinateur fixe	Oui	Non	Non
Source de courant	Ample	Limité	Modéré
Facteur de forme	Non contraint	Contraint	Contraint
Source de lumière	Intense	Faible	Intense
Mobilité physique	Non	Oui	Oui
Intervalle	Court/Long	Court	Long
Débit de données	Élevé/Bas	Élevé	Bas

L'architecture IEEE 802.15.7 (Figure 1.7), est définie par un nombre de couches et de sous-couches afin de simplifier le standard. Chaque couche est responsable d'une partie de la norme et offre des services aux couches supérieures. L'interface entre les différentes couches sert à définir des liens logiques [28].

Les couches supérieures (upper layers) sont constituées d'une couche réseau et d'une couche application. La définition de ces couches n'est pas prise en charge par la norme IEEE 802.15.7. La couche LLC (Logical Link Control) peut accéder à la couche MAC par le biais de la sous-couche SSCS (Service-Specific Convergence Sub-layer). Une entité DME (Device Management Entity) est également prise en charge dans l'architecture et permet d'accéder à certains attributs associés au dimmer (gradateur) provenant du MLME (MAC Link Management Entity) et du PLME (PHY Layer Management Entity) afin de fournir des informations de gradation collectées à la couche MAC et PHY. Le DME peut également contrôler le commutateur PHY en utilisant le PLME pour la sélection des sources optiques et des photodétecteurs. Les détails du DME ne sont pas compris dans le domaine d'application de cette norme. Le commutateur PHY assure l'interface avec le point d'accès au service optique SAP (Service Access Point) et peut se connecter au support optique, qui peut être constitué d'un ou plusieurs émetteurs/récepteurs.

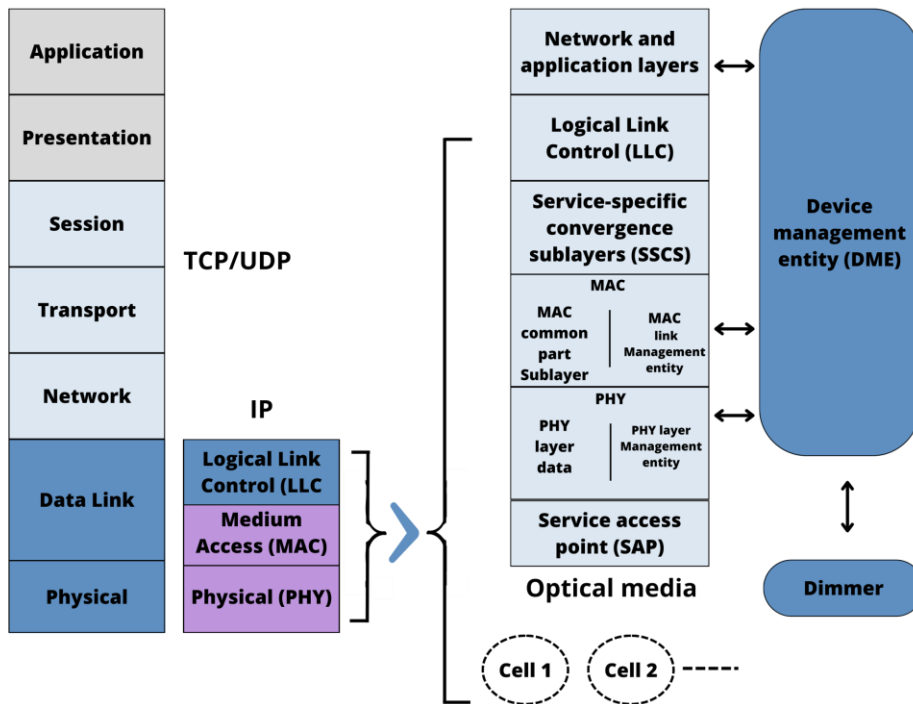


Figure 1.7: Architecture de périphérique VLC sous la norme IEEE 802.15.7.

1.2.6. Catégories de communications sans fil

Une première distinction entre les réseaux sans fils dépend de leur champ d'action. Suivant leur portée, selon le périmètre géographique offrant une connectivité (appelé zone de couverture)

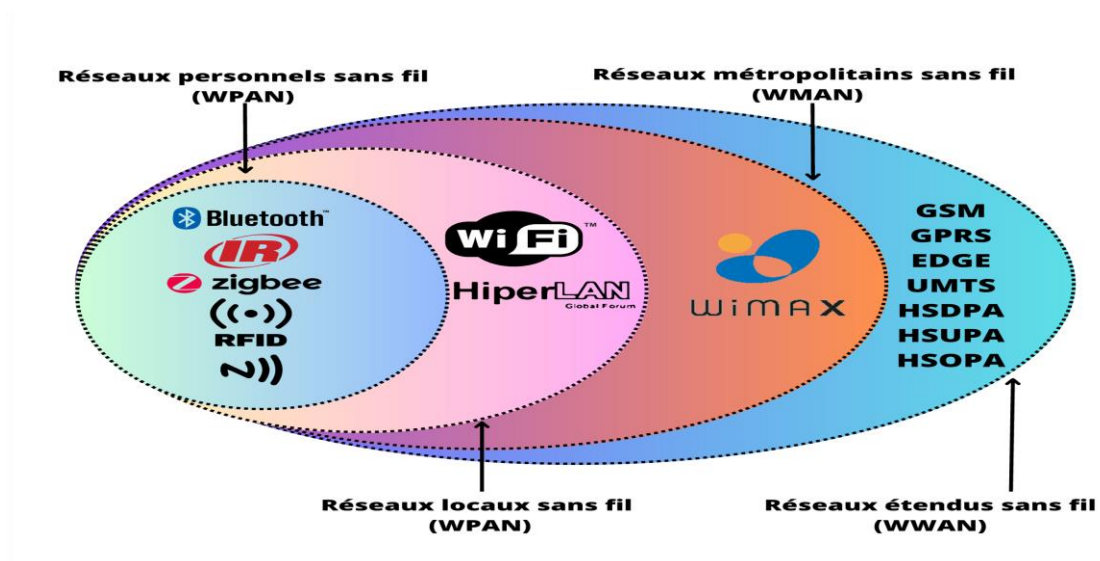


Figure 1.8 : Classification des réseaux sans fil

Il existe de nombreux systèmes utilisés pour la communication sans fil comme les mobiles, téléphones sans fil, technologie sans fil Zigbee, GPS, Wi-Fi, VLC (Li-Fi), et télévision par satellite. Les téléphones sans fil actuels incluent les réseaux 3, 4, et 5G, les technologies Bluetooth et Wi-Fi.

1.2.6.1. La radiodiffusion

La technologie de communication sans fil radio est considérée comme le premier service sans fil. C'est un exemple de système de communication où les informations sont transmises uniquement dans un sens et tous les utilisateurs reçoivent les mêmes données [29].

La radiodiffusion est née en exploitant le manque de confidentialité des communications dans la radiotéléphonie. Elle permettait de diffuser des programmes radiophoniques à un large public, ouvrant la voie aux médias de diffusion de masse comme la radio et la télévision. [30].

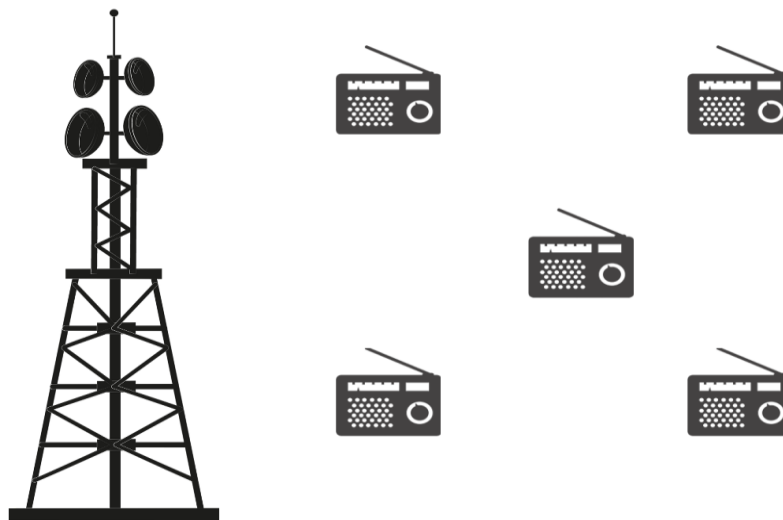


Figure 1.9: Système de radiodiffusion sans fil

Les stations radioélectriques utilisent des fréquences d'émission qui forment le spectre radioélectrique. Une utilisation rationnelle de ce spectre est essentielle pour résoudre les problèmes de radiodiffusion. Les différentes fréquences ont des caractéristiques qui affectent l'efficacité et la portée des émissions radio. La radiodiffusion partage le spectre avec d'autres services tels que la télévision, la radiotélégraphie et la radiotéléphonie à longue distance. Une gestion efficace du spectre

est nécessaire pour éviter les interférences et permettre un fonctionnement harmonieux des services [31].

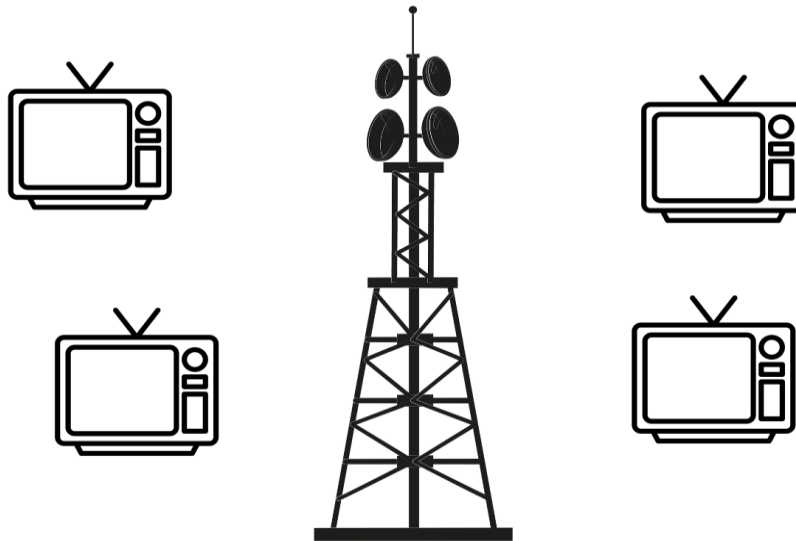


Figure 1.10: Système de radiotélévision sans fil

1.2.6.2. Communication sans fil par satellite

Le système de communication par satellite est un type important de communication sans fil. Les réseaux de communication par satellite offrent une couverture mondiale indépendante de la densité de population. Les systèmes de communication par satellite offrent la télécommunication (téléphones par satellite), le positionnement et la navigation (GPS), la radiodiffusion, Internet, etc. D'autres services sans fil comme le mobile, la radiodiffusion télévisuelle et d'autres systèmes radio dépendent des systèmes de communication par satellite.

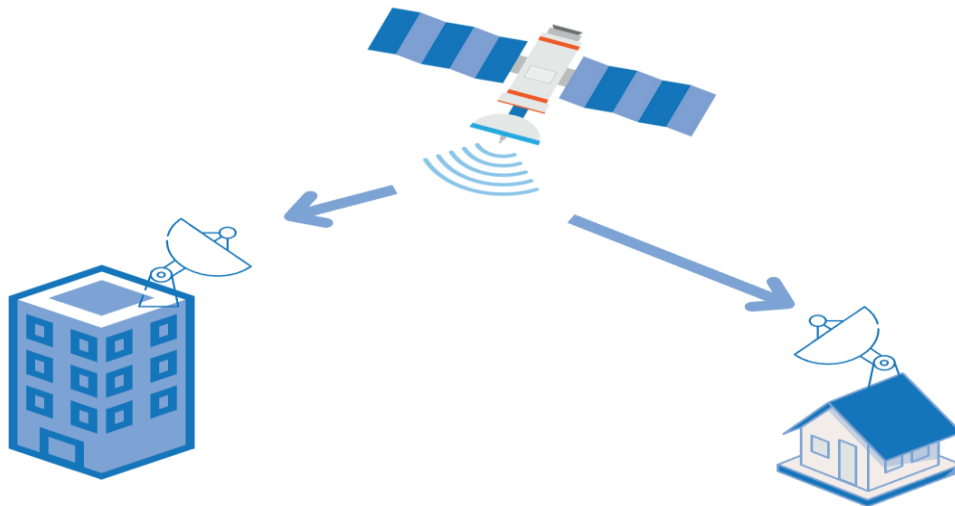


Figure 1.11: Communication sans fil par satellite

La communication par satellite est une technologie sans fil mondiale utilisée pour maintenir la connectivité. Elle envoie des signaux vers des satellites en orbite, qui les renvoient vers des récepteurs terrestres. Elle couvre de vastes zones géographiques et est utilisée pour les communications, l'accès à Internet, la télévision par satellite, etc. En résumé, la communication par satellite offre une connectivité mondiale grâce à des satellites en orbite et des équipements terrestres [32].

Les satellites sont essentiels dans l'économie numérique actuelle, utilisés dans de nombreux secteurs tels que l'agriculture, les services bancaires et les transports. Ils sauvent des vies, protègent l'environnement et contribuent à atteindre les objectifs de développement durable. Les innovations telles que les petits satellites, les satellites à haut débit et ceux en orbite basse offrent des solutions économiques pour connecter les populations non connectées et améliorer les services [33].

1.2.6.2.1. Réseaux étendus sans fil (WWAN) : Téléphonie mobile cellulaire

Le téléphone mobile connaît alors un succès mondial, bien au-delà de ce que l'on a pu imaginer au départ. En 2007, avec quelque 3,4 milliards de téléphones mobiles en service dans le monde, 50 % de la population mondiale est équipée. À la fin 2015, les réseaux de téléphonie sans fil couvrent presque tous les pays et le nombre de terminaux mobiles en service dépasse les 7 milliards [34].

Le réseau étendu sans fil (WWAN pour Wireless Wide Area Network) est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu

sans fil. Les principales technologies sont les suivantes : • GSM (Global System for Mobile Communication ou en français Groupe Spécial Mobile), • GPRS (General Packet Radio Service), • UMTS (Universal Mobile Télécommunication System) [35].



Figure 1.12: Téléphonie mobile cellulaire

Les réseaux mobiles sont classés en générations pour représenter leur avancement. Les téléphones mobiles permettent à de nombreux utilisateurs de communiquer sur une seule bande de fréquences. Les téléphones cellulaires offrent une large couverture grâce à une gamme étendue de réseaux, tandis que les téléphones sans fil ont une portée limitée. Certains téléphones utilisent les signaux satellites, comme les appareils GPS, pour faciliter la communication [36].

1.2.6.2.2. La communication infrarouge

La communication sans fil infrarouge communique des informations dans un appareil ou des systèmes par rayonnement infrarouge (IR). L'IR est une énergie électromagnétique à une longueur d'onde plus longue que celle de la lumière rouge. Elle est utilisée pour le contrôle de sécurité, la télécommande du téléviseur et les communications à courte portée.



Figure 1.13: Communication sans fil infrarouge

La communication infrarouge utilise le rayonnement infrarouge pour transférer des informations entre des appareils tels que les téléphones mobiles, les téléviseurs et les ordinateurs portables. Elle nécessite un émetteur LED et un récepteur diode pour une transmission réussie. La communication infrarouge permet une transmission sans fil en utilisant la lumière infrarouge invisible [37].

La communication infrarouge utilise les ondes infrarouges du spectre électromagnétique (EM), les rayons infrarouges sont des ondes électromagnétiques de fréquence plus élevée que celle des ondes radio : entre 300 GHz et 385 THz. Ils portent ce nom car, sur l'échelle des fréquences du spectre électromagnétique, ils sont juste avant (infra) le rouge de la lumière visible. La gamme des infrarouges couvre donc les longueurs d'onde allant 700 nm à 1 mm [38].

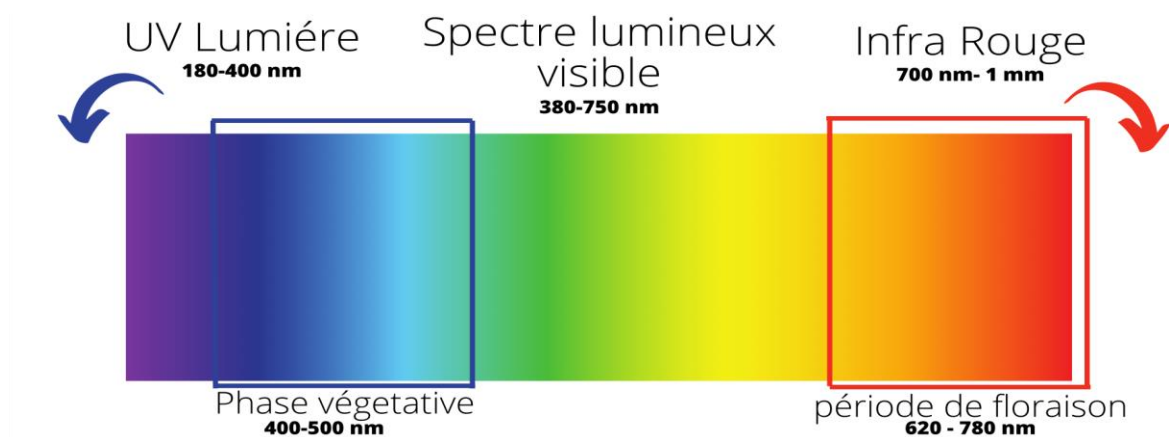


Figure 1.14: Spectre de fréquences des ondes infrarouges

L'infrarouge a une propagation limitée et est sensible aux perturbations lumineuses. Sa portée est courte et aucun obstacle ne doit être présent sur le trajet [39].

1.2.6.2.3.WLAN (Wi-Fi)

Le Wi-Fi est une communication sans fil utilisée par divers appareils électroniques tels que les téléphones intelligents, les ordinateurs portables, etc. Un routeur agit en tant que centre de communication sans fil. Les utilisateurs doivent se trouver à proximité du routeur pour se connecter. Le Wi-Fi offre une portabilité sans fil, mais nécessite des mots de passe pour assurer la sécurité et empêcher l'accès non autorisé [40].

La technologie de communication sans fil Wi-Fi fonctionne avec des ondes radio dans une bande de fréquence de 2,4 ou 5 GHz, il permet de relier des équipements informatiques et de téléphonie mobile dans un réseau sans fil haut débit. Les vitesses de connexion varient selon la norme 802.11 utilisée :

- 54 Mbit/s (théoriques, portée de 10 mètres) pour le 802.11a ;
- 11 Mbit/s (théoriques) avec du 802.11b (le plus répandu, portée théorique de 300 mètres) ;
- 1,3 Gbit/s pour le 802.11ac dont la norme a été ratifiée en janvier 2014.

Le Wi-Fi en intérieur peut traverser des obstacles tels que des murs en béton armé ou des étages, mais cela réduit le débit à 1 Mbit/s et limite la portée à 15 mètres. En général, la portée en intérieur est d'environ 25 mètres dans un environnement dense de 50 mètres si les obstacles sont minimales.



Figure 1.15: Communication sans fil par Wi-Fi

La norme IEEE 802.11 a été publiée en 1997 et a connu des évolutions pour améliorer le débit, la sécurité et la compatibilité du Wi-Fi. Les ordinateurs iBook d'Apple ont été les premiers à intégrer le Wi-Fi à partir de 1999, popularisant ainsi le terme « Wi-Fi ». Aujourd'hui, le Wi-Fi est largement utilisé dans les environnements domestiques, professionnels et publics pour l'accès à Internet et les communications VoIP. Les utilisateurs sont encouragés à sécuriser leur réseau Wi-Fi avec un mot de passe pour éviter les utilisations frauduleuses et leur responsabilité légale est engagée [41].

1.2.6.2.4. Bluetooth

Le Bluetooth est une technologie de communication sans fil, la fonction principale du Bluetooth est de vous permettre de connecter sans fil divers appareils électroniques à un système de transfert de données. Les téléphones portables sont connectés à des écouteurs mains libres, une souris, un clavier sans fil. En utilisant un appareil Bluetooth, les informations sont transmises d'un appareil à un autre appareil. Cette technologie a diverses fonctions et elle est couramment utilisée sur le marché des communications sans fil. Le Bluetooth est un système de communication sans fil à faible portée important. Il offre une transmission de données, de voix et audio avec une portée de transmission de 10 mètres. Presque tous les téléphones mobiles, tablettes et ordinateurs portables sont équipés d'appareils Bluetooth. Ils peuvent être connectés à des récepteurs Bluetooth sans fil, des équipements audios, des caméras, etc [42].

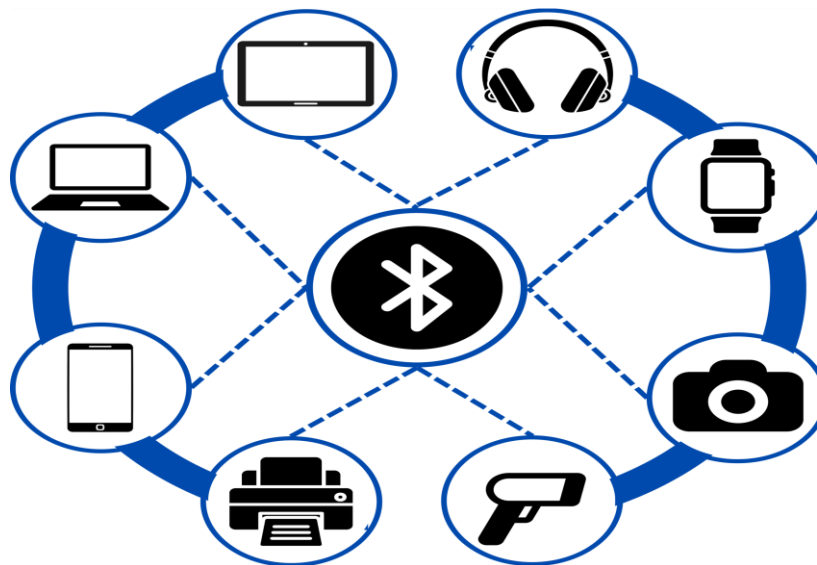


Figure 1.16: Communication sans fil par Bluetooth

Le Bluetooth et le Wi-Fi exploitent la même bande de fréquences, celle des 2,4 GHz. La comparaison s'arrête là puisque le Bluetooth et le Wi-Fi ne répondent pas du tout aux mêmes usages. Le Wi-Fi est beaucoup plus performant, mais plus gourmand en énergie et plus complexe donc plus cher. Au contraire, le Bluetooth possède une bande passante plus faible et sert plutôt à transmettre des données légères [43].

1.2.6.2.5. Communication sans fil par la lumière visible

L'arrivée de diodes électroluminescentes (LED) plus puissantes et plus rapides a permis de penser à leur utilisation comme des transmetteurs d'information. La lumière émise par les LED devient un canal de communication sans fil permettant des applications dans des espaces intérieurs et dans certains cas dans des espaces ouverts. Nous connaissons ce type de communications sous le nom de « Li-Fi ».

Le Li-Fi (de light fidelity ou visible light communications, 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. La façon la plus simple d'expliquer la transmission d'information est d'imaginer qu'une unité de temps d'éclairage peut être interprétée comme une valeur logique égale à 1 tandis qu'une unité de temps de la LED éteinte serait un 0 logique. Les types de modulation vont du OOK (on-off keying) au QAM (quadrature amplitude modulation). La capacité de commutation de la LED est très importante, ce qui permettrait la transmission d'information à haut débit (1 Gb/s) [44].

Les communications VLC utilisent le spectre visible (longueurs d'onde comprises entre 390 et 750 nm) et peuvent fournir des communications hertziennes au moyen d'éléments d'éclairage et d'affichage. Les communications optiques sans fil (OWC) permettent de réduire l'encombrement dans les bandes de fréquences inférieures (RF), étant donné que la lumière peut être utilisée comme ressource spectrale additionnelle pour les communications à large bande [45].

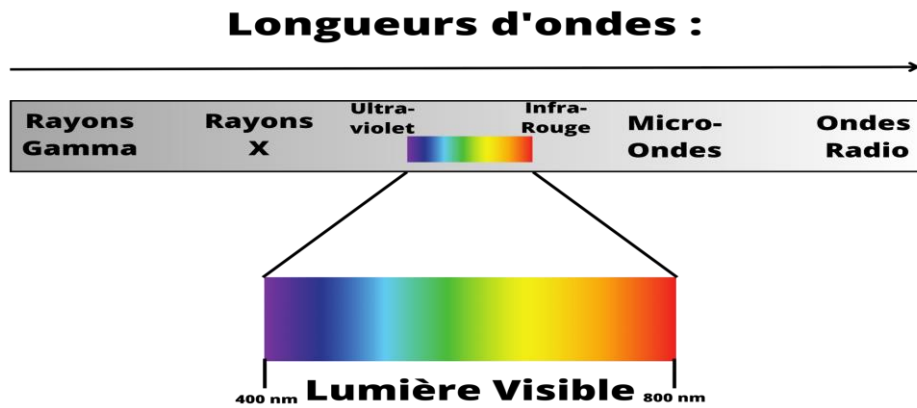


Figure 1.17: Spectre de fréquence de la lumière visible

1.2.6. Avantages et inconvénients des réseaux sans fil

1.2.6.1. Avantages pour les utilisateurs :

- La portabilité : un ordinateur portable ou un ordinateur de poche suffit pour se connecter.
- Le choix du lieu de connexion, sous contrainte d'être toujours sous la couverture du réseau.
- La flexibilité : la connexion est indépendante de la marque ou des caractéristiques techniques des appareils connectés. Seules les cartes réseaux doivent garantir une compatibilité avec la norme à laquelle elles font référence.
- La facilité : pas de câble signifie moins d'encombrement. Les appareils sur le marché tendent à se connecter automatiquement.
- La mobilité : les utilisateurs peuvent se déplacer sans couper la connexion au réseau.
- Le prix : ils tendent à baisser suivant l'évolution du marché. Il est difficile d'acheter un ordinateur portable sans carte réseau sans fil intégrée.

1.2.6.2. Avantages pour les responsables du déploiement du réseau sans fil :

- D'abord, moins de câble à déployer, et donc une diminution de l'investissement en câble ainsi que la charge de travail lors de l'installation.
- Ensuite, facilité et souplesse de déploiement : une machine supplémentaire peut se connecter sans pour autant réserver un espace tel qu'une prise RJ45. Qu'il y ait 10

ou 15 machines utilisateurs, la différence n'est pas aussi critique qu'avec un réseau filaire, en termes d'espace de connexion (et pas en termes d'analyse réseau).

- Enfin, le prix : Une solution sans fil peut être largement moins chère pour une entreprise. Toutefois, une sérieuse analyse est nécessaire en tenant compte des particularités des utilisateurs de l'entreprise.

1.2.6.3. Les inconvénients des réseaux sans fils

- Le premier consiste à disposer d'un débit souvent plus faible qu'un réseau câblé.
- Le deuxième consiste, selon les cas, en une atténuation rapide du signal en fonction de la distance qui induit l'impossibilité pour un émetteur de détecter une collision au moment même. En effet, le médium utilisé est dit half-duplex, ce qui correspond à un médium sur lequel l'émission et la réception sont impossibles en même temps.
- Le troisième réside dans l'inévitabilité des interférences. Les transmissions radios ne sont pas isolées, et le nombre de canaux disponibles est limité, ce qui force le partage. Les interférences peuvent être de diverses natures, à savoir des émetteurs travaillant à des fréquences trop proches ; des bruits parasites dûs à l'environnement ; des phénomènes d'atténuation, de réflexion et de chemins multiples dûs à l'environnement...
- Le quatrième réside dans les limitations de la puissance du signal par des réglementations strictes en vigueur.
- Le cinquième réside dans la limitation de l'énergie par l'autonomie de batteries. En effet, les applications relatives aux réseaux sans fil ont un caractère nomade, portable. Émettre ou recevoir des données consomme de l'énergie.
- L'avant-dernier problème réside dans la faible sécurité : il est facile « d'espionner » passivement un canal radio.
- Enfin, le dernier réside dans les changements provoqués par la mobilité des nœuds sur la topologie du réseau [46].

3. Communications VLC dans la maison intelligente

À l'heure actuelle, les maisons intelligentes comprennent différents types d'appareils ménagers, d'un système de gestion de l'énergie, d'un système de soins de santé, des services multimédias modernes et d'un système de surveillance et de sécurité, qui fonctionnent grâce à une connectivité filaire et sans fil complexe.

Les dispositifs connectés destinés à la maison intelligente peuvent être utilisés de manière interactive et indépendante et ces fonctionnalités améliorent à divers égards la qualité de vie au sein du ménage : automatisation des tâches courantes, fourniture de services de soins de santé, rationalisation de la consommation d'énergie, amélioration de l'efficacité individuelle et renforcement de la sécurité à domicile, loisirs, etc.

La maison intelligente utilise le réseau sans fil local et s'appuie sur des normes telles que le réseau local (LAN), le réseau corporel (BAN) ou le réseau personnel (PAN), termes utilisés pour décrire un réseau d'envergure plus limitée dont la portée est comprise entre 12 et 100 m, (Bluetooth, ZigBee, WiFi, Z-Wave, etc., par exemple). Les communications VLC peuvent servir à connecter des dispositifs transmettant des informations sensibles, par exemple des caméras de vidéosurveillance, des babyphones etc., et peuvent constituer un réseau plus privé et sécurisé.

Conclusion

Ce chapitre présente les principes de base des communications par lumière visible et l'architecture d'un tel système. Les avantages de cette technologie ont également été identifiés. Toutes ses caractéristiques avantageuses conduisent à considérer que la technologie de communication par lumière visible constitue un complément, voire dans certaines situations une alternative prometteuse aux systèmes de communications traditionnels par RF, particulièrement en DOMOTIQUE.

Cependant, comme toute technologie, le VLC rencontre à son tour des contraintes et des limites. Les principaux points faibles du VLC ont été détaillés au cours de ce chapitre. Les technologies de communication par lumière visible, actuellement en développement, peuvent palier à certains de ses défauts, et même créer de nouvelles opportunités.

Les bases technologiques utilisées par ces nouveaux moyens de communication, comme la LED, arrivent à maturation. Cela permettra donc de bonnes performances techniques et énergétiques ainsi qu'un coût de déploiement contenu. De nombreuses applications sont possibles en faveur d'une construction sécurisée, économe en énergie, à faible impact environnemental et capable de s'adapter à n'importe lequel des chocs (situations de sinistres) ; ceci en passant par le Li-Fi ; une technologie qui sera abordée en détail lors du prochain chapitre.

Chapitre 2: Introduction à la technologie LI-FI

Introduction :

Actuellement, le Wifi est la technologie sans fil prépondérante dans le monde entier. Cependant, cette technologie présente certaines limitations, telles que des interférences, une portée limitée et une saturation des fréquences disponibles.

Afin de palier à ces limitations, la dernière technologie connue sous le nom de Li-Fi serait une bonne alternative. La technologie Wi-Fi et Li-Fi sont utilisées pour la transmission sans fil, mais elles sont très différentes car le Wi-Fi utilise des ondes radio et le Li-Fi fonctionne en utilisant la lumière visible. Le terme Li-Fi a été fondé par le professeur Harald Haas en 2011 lorsqu'il a démontré la transmission de données via une diode électroluminescente (LED) modulant son intensité à une fréquence si élevée que l'œil humain ne peut la percevoir.

Cette technologie est donc prometteuse pour l'avenir, car elle utilise le spectre infrarouge et la lumière visible, qui est environ 2600 fois plus grande que la bande passante du spectre radio. Elle pourrait être un complément à la communication RF (réseau Wi-Fi ou cellulaire), voir même un remplacement dans des contextes de diffusion de données. Jusqu'ici, le Li-Fi est environ 100 fois plus rapide que certaines applications Wi-Fi, atteignant des vitesses de 224 gigabits par seconde.

Au cours de ce chapitre, seront détaillés les caractéristiques de la technologie Li-Fi, son principe conceptuel et fonctionnel, sa distinction des VLC, ses atouts face au Wi-Fi ainsi que ses outils et techniques de mise en application.

Suite à cela, sera présentée **une première application d'un modèle bidirectionnel de communication Li-Fi suivi d'une discussion des résultats.**



Figure 2.1: Présentation du Li-Fi

2.1.Définition de la technologie Li-Fi

Le Li-Fi est un acronyme pour Light Fidelity (fidélité lumineuse en français), un nom qui fait immédiatement référence au Wi-Fi ou encore à la haute fidélité sonore, le hi-Fi. [47] C'est un système de communication sans fil à lumière visible bidirectionnel à haute vitesse ; entièrement connecté. Contrairement au Wi-Fi qui utilise les ondes radio, le Li-Fi est une technologie qui permet de transmettre des données en utilisant la partie visible du spectre électromagnétique (la lumière).

Les ampoules LED, dont l'intérêt principal est d'être particulièrement économe en énergie, sont en effet très réactives. Elles peuvent être allumées ou éteintes à une vitesse imperceptible à l'œil humain. Le Li-Fi, va moduler très vite l'intensité lumineuse pour créer un signal qui pourra être interprété par un récepteur.

2.2.Emergence et évolution du Li-Fi

Le concept du Li-Fi a été inspiré en 2011 par une idée novatrice du professeur Harald Haas, spécialiste des communications mobiles à l'Université d'Édimbourg. Lors d'une conférence TED Global, Haas a présenté sa vision intitulée "Wireless data from every light bulb" (ou "Communication sans fil depuis n'importe quelle ampoule"). C'est à partir de cette présentation que le Li-Fi a commencé à prendre forme et à susciter un grand intérêt dans le domaine des communications sans fil.

Depuis lors, de nombreuses organisations se sont engagées à faire progresser les systèmes de communication optique sans fil à haut débit. Voici une chronologie des événements marquants l'évolution du concept Li-Fi :

- En 2004, des démonstrations de systèmes d'éclairage à LED ont été réalisées au Japon pour la transmission rapide de données vers des appareils informatiques portables et embarqués dans des véhicules.
- En 2005, des essais terrestres de communications par VLC (Visible Light Communications) ont été effectués au Japon pour transmettre des informations vers des téléphones mobiles, avec des débits estimés à 10 kbps et plusieurs Mbps en utilisant la lumière fluorescente et les LED.
- En 2007, une démonstration a été réalisée au Japon où un téléviseur à écran LCD rétroéclairé par LED transmettait des informations à un PDA via la lumière.
- La même année, le Visible Light Communications Consortium (VLCC) au Japon a proposé des normes pour les systèmes de communication par lumière visible et le système d'identification de la lumière visible, qui ont été acceptées par JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association) en tant que JEITA CP-1221 et JEITA CP-1222.
- En 2008, des normes mondiales ont été élaborées pour les réseaux domestiques utilisant l'OWC (Optical Wireless Communications), avec les technologies infrarouge (IR) et VLC. Des démonstrations de VLC utilisant cinq LED ont atteint des débits de données supérieurs à 100 Mbps sur des distances de quelques mètres en utilisant une ligne de visée directe.
- En 2009, le VLCC a publié sa première norme de spécification, intégrant et développant les spécifications de base de l'IrDA (International Infrared Data Association) et définissant un spectre pour permettre l'utilisation des longueurs d'onde de la lumière visible.
- En 2010, la technologie VLC a été développée pour les communications entre une large gamme de produits électroniques tels que les téléviseurs haute définition, les kiosques d'information, les ordinateurs personnels, les assistants numériques personnels, les smartphones, etc.
- En 2011, une démonstration en temps réel d'un système VLC basé sur l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) à 124 Mbps a été réalisée en utilisant une LED blanche phosphorescente prête à l'emploi à l'Université d'Édimbourg, au Royaume-Uni.
- En 2014, une société russe appelée StinsComan a annoncé des avancées dans le réseau local sans fil Li-Fi, connu sous le nom de BeamCaster, capable de transférer des données à une vitesse spectaculaire de 1,25 gigaoctet par seconde (Go/s) [48].

- En 2016, une société française nommée Lucibel a testé un prototype de luminaire bidirectionnel et haut débit Li-Fi au siège du constructeur immobilier Sogreprom en France [49].
- En 2018, la startup française Oledcomm a présenté la MyLiFi, une lampe de bureau LED qui diffuse une connexion Internet sans fil via la lumière en utilisant la technologie Li-Fi.
- En 2019, Oledcomm a présenté le LiFiMax, offrant des débits descendants de 100 Mbit/s et des débits montants de 40 Mbit/s.
- En 2023, la société francilienne Oledcomm a dévoilé une nouvelle version de sa technologie Li-Fi, avec une vitesse doublée à 2 Gbit/s, destinée aux applications de transmission de données dans les usines et les transports du futur [50].

2.3. Domaines d'application du Li-Fi

- a) **Systèmes éducatifs** : La vitesse rapide d'accès à Internet est fournie par le Li-Fi. Ainsi, il peut remplacer le Wi-Fi dans les organisations universitaires pour permettre aux gens d'exploiter les capacités de transfert de données à haute vitesse du Li-Fi.
- b) **Hôpitaux** : Dans les salles d'opération, le Wi-Fi n'est pas autorisé en raison des radiations. Dans les cliniques, l'utilisation du Wi-Fi perturbe le signal de l'équipement de surveillance. Cela a un impact dangereux sur le bien-être du patient, en raison d'un fonctionnement erroné de l'appareil médical. Pour ces raisons, Li-Fi peut être utilisé pour accéder à Internet et aussi pour réguler les appareils médicaux. Cela serait utile pour l'exploitation de chirurgies robotiques et d'autres procédures automatisées.
- c) **Compagnies aériennes** : Dans les avions, le Wi-Fi n'est pas utilisé, car il pourrait avoir un effet évasif sur les membres d'équipage. De même, les voyageurs à bord d'appareils aériens, sont autorisés à Internet à vitesse modérée. Dans les avions, les LED aériennes peuvent être utilisées comme support de transmission de données sans interférer avec les ondes radio.
- d) **Centrales électriques plus intelligentes** : Les interférences par ondes radio peuvent être terribles sur les zones sensibles des centrales électriques. Mais pour contrôler des éléments tels que l'intégrité du réseau ou la température centrale, les centrales électriques ont besoin d'un système de données rapide et interconnecté. Une centrale électrique peut économiser d'énormes capitaux, si elle est contrôlée

et surveillée de manière appropriée et systématique. Ici, le Li-Fi peut être utilisé pour offrir une connectivité sûre et élevée pour ces équipements sensibles.

- e) **Exploitation sous-marine** : La capacité d'exploration des véhicules radiocommandés sous mer est souvent limitée en raison de l'utilisation de câbles pour recevoir des signaux et de l'énergie. Si les fils sont remplacés par des sources lumineuses, une zone beaucoup plus grande pourrait être explorée. Un système Li-Fi peut fonctionner sous l'eau, contrairement à Wireless Fidelity, qui perd partiellement ses fonctionnalités sous l'eau.
- f) **Gestion du trafic** : La nouvelle technologie Light-Fidelity peut être d'un utile apport dans la communication de véhicule à véhicule, et peut donc être utilisée pour la gestion du trafic.
- g) **Communication multi-utilisateur** : Li-Fi peut être un support commun de communication : le réseau se prête au partage multiple en utilisant une seule instance connue sous le nom de diffusion.
- h) **Points d'éclairage utilisés comme point d'accès** : Certains dispositifs d'éclairage tels que les phares des véhicules, les lampadaires, etc. sont capables de fournir une grande connectivité Internet via VLC (communication par lumière visible) et nous aider à créer des « hotspot » à faible coût.

2.4. Avantages du Li-Fi

Les avantages du Li-Fi peuvent être résumés aux points suivants :

- Le Li-Fi résout le problème concernant la résolution de l'insuffisance de la bande passante RF.
- **Vitesse** : Le taux de transmission de données Li-Fi est de 10 Go par seconde.
- **Entretien** : Li-Fi est facile à installer et nécessite un minimum d'entretien.
- **Sécurité et confidentialité** : Le Li-Fi offre un niveau élevé de sécurité et d'intimité, car les ondes lumineuses ne peuvent pas pénétrer à travers des structures opaques et la communication de données est en ligne de vue (LOS). Cela empêchera l'utilisation indésirable du signal Li-Fi par des personnes non autorisées.
- **Technologies de l'information vertes** :

Les ondes radio présentent des risques pour l'environnement et peuvent entraîner des problèmes de santé tels que des maux de tête, de la faiblesse, de l'asthme et même le cancer. Le Li-Fi offre ainsi une solution plus sûre pour le corps humain, car il utilise la lumière visible et non les fréquences radio

2.5. Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi

Comme le montre la comparaison reportée sur le tableau 2.1, le Li-Fi offre de nombreux avantages par rapport au Wi-Fi, tels que l'augmentation de la qualité, de la vitesse, de la protection maximale, etc. Malgré le fait que le Li-Fi offre une sécurité renforcée à l'accès aux informations à partir d'un point externe au centre de données, des problèmes de cybersécurité et de confidentialité existent à l'intérieur de ce dernier.

Tableau 2.1 : Comparaison entre le Li-Fi et le Wi-Fi

Critère de comparaison	Light Fidelity (Li-Fi)	Wireless Fidelity (Wi-Fi)
IEEE Standard	802.15.7	802.11b
Composants du système	Pilote de lampe, ampoule LED et détecteur de photo	Routeurs et périphérique d'abonné Stations (ordinateurs portables, PDA, ordinateurs de bureau)
Technologie	Appareils basés sur IrDA	WLAN 802.11a/b/g/n/ac/ad Appareils standard
Topologie	Point à point	Point à Multipoint
Transmission de données	Bribes	Ondes radio
Fréquence	10000 fois de Wi-Fi	Portée du spectre radioélectrique
Bande de fréquence	100 fois de Téra Hz	2,4 GHz, 4,9 GHz et 5 GHz

Tableau 2.1 (Suite)

Critère de comparaison	Light Fidelity (Li-Fi)	Wireless Fidelity (Wi-Fi)
Vitesse de transfert de données	1 à 3,5 Gbit/s	WLAN-11n offre 150Mbps, Wi-Giga / Giga-IR offre environ 1-2 GBP offre environ 1-2 Gbps
Zone de couverture	10 mètres	20 - 100 mètres varient en fonction de Type de puissance de transmission et Antenne
Fonctionnement	Transmission de données par la lumière des ampoules LED	Transmission de données par radio Ondes avec routeur Wi-Fi
Interférence	Aucun problème d'interférence avec les ondes RF	Interférer avec le point d'accès voisin Routeurs
Impact écologique	Bas	Haut
Vie privée	Transfert de données plus sécurisé	Les RF ne peuvent pas être empêchées par des murs de briques et donc par une transmission de données moins sûre
Données Densité	Travail à haute densité Environnement	Environnement moins dense lié aux problèmes de brouillage

2.6. Contraintes et défis de conception Li-Fi

La communication par la lumière visible présente certains inconvénients à prendre en compte. Elle est sensible aux interférences causées par des objets opaques et des sources lumineuses externes, ce qui peut réduire la précision de transmission des données en cas d'obstruction dans le champ de vision. De plus, l'adoption du Li-Fi nécessite un investissement initial élevé et engendre des coûts d'installation importants. La portée du Li-Fi est également limitée, car contrairement aux ondes radio, la lumière ne peut pas traverser les murs. Pour transmettre des données sur de plus longues distances en utilisant un laser, une ligne de visée claire et dégagée est requise. Malgré ces limitations, le Li-Fi offre des avantages en termes de sécurité et de bande passante, ce qui le rend attrayant pour certaines applications spécifiques.

2.7.Fonctionnement de la communication Li-Fi

La figure 2.2 illustre le schéma fonctionnel de base de la transmission de données dans un système Li-Fi.

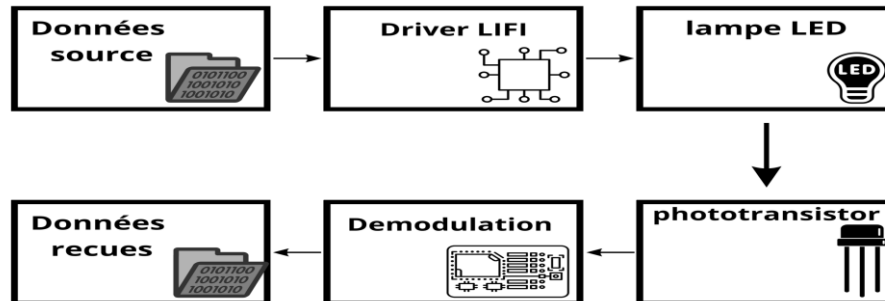


Figure 2.2 : Schéma fonctionnel de la communication Li-Fi.

Comme tout système de transmission, le Li-Fi est composé d'un émetteur et d'un récepteur qui exécutent différentes fonctions pour permettre la communication sans fil via la lumière.

1. Envoi des informations numériques dans le réseau électrique :

L'émetteur Li-Fi reçoit les données numériques à transmettre. Tout d'abord, ces données sont converties en signaux électriques. Cette conversion peut être réalisée par un modulateur qui module le courant électrique avec les données à transmettre. Le modulateur ajuste l'intensité du courant électrique pour représenter les 0 et les 1 binaires correspondant aux données numériques.

Une fois les données converties en signaux électriques, elles sont injectées dans le réseau électrique via des dispositifs d'accès appropriés. Ces dispositifs peuvent être des amplificateurs ou des coupleurs qui permettent d'injecter les signaux électriques dans le câblage électrique existant. Ainsi, les informations numériques sont transmises dans le réseau électrique et peuvent être acheminées vers les points d'accès Li-Fi ou directement vers les LED modulantes.

2. Conversion du signal électrique en signaux lumineux :

Une fois que les signaux électriques atteignent les LED modulantes, ces dernières les transforment en signaux lumineux. Les LED utilisées pour le Li-Fi sont spécialement conçues pour pouvoir être modulées rapidement en réponse aux variations des signaux électriques. Elles peuvent émettre de la lumière visible ou proche du spectre de la lumière et leur intensité lumineuse varie en fonction des signaux électriques reçus. La

modulation de la lumière émise par les LED permet de transporter les données numériques. Les variations d'intensité lumineuse sont utilisées pour représenter les bits de données. Par exemple, une haute intensité lumineuse peut représenter un "1" binaire, tandis qu'une faible intensité lumineuse peut représenter un "0" binaire. La rapidité de la modulation des LED permet d'obtenir des débits de données élevés dans le Li-Fi.

3. Réception et traitement des signaux lumineux :

Du côté du récepteur Li-Fi, les signaux lumineux sont captés par des photorécepteurs sensibles à la lumière, tels que des photodiodes. Ces photorécepteurs convertissent les variations d'intensité lumineuse en signaux électriques correspondants. Les signaux électriques sont ensuite traités pour extraire les données transmises. Le traitement des signaux lumineux reçus peut impliquer plusieurs étapes, telles que l'amplification, la démodulation et le décodage des signaux électriques. Des techniques de détection et de correction d'erreurs peuvent également être utilisées pour améliorer la fiabilité de la transmission des données.

Une fois les données extraites des signaux lumineux, elles peuvent être utilisées par les dispositifs récepteurs pour les applications souhaitées, comme l'affichage d'informations sur un écran, le transfert de données vers un réseau informatique, etc. (figure 2.3).

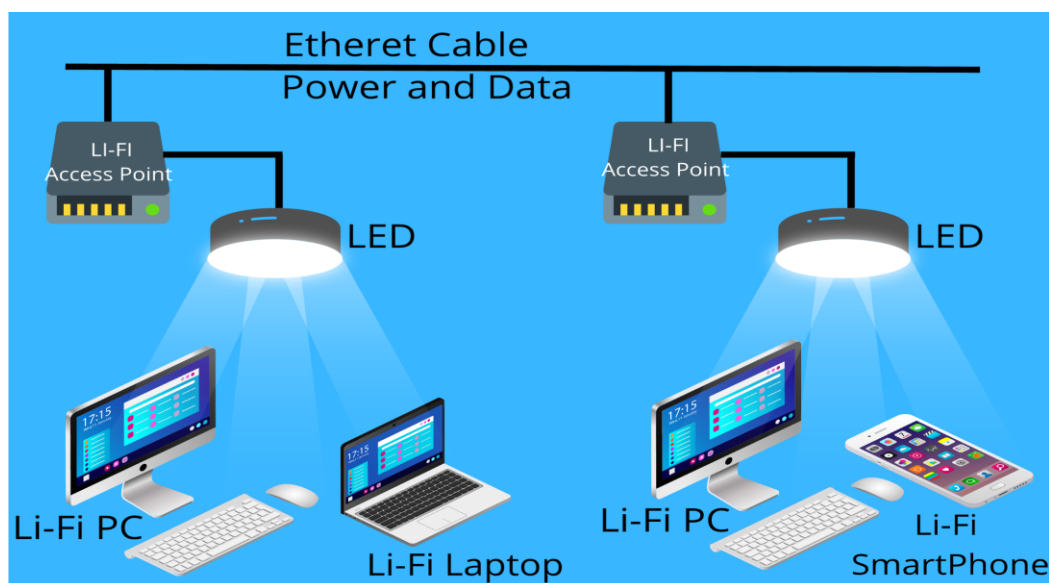


Figure 2.3 : Fonctionnement du système de communication Li-Fi.

2.8. Catégories de modulation dans un système Li-Fi

La technologie Li-Fi possède plusieurs techniques de modulation. Ces techniques sont nécessaires pour que la communication reste disponible même si l'éclairage n'est pas requis. De ce fait, une technique de modulation peut prendre en charge une illumination constante. L'intensité de la lumière varie en fonction de l'information contenue dans le signal du message. Parmi les types de modulation utilisés pour cette technologie : **la modulation à porteuse unique** (SCM, Single Carrier Modulation), **la modulation à porteurs multiples** (MCM, Multi Carrier Modulation) et la modulation de couleur. La figure 2.4 illustre les différentes modulations pour un système Li-Fi.

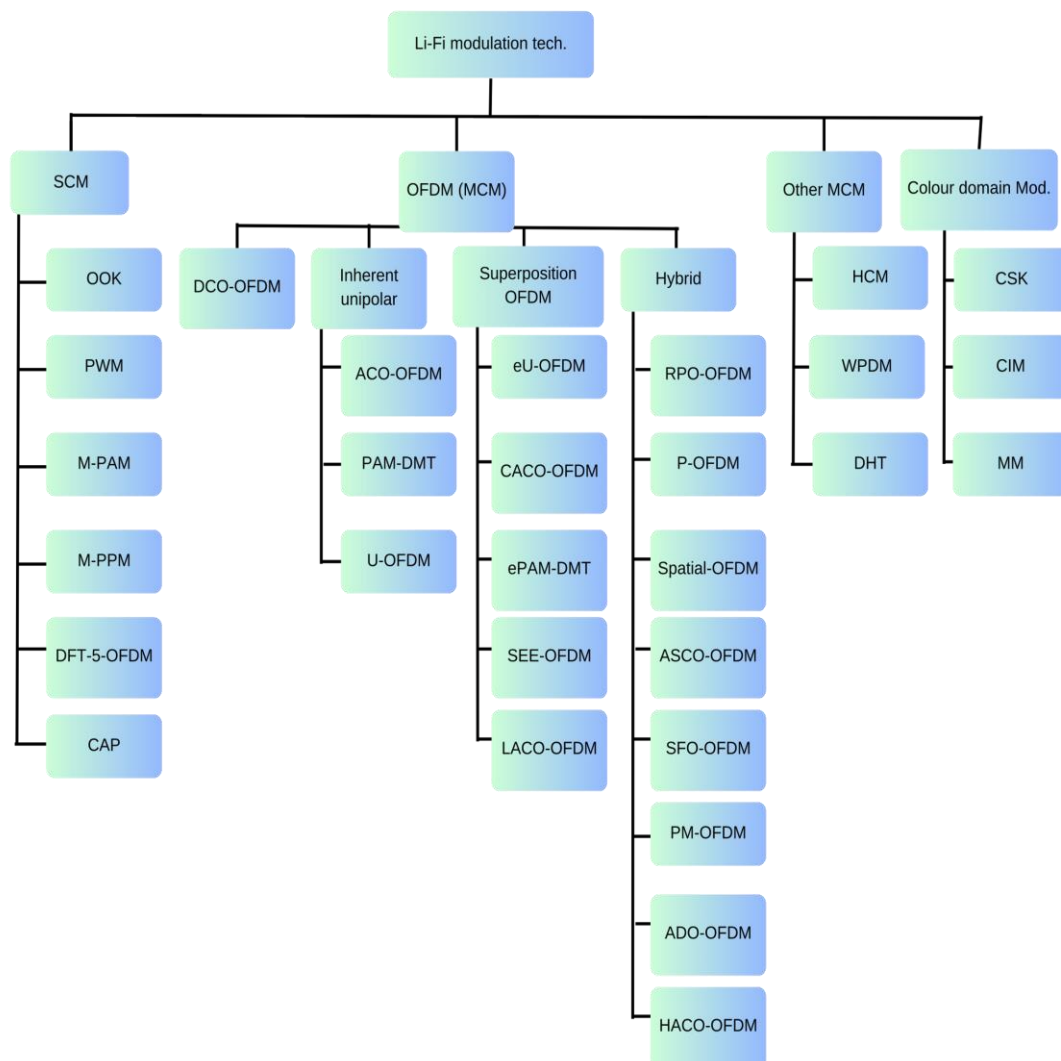


Figure 2.4: Techniques de modulation pour Li-Fi

2.8.1. Caractéristiques des techniques de modulation du Li-Fi

Modulation	Technique	Caractéristiques
SCM	OOK	Consiste à transmettre les données en allumant et éteignant les voyants de manière séquentielle. Lorsque l'intensité lumineuse varie légèrement, la fiabilité de la portée de communication peut diminuer.
	PPM	Permet de varier l'intensité lumineuse à l'aide de différentes positions d'impulsion (VPPM). Offre des débits de données plus élevés
	PAM	Sensible à la distorsion du signal, combinaison avec une autre technique de modulation pour obtenir de meilleures performances.
MCM	OFDM	Excellent pour les situations dans lesquelles plusieurs émetteurs sont utilisés simultanément ; évite les effets d'ombre, les interférences peuvent être atténuées en déplaçant la bande passante du système vers une fréquence plus élevée.
	DCO-OFDM	Dissipation d'énergie substantielle due à la polarisation.
	ACO-OFDM	Efficace en termes de puissance optique pour une valeur de SNR inférieure pour le canal IM/DD.
	PAM-DMT	Meilleure efficacité de la puissance optique par rapport au DCO-OFDM.
	AHO-OFDM	Prend en charge divers objectifs de gradation pour Atteindre les performances du système.
	Flip-OFDM	Équivalent à l'ACO-OFDM en termes d'efficacité spectrale et de performance d'erreur
	U-OFDM	Équivalent à l'ACO-OFDM en termes d'efficacité spectrale et de performance d'erreur

Tableau 2.2: Caractéristiques des techniques de modulation du Li-Fi

2.8.2. Caractéristiques d'un réseau Li-Fi

Le Li-Fi n'est pas seulement un câble photonique virtuel, c'est un système sans fil complet, offrant une communication mobile, bidirectionnelle et multiutilisateur, au sein d'un réseau sans fil constitué de très petites cellules optiques. Cela permet une densité de connexions potentielles très élevée où chaque luminaire Li-Fi fonctionne comme un point d'accès [51].

2.8.2.1. Accès multiples

L'accès multiple est une technique fournie par l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, figure 2.5) pour répondre aux besoins de communication multi-utilisateurs. Cette méthode est également utilisée dans la nouvelle norme Wi-Fi 801.11ax pour l'accès réseau. [52]

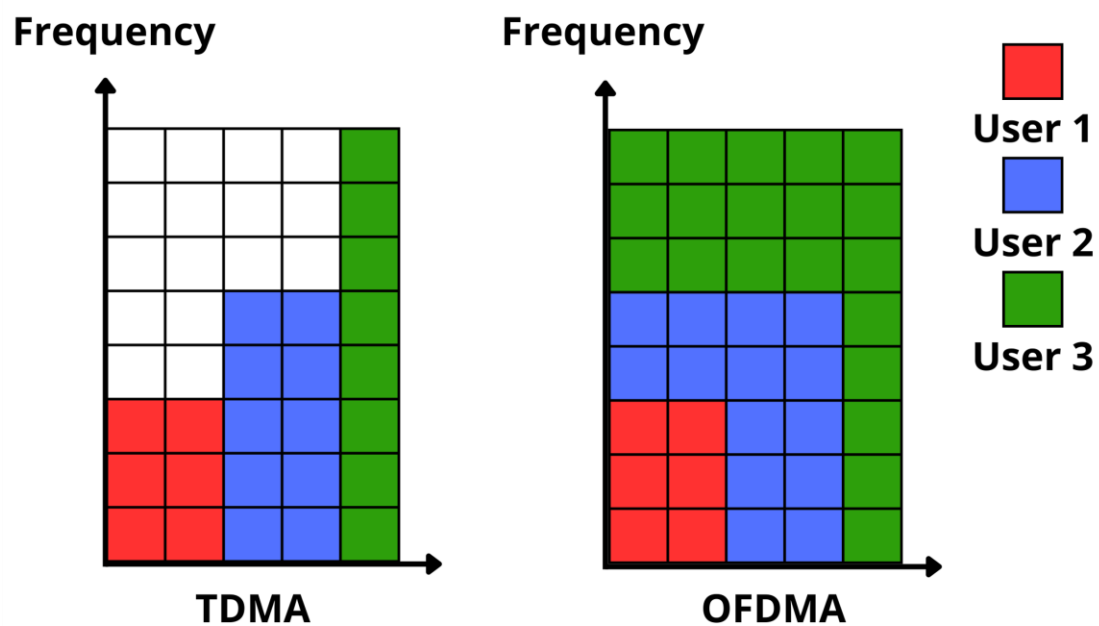


Figure 2.5: Allocation de ressources pour TDMA et OFDMA

2.8.2.2. Duplex

Le mode duplex est nécessaire pour un système de communication Li-Fi complet. Il doit fournir une connexion montante des terminaux mobiles vers le point d'accès optique.

2.8.2.3. L'attocell

Dans les communications sans fil RF, le réseau est distribué spatialement en cellules, chacune étant desservie par au moins une station de base fixe. Dans le contexte du Li-Fi, on parle de « attocell » pour désigner des petites cellules optiques. Cela permet une densification du réseau et une meilleure accessibilité pour les utilisateurs [53].

2.8.2.4. Effet Handover

L'effet Handover, également appelé transfert intercellulaire, se réfère au processus de transfert de la gestion d'une session de transmission sans fil d'un point d'accès actuel à un autre point d'accès. Ce transfert intercellulaire est généralement nécessaire lorsque le terminal mobile quitte la zone de couverture d'un point d'accès et se déplace vers la zone de couverture d'un autre point d'accès adjacent. Il peut également être requis en cas de dégradation sévère du canal de transmission due à des interférences ou si la cellule en cours est complètement chargée [54].

2.9. Architecture d'un réseau Li-Fi

La conception Li-Fi est composée d'un grand nombre d'éclairages à LED utilisés pour la transmission optique en appliquant une tension constante et un courant constant. Comme expliqué ci-dessus, les composants fondamentaux d'un tel système sont :

- Plusieurs éclairages à LED pour la transmission de données.
- Un capteur de lumière pour la réception de données. Cela peut se faire par une photo détectrice ou soit par une caméra, par exemple la caméra d'un téléphone mobile. Dans ce dernier cas, on parle de « Optical Camera Communication » (OCC).

Comme présenté ci-dessous, les terminaux peuvent se connecter à Internet via une lampe à LED. Le driver (pilote à lampe) permet de contrôler la luminosité des LEDs selon l'environnement et les données reçues.

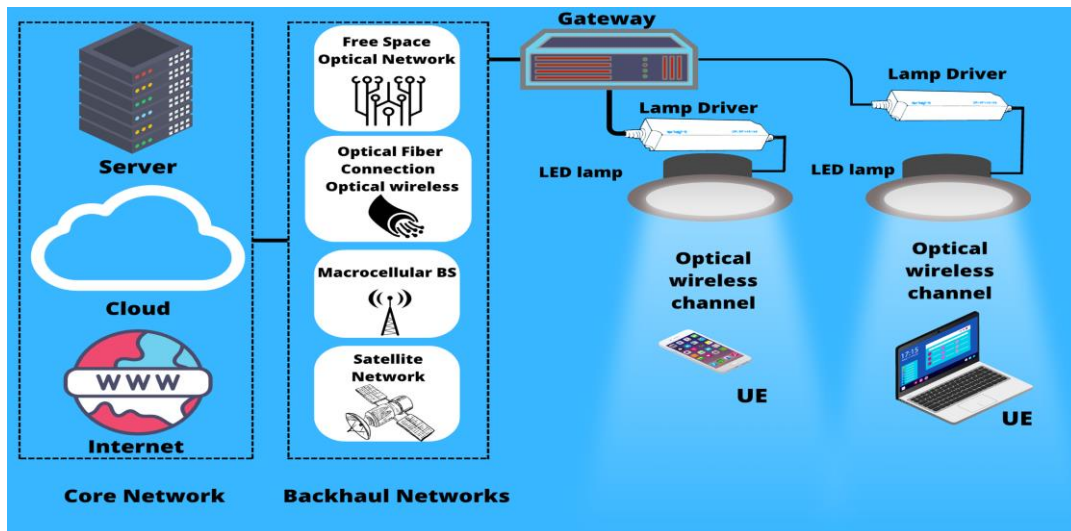


Figure 2.6: Architecture d'un système Li-Fi.

2.10. Normalisation de la technologie Li-Fi

Une communication Li-Fi est réalisée selon le protocole de communication établi par le comité international IEEE 802 (réseaux locaux et métropolitains). Le protocole de standardisation 802.15.7 propre aux communications optiques à courtes distances a été défini par ce même comité. Ce dernier prend en considération les différentes sources d'interférences et vise à respecter les réglementations sanitaires en vigueur [55].

Cette norme définit la couche PHY et la couche MAC à adopter afin de développer des solutions compatibles [56] à l'échelle mondiale. Il tient également compte de la mobilité de la transmission optique, de sa compatibilité avec les éclairages artificiels présents dans l'infrastructure, des déficiences qui peuvent être causées par les interférences générées par l'éclairage ambiant. La couche MAC permet de réaliser la liaison avec les couches hautes plus communes comme celles utilisées dans les protocoles TCP/IP. Enfin, la norme se conforme à la réglementation en vigueur sur la sécurité oculaire des usagers.

Le standard définit trois couches PHY selon les débits envisagés. La couche PHY I a été établie pour des applications en extérieur. PHY I opère de 11,67 kb/s à 266,6 kb/s. La couche PHY II permet d'atteindre des débits de 1,25 Mb/s à 96 Mb/s. La couche PHY III est appropriée lorsqu'on utilise plusieurs sources émettrices suivant une méthode de modulation particulière appelée Color-Shift Keying (CSK). PHY III opère de 12 Mb/s à 96 Mb/s.

Les formats de modulation préconisés pour PHY I et PHY II sont les codages on-off keying (OOK) et variable pulse-position modulation (VPPM). Le codage Manchester utilisé pour les couches PHY I et PHY II englobe l'horloge dans les données transmises en représentant un 0 logique par un symbole OOK de « 01 » et un 1 logique par un symbole OOK de « 10 » avec une composante continue. Ce point est important car, la composante continue permet d'éviter l'extinction de la lumière lors d'une suite prolongée de 0 logiques [57].

2.11 Distinction entre Li-Fi et VLC

Le Li-Fi peut être considéré comme une version développée du VLC car il peut fournir une communication point à multipoint. Cette capacité de communication point à multipoint distingue le Li-Fi des systèmes basés sur le VLC, qui prennent en charge uniquement la communication point à point. Ainsi, le Li-Fi représente une extension de la technologie VLC en utilisant des LEDs pour offrir un système sans fil en réseau efficace avec une communication haut débit [58].

2.12 Etat de l'art des systèmes Li-Fi

L'état de l'art des systèmes Li-Fi, basé sur plusieurs travaux de recherches, offre une compréhension approfondie des avancées réalisées dans ce domaine émergent de la communication sans fil.

Plusieurs recherches se sont concentrées sur la comparaison entre la communication par lumière visible (VLC) et la communication par radiofréquence, dans les auteurs ont mis l'accent sur les forces et les faiblesses de la VLC et le RF. Cette comparaison est essentielle pour évaluer les avantages uniques offerts par la technologie Li-Fi, tels que la sécurité accrue et la capacité à fonctionner dans des environnements électromagnétiques sensibles.

L'état de l'art des systèmes Li-Fi, basé sur des travaux de recherche récents, offre une compréhension approfondie des avancées réalisées dans ce domaine émergent de la communication sans fil.

Dans les travaux de Wu, Wang et Youn [59], une comparaison détaillée entre la communication par radiofréquence et la communication par lumière visible a été effectuée, mettant en évidence les forces et les faiblesses de chaque approche. De plus, l'utilisation de différentes sources lumineuses dans les systèmes de communication par

lumière visible a été examinée, ce qui permet de mieux comprendre les options disponibles pour la mise en œuvre de ces systèmes.

L'article de Mahendran [60] présente un système de transmission de données multimédias basé sur la technologie Li-Fi, mettant en avant l'utilisation de composants avancés. Cette recherche contribue à l'élargissement des possibilités de communication par la lumière en exploitant les avantages offerts par les composants de pointe.

Haas, Yin, Wang et Chen [61] ont proposé une distinction claire entre la communication par lumière visible et le Li-Fi, Leur travail fournit une base solide pour comprendre les différences conceptuelles entre ces deux approches et leurs implications pour les systèmes Li-Fi.

Soltani, Safari et Haas [62] ont proposé un nouveau modèle de Li-Fi basé sur l'intervalle de mise à jour des canaux, démontrant que ce modèle peut être plus performant que les approches traditionnelles. Cette étude offre des perspectives intéressantes sur l'optimisation du débit dans les réseaux Li-Fi en tenant compte de l'intervalle de mise à jour des canaux.

Dans leur recherche, Ahfayd, Farhat, Sibley, Mather et Lazaridis [63] ont exploré l'amélioration de la communication par lumière visible en utilisant une technique de modulation novatrice appelée modulation de position d'impulsion dicode (DiPPM). Leur proposition réduit le taux d'erreur binaire (BER) et offre ainsi une alternative plus performante aux algorithmes traditionnels.

Dehghani Soltani, Wu, Safari et Haas [64] ont proposé des techniques visant à réduire la quantité de rétroaction dans les réseaux Li-Fi en limitant le contenu et la fréquence. Leur modèle bidirectionnel optimise le débit utilisateur, offrant ainsi une solution prometteuse pour améliorer l'efficacité des réseaux Li-Fi.

Chen, Basnayaka, Wu et Haas [65] ont examiné différentes techniques d'atténuation des interférences basées sur des récepteurs à diversité d'angle (ADR) pour les réseaux optiques attocellulaires intérieurs. Leur recherche met en évidence l'importance de la diversité d'angle pour améliorer l'efficacité de la communication par lumière visible, en présentant quatre méthodologies.

Nguyen, Islam, Yamazato et Jang [66] ont exploré le concept de communication par capteur d'image (ISC) utilisant des caméras et la communication par lumière visible.

Leur article offre un aperçu approfondi des propositions techniques de communication par capteur d'image et souligne les défis et les opportunités liés à cette approche.

Enfin, les travaux d'Abdalla, Rahaim et Little [67] ont étudié l'impact de la mobilité et de l'orientation des appareils sur la communication par lumière visible dans un modèle d'éclairage multicellulaire. Leur recherche met en évidence la nécessité d'un positionnement adéquat des appareils pour compenser la perte d'efficacité due à la dégradation de l'angle.

Dans l'ensemble, ces travaux de recherche récents contribuent de manière significative à élargir notre compréhension des différentes dimensions de cette technologie émergente. Ils mettent en évidence les avantages, les limites et les possibilités d'amélioration des systèmes Li-Fi, ouvrant la voie à de nouvelles avancées et à des applications prometteuses dans le domaine de la communication sans fil.

2.13 Développement d'un système Li-Fi bidirectionnel

L'objectif de cette application est de démontrer la faisabilité d'une transmission Li-Fi bidirectionnelle (transmission-réception) à l'aide d'un dispositif expérimental simple.

2.13.1. Composants relatifs à l'application

2.13.1.1 Carte Arduino UNO

L'Arduino UNO est une carte de développement électronique largement utilisée pour la création de prototypes, l'apprentissage de la programmation et la réalisation de projets électroniques. Elle est basée sur un microcontrôleur ATmega328P et est dotée de diverses fonctionnalités qui la rendent polyvalente et facile à utiliser [68].

La carte Arduino UNO, présentée sur la figure 2.7, possède les caractéristiques suivantes :

- **Microcontrôleur** : Elle est équipée d'un microcontrôleur ATmega328P cadencé à 16 MHz, qui constitue le cerveau de la carte. Ce microcontrôleur dispose de 32 ko de mémoire flash pour le stockage du programme, 2 ko de RAM pour les variables temporaires et 1 ko d'EEPROM pour le stockage de données permanentes.

- **Entrées/Sorties numériques** : L'Arduino UNO dispose de 14 broches d'entrées/sorties numériques. Parmi ces broches, 6 peuvent être utilisées en mode PWM (modulation de largeur d'impulsion) pour la génération de signaux analogiques. Toutes les broches peuvent être configurées en tant qu'entrées ou sorties selon les besoins du projet.
- **Entrées analogiques** : Elle possède 6 entrées analogiques permettant de mesurer des tensions comprises entre 0 et 5 volts. Ces entrées sont utiles pour capturer des signaux analogiques provenant de capteurs tels que des potentiomètres, des capteurs de température, des capteurs de lumière, etc.
- **Connectivité** : L'Arduino UNO est équipée d'un port USB qui permet de la connecter à un ordinateur pour la programmation et la communication série. Elle dispose également d'un connecteur d'alimentation CC pour l'alimentation externe et d'un connecteur ICSP (In-Circuit Serial Programming) pour la programmation du microcontrôleur.
- **Environnement de développement** : L'Arduino UNO est programmable à l'aide de l'environnement de développement intégré (IDE) Arduino. Cet IDE fournit une interface conviviale pour écrire, téléverser et déboguer du code sur la carte Arduino.

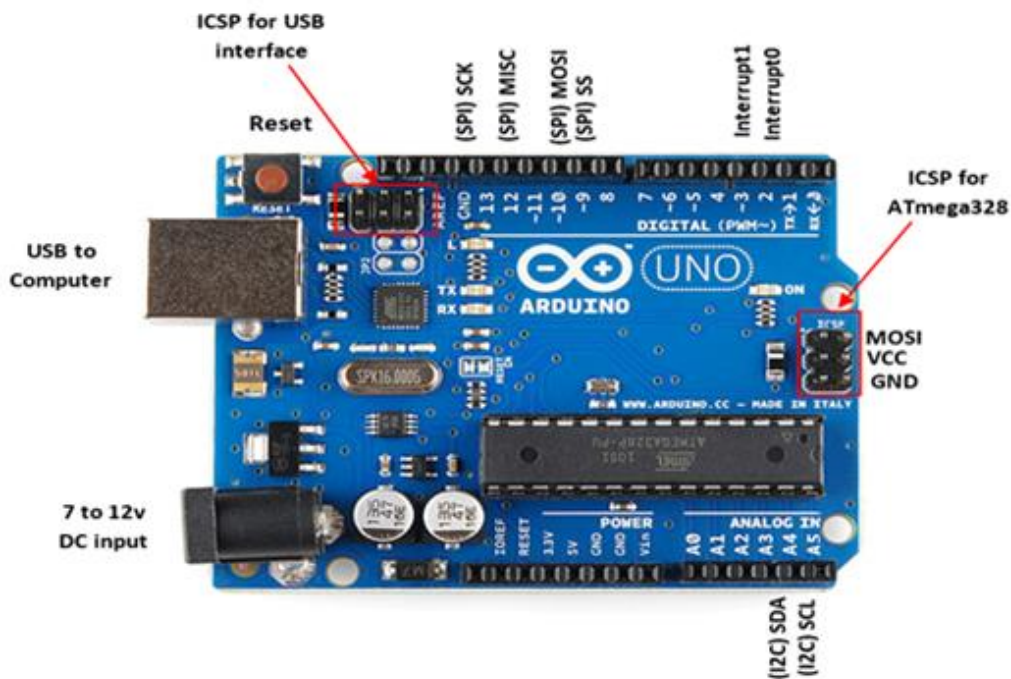


Figure 2.7: Présentation de la carte Arduino UNO

2.13.1.2. Phototransistor

Le phototransistor est un composant électronique sensible à la lumière qui trouve une utilisation variée dans de nombreux dispositifs et applications. Sa capacité à convertir la lumière en un signal électrique en fait un choix populaire pour les capteurs de lumière et d'autres applications nécessitant une détection optique. (figure 2.8).

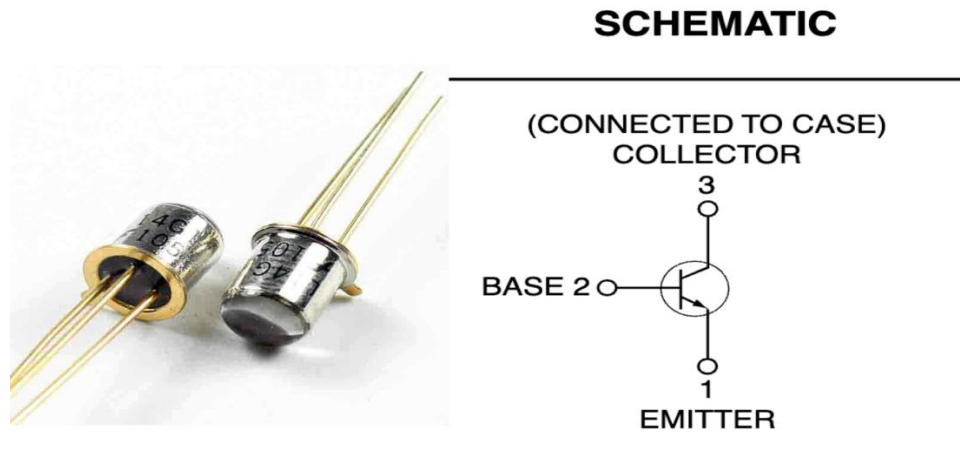


Figure 2.8: Présentation du phototransistor

Ces caractéristiques et fonctionnalités principales sont :

- **Structure** : Le phototransistor est essentiellement un transistor à trois couches, tout comme le transistor bipolaire classique. Il se compose d'une base, d'un émetteur et d'un collecteur, mais avec une différence clé : sa base est exposée à la lumière.
- **Fonctionnement** : Lorsque la lumière frappe la région de la base du phototransistor, les photons de lumière fournissent de l'énergie aux porteurs de charge de la base, ce qui modifie le courant de base et, par conséquent, le courant de collecteur. Ainsi, le phototransistor réagit à la lumière en modifiant son courant de sortie.
- **Types de phototransistors** : Il existe différents types de phototransistors, tels que les phototransistors à jonction simple (NPN ou PNP), les phototransistors à avalanche, les phototransistors à champ de surface, etc. Chaque type possède ses propres caractéristiques et applications spécifiques.
- **Sensibilité spectrale** : Les phototransistors sont sensibles à différentes longueurs d'onde de lumière en fonction de leur matériau de base. Certains

sont sensibles à la lumière visible, tandis que d'autres sont sensibles aux infrarouges ou aux ultraviolets.

- **Applications** : Les phototransistors sont largement utilisés dans des domaines tels que l'électronique grand public, l'automatisation industrielle, la robotique, la détection de mouvement, la communication infrarouge, la sécurité, la télémétrie optique, etc.

2.13.1.3.Source LED

La LED est utilisée dans le cadre du Li-Fi comme source d'information d'autant plus efficacement pour produire des flux d'informations. La LED IR ordinaire peut générer des flux de données uniques avec une vitesse de 10 à 20 Kbps. D'autre part, la LED source utilisée dans la communication Li-Fi génère des milliers de flux d'informations à un rythme beaucoup plus rapide. Les micro-LED sont utilisées au motif que les LED à échelle miniaturisée peuvent clignoter 1000 fois plus rapidement que les LED commerciales et peuvent transmettre des millions de fois plus rapidement que celles d'une LED professionnelle. Il peut transmettre une communication plus rapide que le Wi-Fi.



Figure 2.9: Présentation du la source LED

2.13.2.Architecture du modèle proposé

Un système de communication Li-Fi est mis en place en utilisant l'Arduino UNO, des LEDs, des phototransistors et d'autres composants.

L'architecture de base du système est illustrée dans la figure 2.10. Les figures 2.11 et 2.12 présentent, respectivement, le schéma électrique et le prototype réalisé pour ce système.

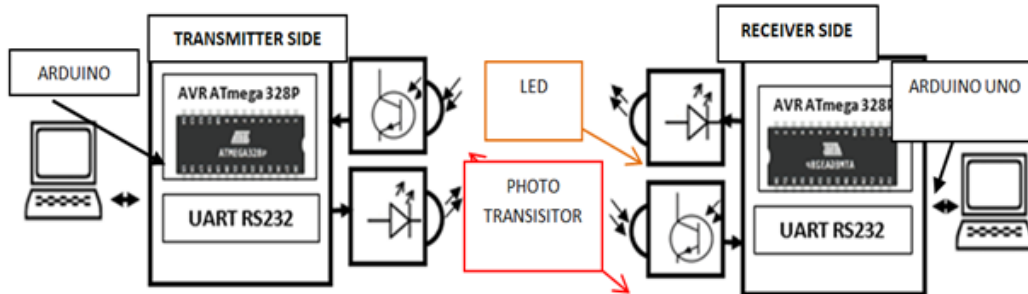


Figure 2.10: Architecture du modèle proposé

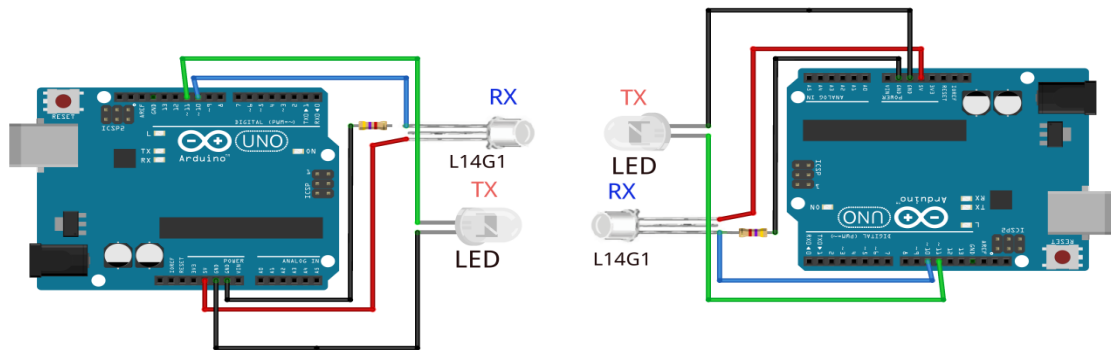


Figure 2.11: Schéma électronique du système adopté

2.13.2.1. Transmetteur

Une diode électroluminescente blanche de diamètre 5 mm est utilisée comme émetteur. Les données sont envoyées sous la forme 0 et 1 où 1 est désigné par LED ON et 0 par LED OFF. Les caractéristiques du transmetteur sont présentées au tableau 2.6.

Tableau 2.3: Caractéristiques de la LED 5mm

Paramètre	Symbole	Condition	Min	Typique	Max.	Unités
Courant inverse	I_R	$V_R=5V$	----	----	50	UA
Tension directe	V_F	$I_F=20mA$	3.0	---	3.6	V
Angle	$2\theta_{1/2}$	$I_F=20mA$	----	15	----	Deg
Zener Reverse Voltage	V_Z	$I_Z=5mA$	5.2	----	----	V
Intensité lumineuse	I_v	$I_F=20mA$	14250	----	28500	MCD
Coordonnées chromatiques	X	$I_F=20mA$	----	0.30	----	
	Y		----	0.29	----	

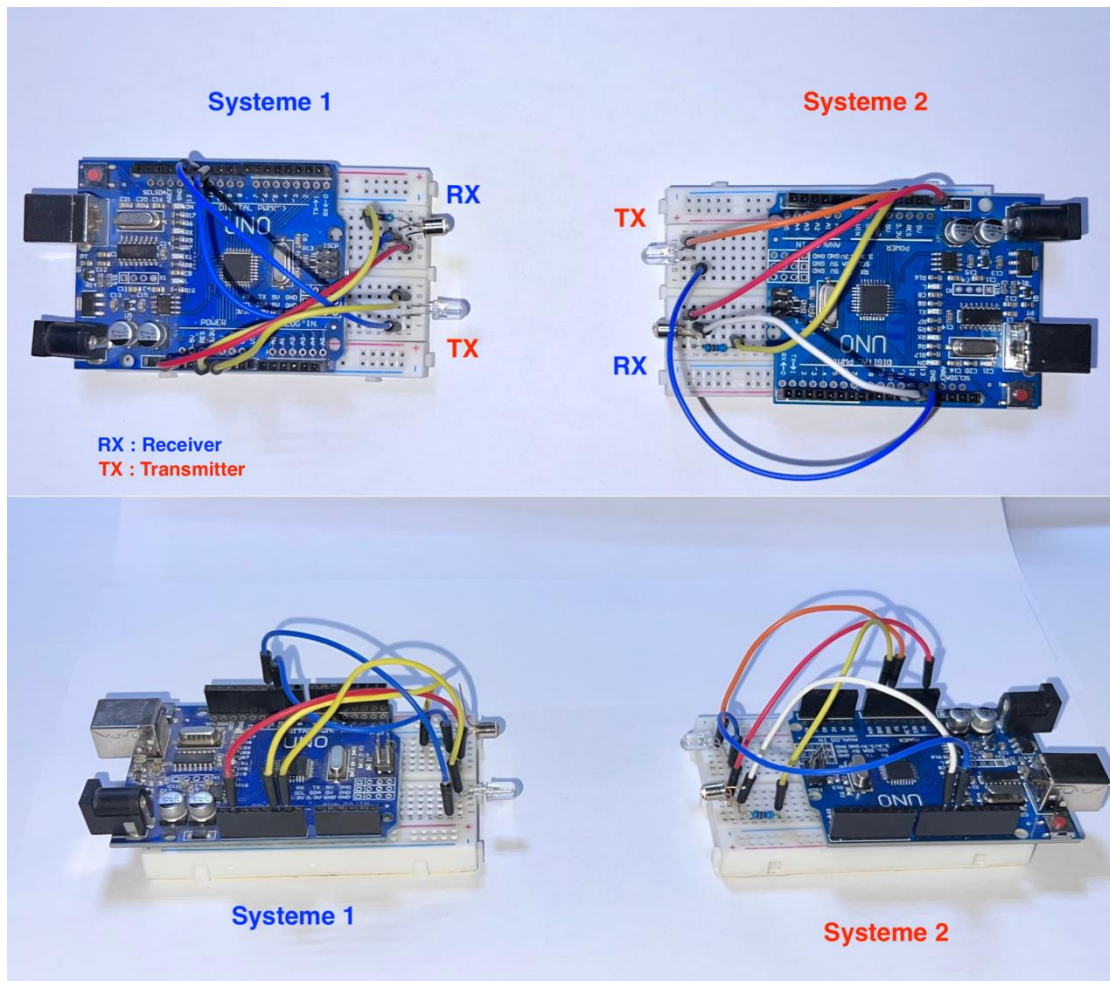


Figure 2.12: Prise de vue réelle du modèle proposé sur la base de deux systèmes (TX, RX) (effectuée en date du 1/5/23)

2.13.2.2. Récepteur

Le phototransistor est positionné du côté récepteur pour convertir les impulsions lumineuses en impulsions électriques. Lorsque la lumière atteint le phototransistor, sa résistance varie, ce qui se traduit par un signal électrique. Ce signal électrique est utilisé pour représenter les données. Les spécifications du phototransistor utilisé sont répertoriées dans le tableau 2.7.

Tableau 2.4: Caractéristiques du phototransistor

Paramètre	Symbole	Condition	Min.	Typique	Max.	Unités
Collecteur sur état actuel L14F1	IC(ON)	$E_e = 0,125 \text{ mW/cm}^2, V_{CE} = 5 \text{ V}^{(7)}$	7.5	//	//	MA
Collecteur sur état actuel L14F2	IC(ON)	$E_e = 0,125 \text{ mW/cm}^2, V_{CE} = 5 \text{ V}^{(7)}$	2.5	//	//	MA
Répartition du collecteur-émetteur	BV PDG	$I_C = 10 \text{ mA}, E_c = 0$	25	//	//	V
Répartition de la base de l'émetteur	BVEBO	$I_E = 100 \mu\text{A}, E_c = 0$	12	//	//	V
Répartition de la base collectrice	BVCBO	$I_C = 100 \mu\text{A}, E_c = 0$	25	//	//	V
Temps de montée	Tr	$I_C = 10 \text{ mA}, V_{CC} = 5 \text{ V}, R_L = 100 \Omega$	//	300	//	Ms
Temps d'automne	Tf	$V_C = 10 \text{ mA}, V_{CC} = 5 \text{ V}, R_L = 100 \Omega$	//	250	//	Ms
Fuite du collecteur-émetteur	IPDG	$V_{CE} = 12 \text{ V}, E_c = 0$	//	//	100	NA
Angle de réception à 1/2 sensibilité	Θ	//	//	± 8	//	Degrés

2.13.2.3.Signal codé

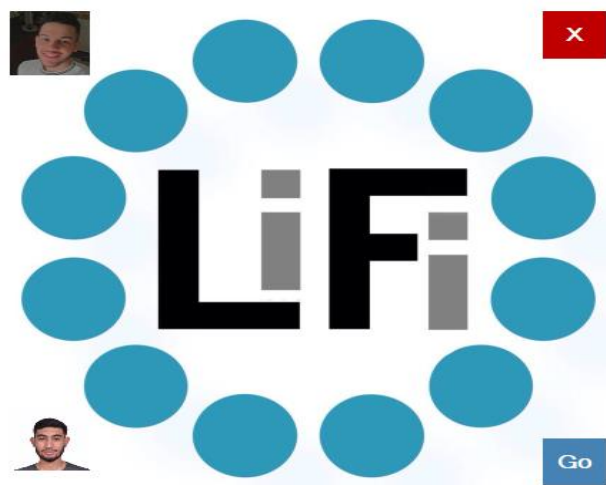
Le signal électrique est reçu aux broches série de la carte Arduino UNO. Ce signal est ensuite envoyé au port de communication série RS232. À ce stade, le signal électrique est converti de sa représentation binaire en une forme compréhensible pour l'utilisateur.

2.13.2.4.Logiciel Li-Fi

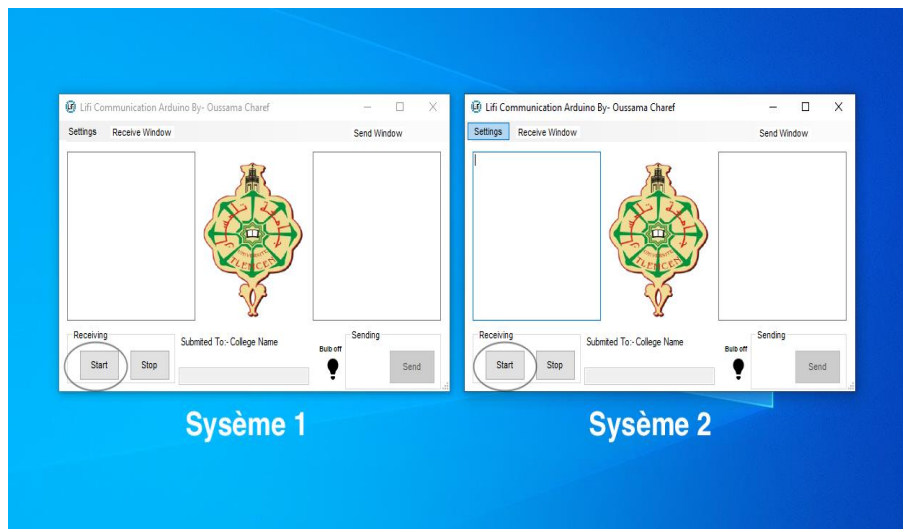
Le logiciel créé afin de tester la communication série, est un logiciel personnalisé dont la mise en application est détaillée ci-dessous.

a) Déroulement du processus

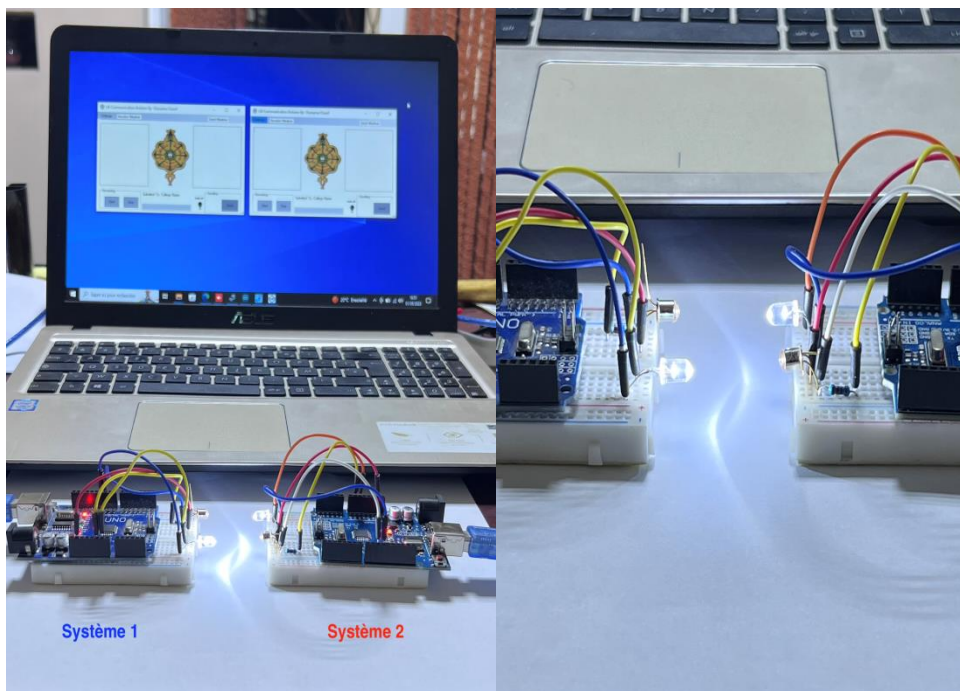
1. Ouvrir le logiciel et apparition de la première fenêtre. Cliquer sur « GO ».



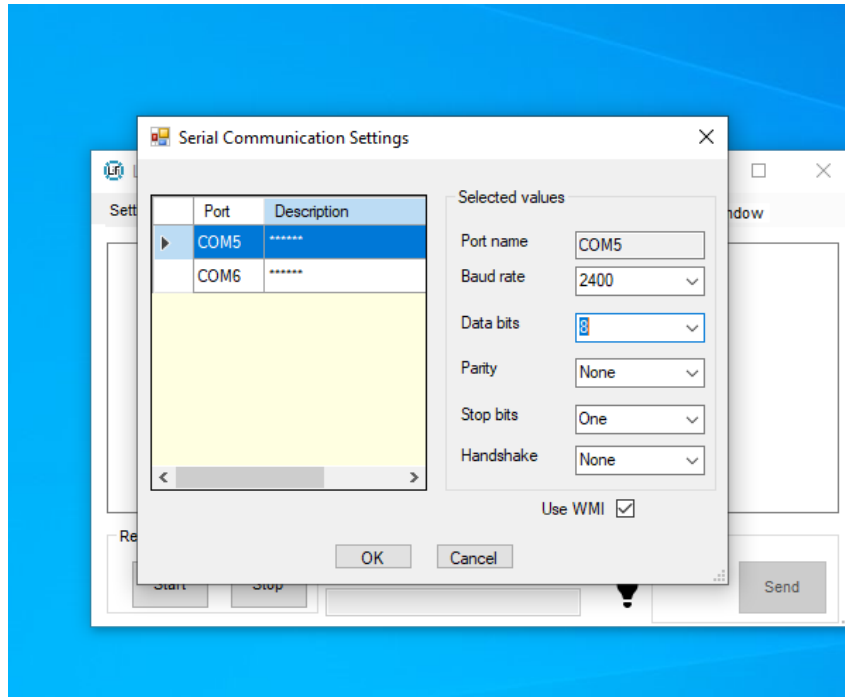
2. Apparition des deux fenêtres relatives aux deux systèmes opérants



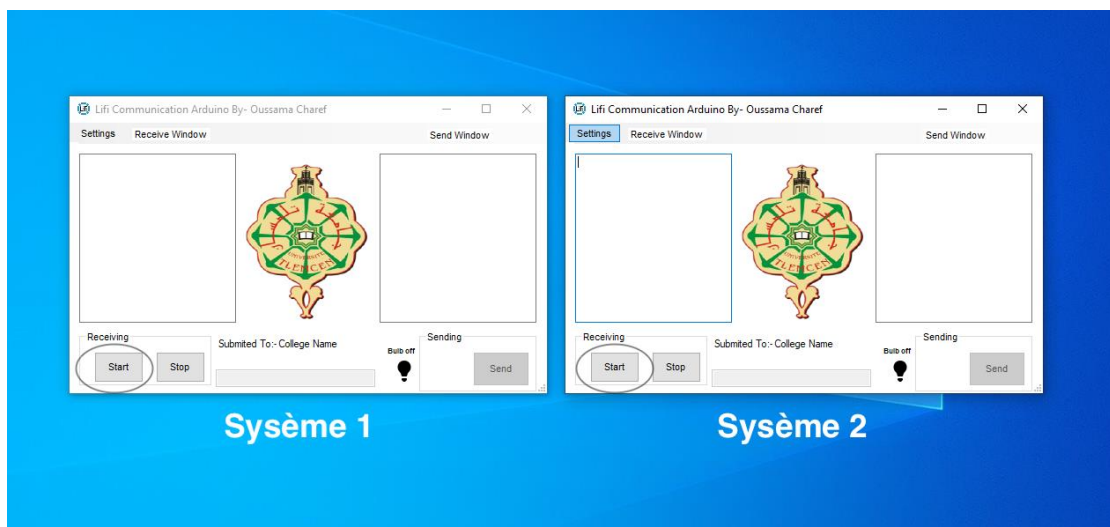
3. Connecter les deux systèmes à chaque port USB du PC. Le scintillement des LED confirmera la connexion et donc le démarrage du système.



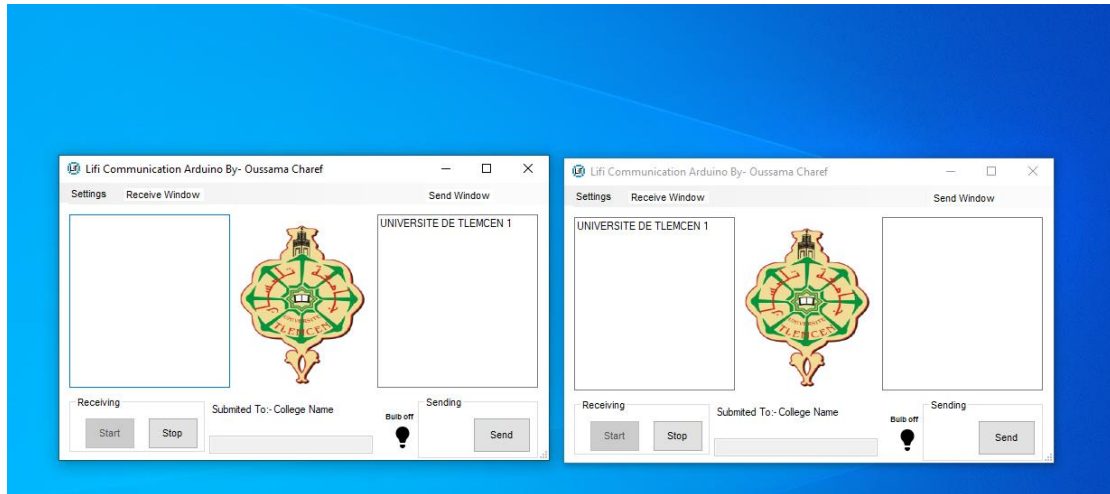
4. Configurer le port série de chaque système puis sélectionner le numéro de port.
5. Sélectionner le débit en baudet, le nombre de Bits de données, l'aparité et le bit de stop, ensuite valider.



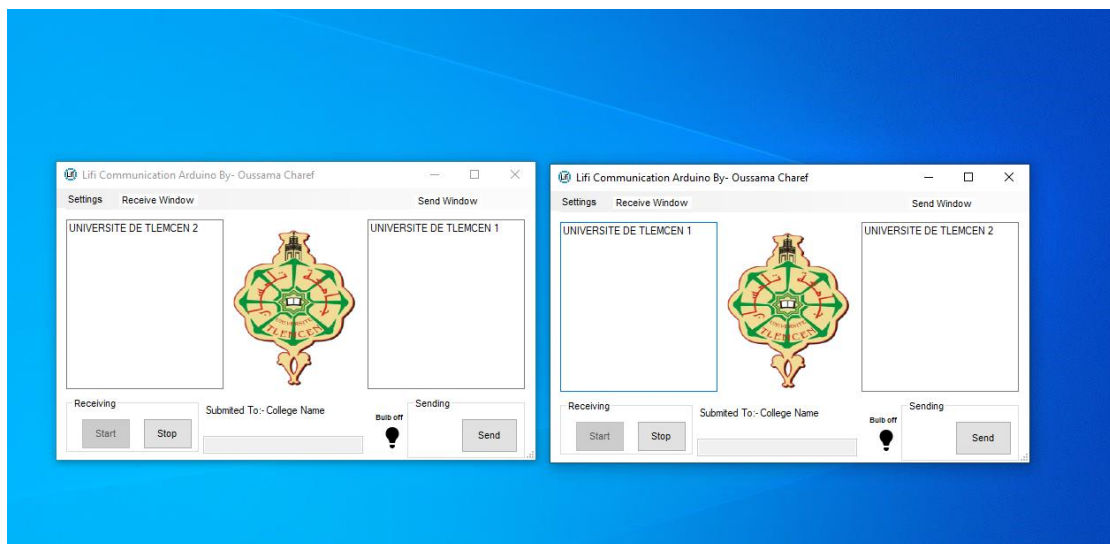
6. Dans la case « recevant », sélectionner, le bouton « Start » afin de lancer la communication série pour chaque système (sur les deux fenêtres)



7. Aller ensuite sur « Send Window », puis introduire le message à envoyer : Exemple « Université de Tlemcen », cliquer sur « Send ». Le message est automatiquement reçu sur la fenêtre du deuxième système.



8. Aller ensuite sur la fenêtre du deuxième système, répéter l'opération avec un deuxième message d'essai « Université de Tlemcen 2 » et cliquer sur « Send ».
9. Le message sera automatiquement reçu sur la fenêtre du premier système.



La communication Li-Fi bidirectionnelle est ainsi assurée.

b) Analyse du rendement

Une étude paramétrique a été réalisée sur le système afin d'analyser ces performances. Cette étude se concentre sur l'analyse de la précision de la transmission en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que du débit de transmission. La précision est définie comme le nombre total de caractères corrects reçus divisé par le nombre total de caractères envoyés.

Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau 2.8 et illustrés sur le graphe de la figure 2.13.

	Débit (Baud)	DISTANCE (cm)	Précision (%)
1	1200	30	100
2	1200	60	100
3	1200	91	60
4	1200	121	20
5	1200	152	0
6	1200	182	0
7	2400	30	100
8	2400	60	98
9	2400	91	40
10	2400	121	0
11	2400	152	0
12	2400	182	0
13	4800	30	100
14	4800	60	80
15	4800	91	18
16	4800	121	0
17	4800	152	0
18	4800	182	0
19	9600	30	100
20	9600	60	20
21	9600	91	5
22	9600	121	0
23	9600	152	0
24	9600	182	0

Tableau 2.5: Analyse du rendement du modèle Li-Fi

Tout d'abord, en observant les variations du débit de transmission (Baud), on constate que des débits plus bas, tels que 1200 Baud, offrent une précision élevée de 100% pour des distances de 30 cm et 60 cm. Cependant, à mesure que le débit augmente, la précision diminue progressivement. Par exemple, à un débit de 9600 Baud, la précision chute à 20% pour une distance de 60 cm.

En ce qui concerne la distance entre l'émetteur et le récepteur, on remarque une diminution de la précision à mesure que la distance augmente. À une distance de 30

cm, tous les débits testés affichent une précision de 100%. Cependant, lorsque la distance atteint 182 cm, la précision chute à 0% pour tous les débits.

Ces résultats soulignent l'importance du débit de transmission et de la distance dans les performances du système Li-Fi. Des débits plus bas et des distances plus courtes semblent offrir une meilleure précision de transmission. Cependant, à mesure que le débit augmente ou que la distance augmente, la précision diminue, suggérant une dégradation de la qualité du signal. Ces informations peuvent être utiles pour optimiser la configuration et les performances du système Li-Fi dans des scénarios réels.

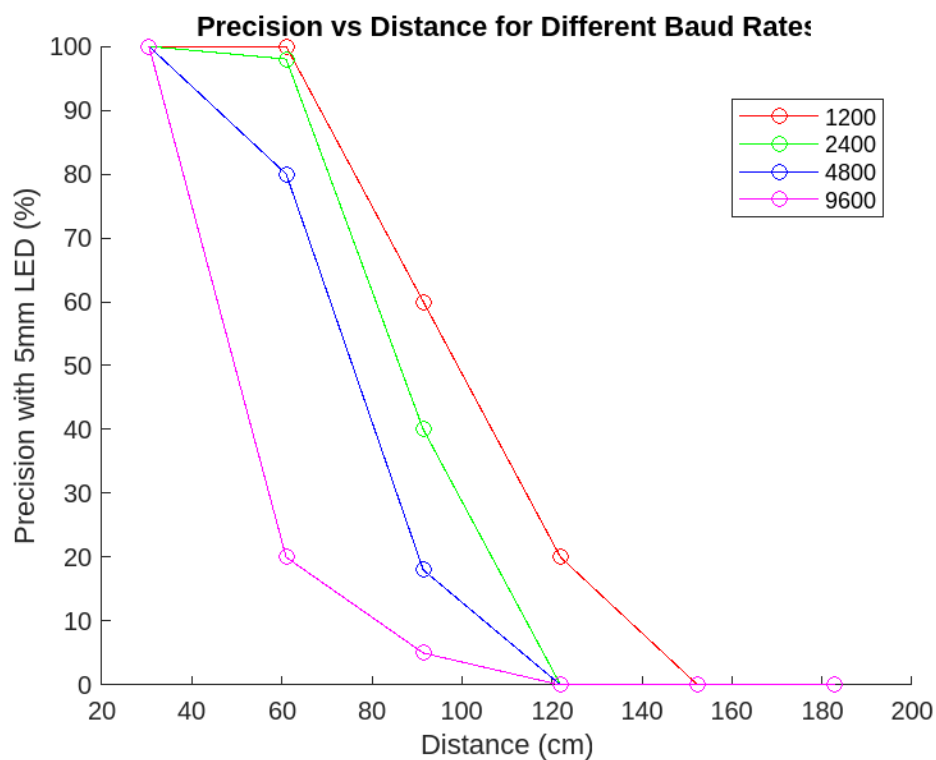


Figure 2.13: Évolution de la précision en fonction de la distance pour différents débits en Baud.

Conclusion

Pour conclure ce chapitre, il est clair que l'adoption du Li-Fi, une technologie émergente, offre de nombreux avantages significatifs. Parmi ces avantages, on peut noter une bande passante élevée, une faible interférence électromagnétique, une sécurité renforcée et une compatibilité avec les normes de communication existantes. Ces caractéristiques démontrent le fort potentiel du Li-Fi en tant que solution de communication avancée.

Néanmoins, la communication Li-Fi fait face à quelques défis, notamment la portée de transmission limitée en raison de la diffusion de la lumière, la sensibilité aux obstacles et à la lumière ambiante, ainsi que la nécessité d'un alignement précis entre l'émetteur et le récepteur.

De plus, la mise en place d'un système Li-Fi requiert des modifications de l'infrastructure existante, telles que l'installation de nouvelles sources de lumière et la mise à niveau des équipements de communication. Malgré ces défis, la technologie Li-Fi a le potentiel de devenir une alternative efficace et sécurisée aux technologies de communication sans fil traditionnelles. En particulier, dans des environnements où les interférences électromagnétiques sont indésirables, comme les hôpitaux et les avions, le Li-Fi offre une solution très prometteuse. De plus, cette technologie trouve des applications favorables dans le domaine de la domotique, visant à rendre les bâtiments plus intelligents.

En fin, l'application de la communication Li-Fi présente un énorme potentiel pour la transmission de données sans fil, en offrant une performance en temps réel déjà démontrée. Cependant, il reste encore des défis à surmonter pour une adoption plus large de cette technologie. Dans cette perspective, le prochain chapitre se concentrera sur le développement d'un prototype de système domotique utilisant le Li-Fi comme technologie de transmission.

Chapitre 3: Conception d'un système domotique basé sur la technologie Li-Fi

Introduction :

La domotique, également connue sous le nom de maison intelligente, a révolutionné la façon dont nous interagissons avec nos maisons. Les systèmes domotiques permettent aux propriétaires de maisons de contrôler une variété de fonctionnalités, telles que l'éclairage, le chauffage, la ventilation, la climatisation et les appareils électroménagers, à partir de leur smartphone ou de leur tablette.

La communication Li-Fi, une technologie de communication sans fil, offre une alternative prometteuse à la communication Wi-Fi traditionnelle pour les systèmes domotiques.

Au cours de ce chapitre, nous allons étudier la conception d'un système domotique qui exploite la communication Li-Fi pour offrir une connectivité haut débit, sécurisée et fiable aux maisons intelligentes. Nous examinerons les avantages et les défis liés à l'utilisation de la communication Li-Fi dans le domaine de la domotique, ainsi que les meilleures pratiques en matière de conception et de déploiement de ce type de système.

En fin de compte, nous verrons comment la communication Li-Fi peut améliorer l'expérience utilisateur de la domotique en offrant une connectivité rapide et sécurisée tout en réduisant les interférences avec les autres réseaux sans fil.

3.1.Architecture des systèmes alloués et protocoles adoptés

3.1.1.Composants utilisés

3.1.1.1.Cartes Arduino

En plus de la Arduino UNO, déjà présenté dans la section 2.13.1.1, nous utiliserons un Arduino nano (figure 3.1). Cette carte de développement électronique compacte et économique est basée sur un microcontrôleur ATmega328P).

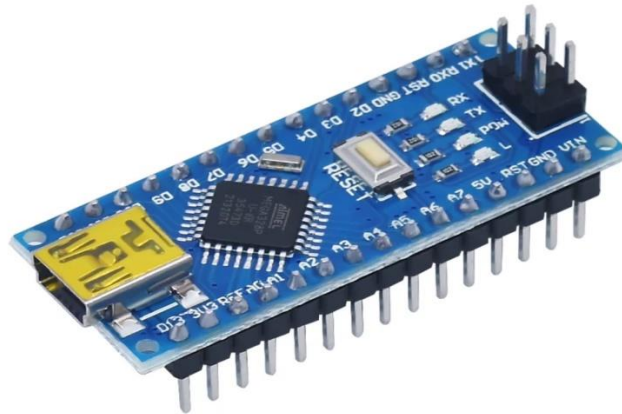


Figure 3.1: Arduino Nano

3.1.1.2.Circuit intégré ULN 2803

ULN2803 est un circuit intégré de type Darlington, utilisé comme amplificateur de courant pour la commande de charges inductives telles que des relais.

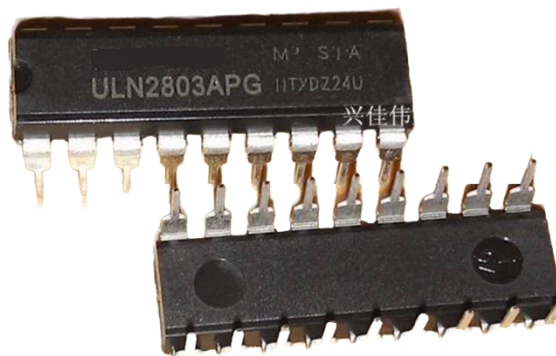


Figure 3.2 : ULN 2803

3.1.1.3.Module de communication HC-05

HC-05 est un module de communication sans fil Bluetooth conçu pour permettre une communication sans fil à courte portée entre des appareils électroniques. Il est basé sur la norme Bluetooth 2.0+EDR (Enhanced Data Rate) et offre une portée de communication jusqu'à environ 10 mètres.

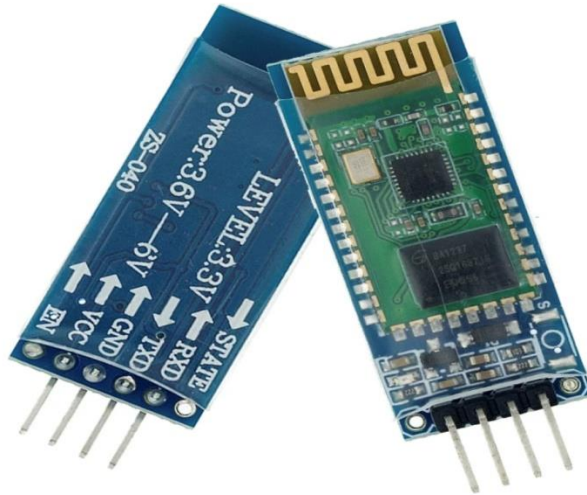


Figure 3.3: HC-05

3.1.1.4. Alimentation 200V /12V/60W

L'alimentation 200V /12V/60W est une alimentation électrique qui transforme une tension d'entrée de 200 volts en une tension de sortie de 12 volts avec une puissance maximale de 60 watts.



Figure 3.4: Alimentation 200V /12V/60W

3.1.1.5.LED omnidirectionnelle (5w)

Une LED omnidirectionnelle (5W) est une diode électroluminescente capable de projeter de la lumière dans toutes les directions, contrairement aux LED directionnelles qui ont un faisceau lumineux plus concentré.



Figure 3.5: LED omnidirectionnelle (5w)

3.1.1.6.Capteur de température et d'humidité DHT 11

Le capteur DHT11 fonctionne en mesurant la variation de la résistance électrique d'un matériau polymère sensible à l'humidité en réponse aux changements de l'humidité relative et de la température.

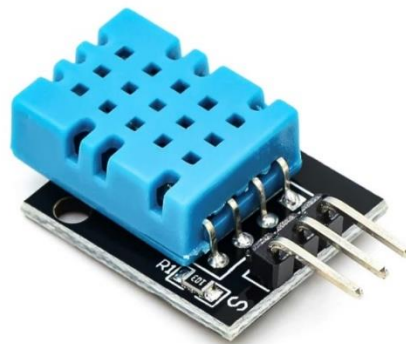


Figure 3.6: Capteur de température et d'humidité DHT 11

3.1.1.7.LED (petits formats)

Les LED (Light Emitting Diodes), de petits formats, sont des composants électroniques qui émettent de la lumière lorsqu'ils sont traversés par un courant électrique. Elles ont une taille réduite, souvent inférieure à 5 mm, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications où l'espace est limité.



Figure 3.7: LED (petits format RGB)

3.1.1.8.Phototransistor L14G1

Le phototransistor L14G1 est un composant électronique sensible à la lumière utilisée pour détecter les niveaux de lumière ambiants. Le L14G1 fonctionne en utilisant un transistor bipolaire pour amplifier le courant électrique produit par la lumière qui frappe la base du transistor. Lorsqu'il est exposé à la lumière, la résistance du L14G1 diminue, ce qui entraîne une augmentation de la tension de sortie. Cette tension peut être mesurée et utilisée pour déterminer la luminosité ambiante.



Figure 3.8: Phototransistor L14G1

3.1.1.1.9. Capteur de luminosité

Un capteur de luminosité est un composant électronique utilisé pour mesurer le niveau de lumière ambiante dans un environnement donné. Les capteurs de luminosité utilisent une variété de technologies pour mesurer les niveaux de lumière, notamment des photorésistances, des photodiodes, des phototransistors et des capteurs de lumière ambiante.

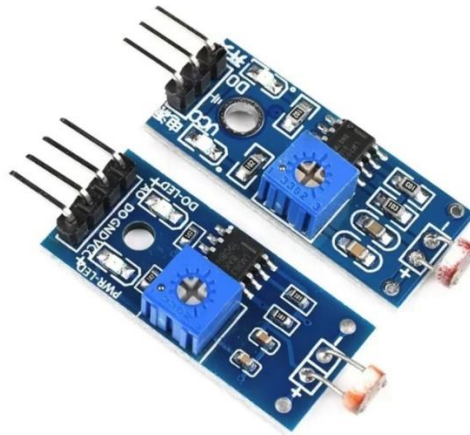


Figure 3.9: Capteur de luminosité

3.1.1.10. Relais

C'est un dispositif qui permet de transmettre un signal électrique ou optique d'un point à un autre à travers des câbles ou des fibres optiques. Les relais sont utilisés pour amplifier les signaux qui sont affaiblis lorsqu'ils sont transmis sur de longues distances, et pour transmettre les signaux entre différentes parties d'un réseau.



Figure 3.10: Relais

3.1.1.11.Supports

Utilisés pour soutenir et maintenir en place les différents types d'équipements utilisés.

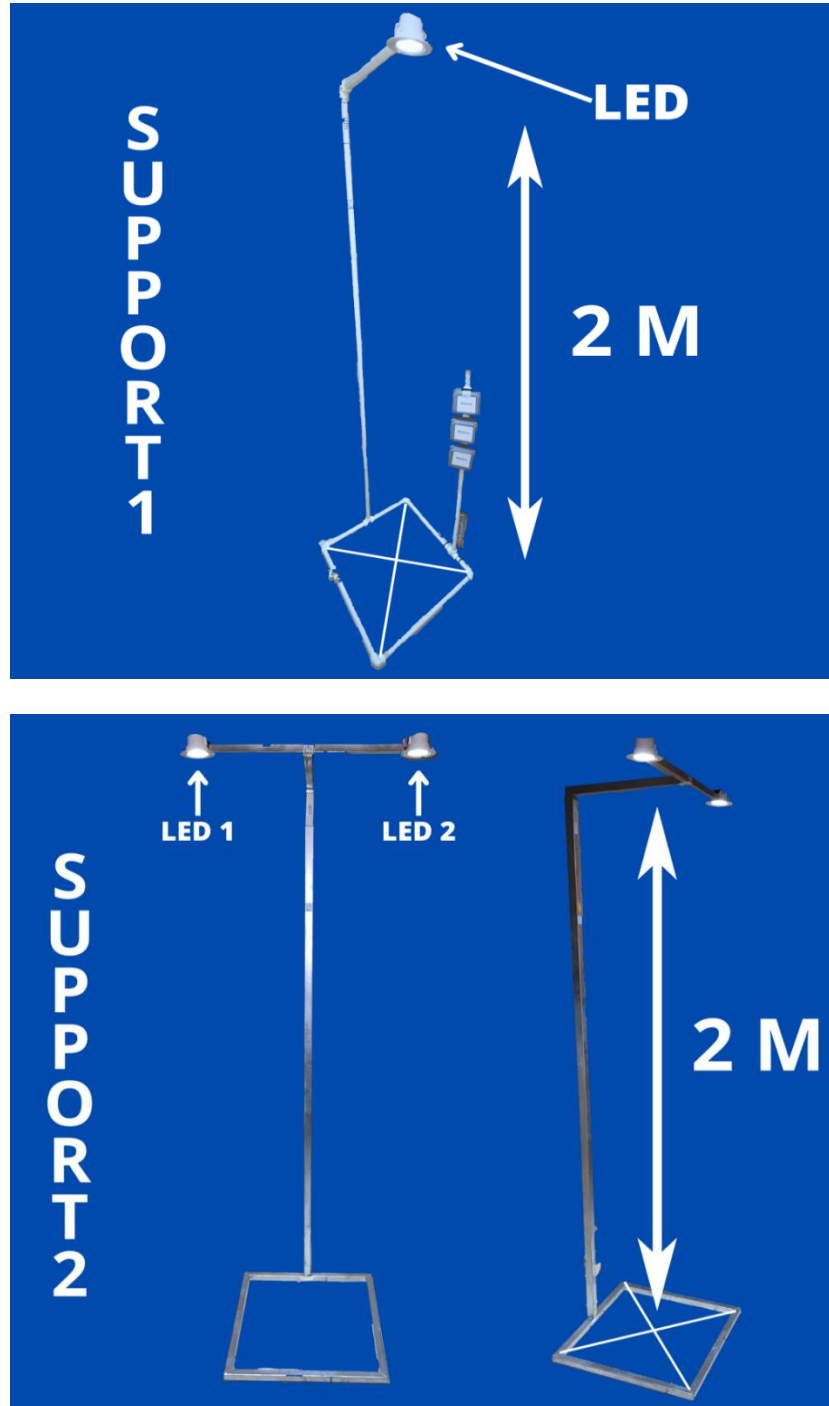


Figure 3.11: Supports

3.1.1.12. Boîtiers en PVC

Utilisés pour abriter et protéger les équipements électroniques tels que les commutateurs, les routeurs, les convertisseurs de média et les équipements de transmission.



PVC BOX

Figure3.12: Boîtiers en PVC

3.1.2. Protocoles adoptés

3.1.2.1. Le protocole I2C

I2C (Inter-Integrated Circuit) est un protocole de communication série utilisé pour interconnecter des circuits intégrés sur une carte électronique. Il permet la communication entre des composants électroniques tels que des capteurs, des actionneurs, des afficheurs, des mémoires, etc.

Ce protocole utilise deux lignes de communication : la ligne de données (SDA) et la ligne d'horloge (SCL). Les données sont transmises en série, bit par bit, sur la ligne de données, tandis que la ligne d'horloge est utilisée pour synchroniser la communication entre les composants

3.1.2.2. Le Bluetooth

Bluetooth est une technologie de communication sans fil à courte portée utilisée pour échanger des données entre des appareils électroniques. Elle est basée sur des ondes radio de courte portée qui permettent une communication bidirectionnelle entre deux appareils ou plus.

3.2. Conception de l'application Li-Fi Home

Dans le cadre de ce projet, nous avons développé une application appelée "Li-Fi Home" qui permet d'envoyer des instructions au système domotique via la technologie Li-Fi. Ces instructions sont ensuite transmises aux différents composants du système afin d'exécuter les actions désirées.

En résumé, l'application Li-Fi Home joue le rôle d'une interface de contrôle pour notre système domotique, offrant à l'utilisateur la possibilité d'envoyer des commandes à distance pour gérer divers aspects de sa maison.

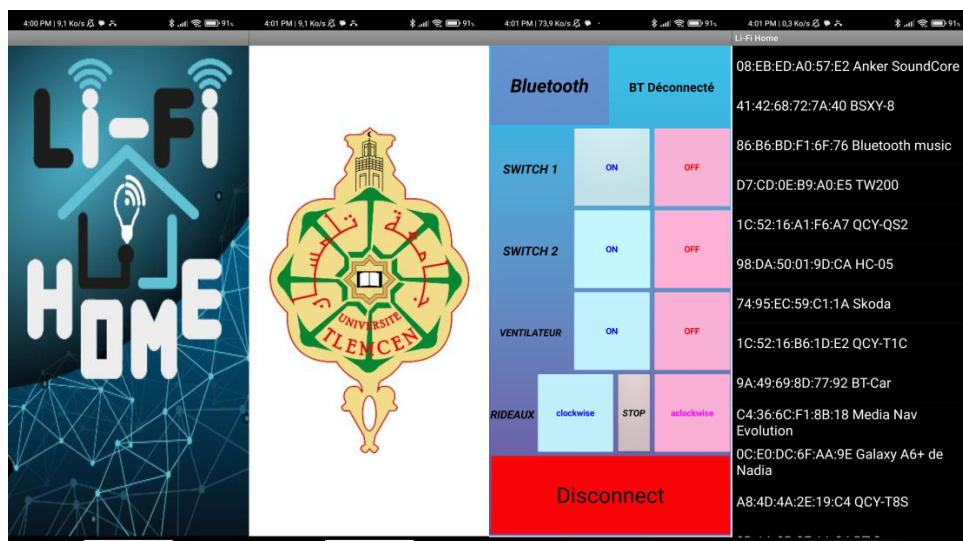


Figure 3.13: Application Li-Fi Home

3.2.1. Description de l'architecture du prototype

Le système global proposé est destiné à être installé dans une maison résidentielle comportant au moins deux pièces, chacune étant équipée de ses propres installations. Dans un but pédagogique, notre application, qui couvrira les fonctionnalités d'éclairage, de ventilation et de volets roulants, pourrait être étendue automatiquement à toutes les autres fonctionnalités des différents équipements de la maison.

Ainsi, notre prototype repose sur un fonctionnement "Maître/Esclaves" d'écrit dans ce qui suit.

3.2.1.1. Un Système Centralisé « Master »

C'est le système de contrôle général des installations. Ce dernier est connecté soit à Internet ou au Bluetooth, comme c'est le cas dans la présente application. Il est composé d'un Arduino UNO, d'un HC-05 et connecté au réseau I2C (UCC/GND/SCL/SDL)

Dans le présent cas, le « Master » qui reçoit l'instruction de l'application Li-Fi Home, va la transmettre, selon la fonctionnalité concernée, à chacun des deux « slaves » chargés de contrôler les récepteurs placés respectivement dans chacune des deux pièces de la maison. Le « slave » concerné par la fonctionnalité ciblée, exécutera automatiquement l'instruction.

L'utilisation d'un système d'adressage propre à chaque récepteur est **obligatoire** afin d'assurer l'exécution indépendante et unique de l'instruction souhaitée. L'architecture de base du prototype est présentée sur

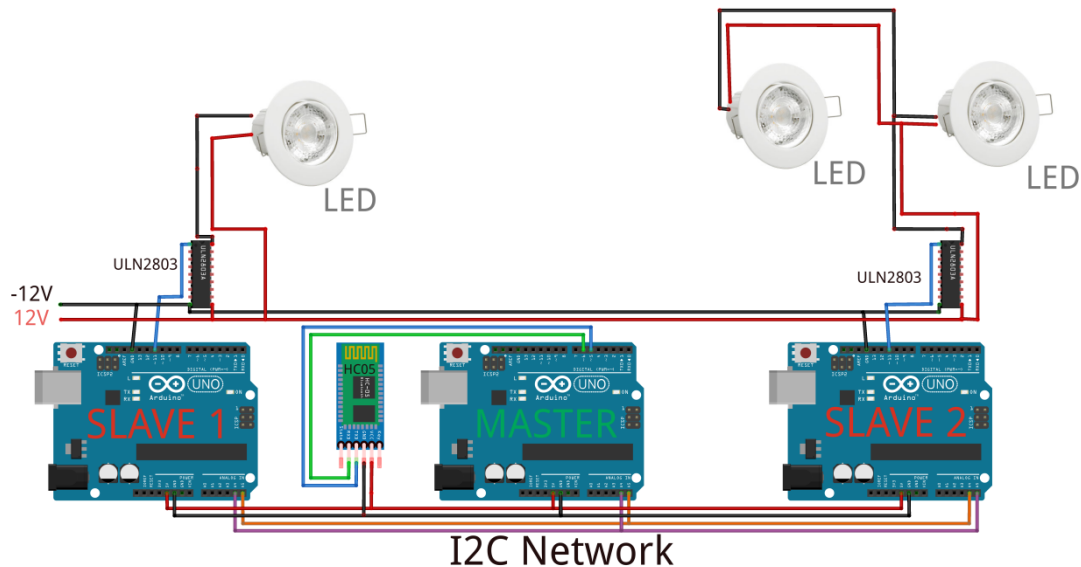


Figure 3.14: Architecture de base du prototype Li-Fi Home.

3.2.1.2. Le « Slave 1 »

C'est le système de contrôle de la pièce 1. Il se compose d'un Arduino Uno, d'un ULN2803, directement connecté au réseau I2C (UCC/GND/SCL/SDL) à l'aide de quatre câbles. Dans le présent cas, le « Slave 1 » contrôle trois récepteurs (R2, R3, R4), à l'aide de la communication Li-Fi.

Le « Slave1 » reçoit l'instruction transmise par le « Master » via l'application Li-Fi Home. Ce dernier la transmet au récepteur concerné à l'aide du système d'adressage mis en place.

3.2.1.3. Le « Slave 2 »

Il se compose d'un Arduino UNO, d'un ULN2803, directement connecté au réseau I2C (UCC/GND/SCL/SDL). C'est le système de contrôle de la pièce 2. Dans le présent cas, le « Slave 2 » contrôle un seul récepteur (R1), à l'aide de la communication Li-Fi. Le « Slave 2 » reçoit l'instruction transmise par le « Master » via l'application Li-Fi Home. Ce dernier la transmet au récepteur 1.

3.2.1.4. Les récepteurs

3.2.1.4.1. Le récepteur R2

Le récepteur R2, se compose d'un Arduino Nano, un L14G1, un capteur de température et d'humidité DHT11, d'un relais, d'une résistance de 10 kOhms et d'un interrupteur connecté à un ventilateur.

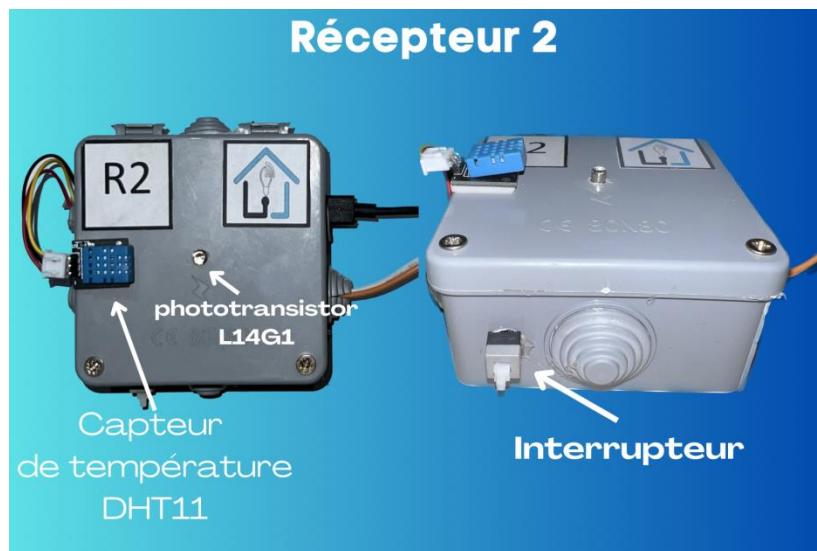


Figure 3.15: Récepteur R2, relié à un Ventilateur.

Le récepteur fonctionne selon deux modes : l'un manuel et l'autre automatique. Le fonctionnement manuel se déclenche lorsque l'interrupteur est à la position 0. Le récepteur reçoit alors, les signaux émis par la LED à l'aide du capteur L14G1 et exécute l'instruction en allumant ou en éteignant le relais.

Alors que le fonctionnement automatique est déclenché lorsque l'interrupteur est en position 1. Le récepteur va analyser la température de la pièce à l'aide du capteur DHT11. Si cette dernière est supérieure à un seuil préalablement programmé, le microcontrôleur va ordonner au relais, l'exécution de l'instruction et donc, la mise en marche du ventilateur.

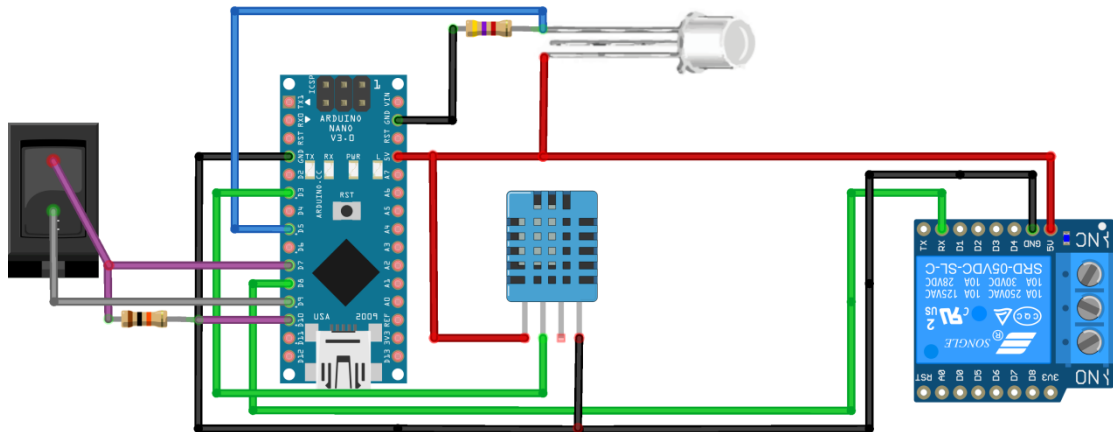


Figure 3.16: Connexion du récepteur R2.

3.2.1.4.2. Le récepteur R1

Ce dernier ne comporte ni relais, ni de capteur DHT11, mais un capteur de luminosité. Il est relié directement à un rideau fonctionnant grâce à un moteur (step by step). Il va donner instruction au rideau ou volet roulant en le levant, le rabaisant ou le stoppant carrément (**Fonctionnement manuel**).



Figure 3.17: Récepteur R1, relié à un rideau ou volet roulant.

Quant au fonctionnement du récepteur R1, ce dernier va analyser, la luminosité de la pièce. Si cette dernière est supérieure à un seuil programmé préalablement (sensibilité du capteur programmable), la mise en marche du rideau est déclenchée soit en montant ou en se rabaisant (**Fonctionnement automatique**).

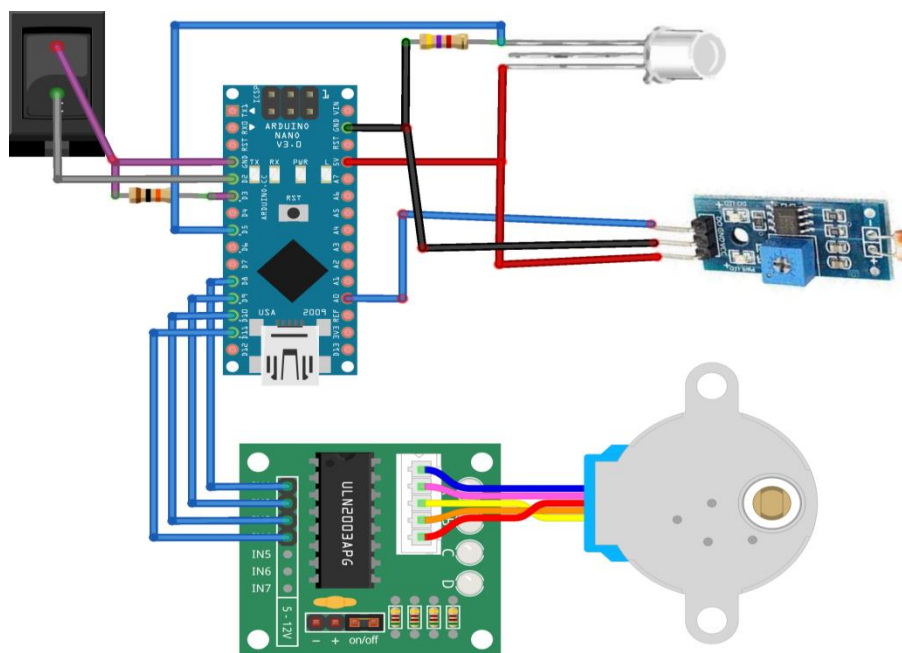


Figure 3.18: Connexion du récepteur R1.

3.2.1.4.3. Récepteurs R3 et R4

Ces deux récepteurs à l'architecture basique composée d'un Arduino Nano, et d'un Phototransistor L14G1, reçoivent les signaux émis par la LED (Rouge pour le récepteur R3 et Bleue pour le R4), et vont exécuter l'instruction en allumant ou en éteignant la lampe. Ce type de récepteur fonctionne sans aucun capteur.

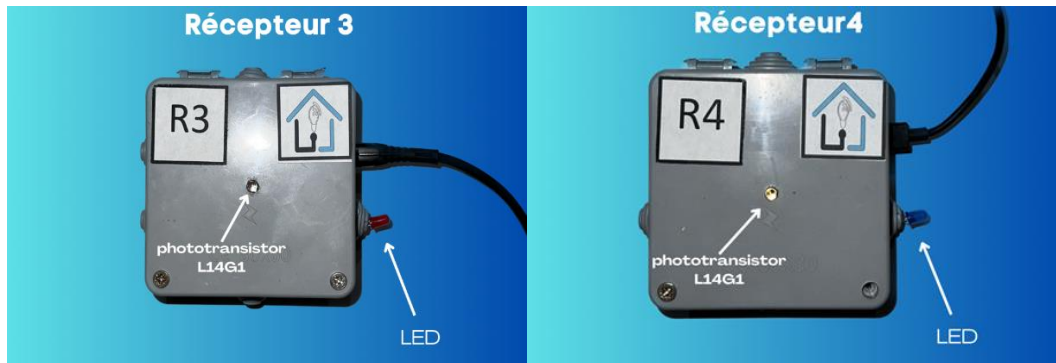


Figure 3.19 : Récepteurs R3 et R4, reliés aux LED Rouge et Bleue.

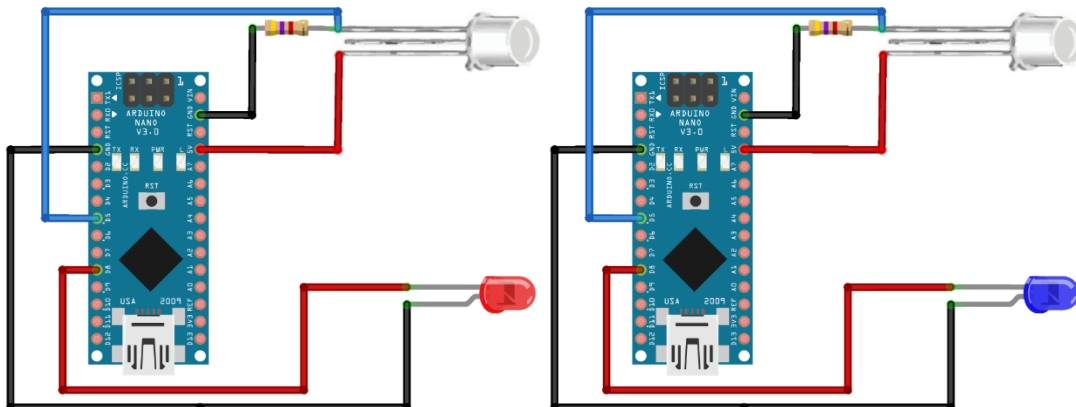


Figure 3.20 : Connexions des récepteurs R3 et R4

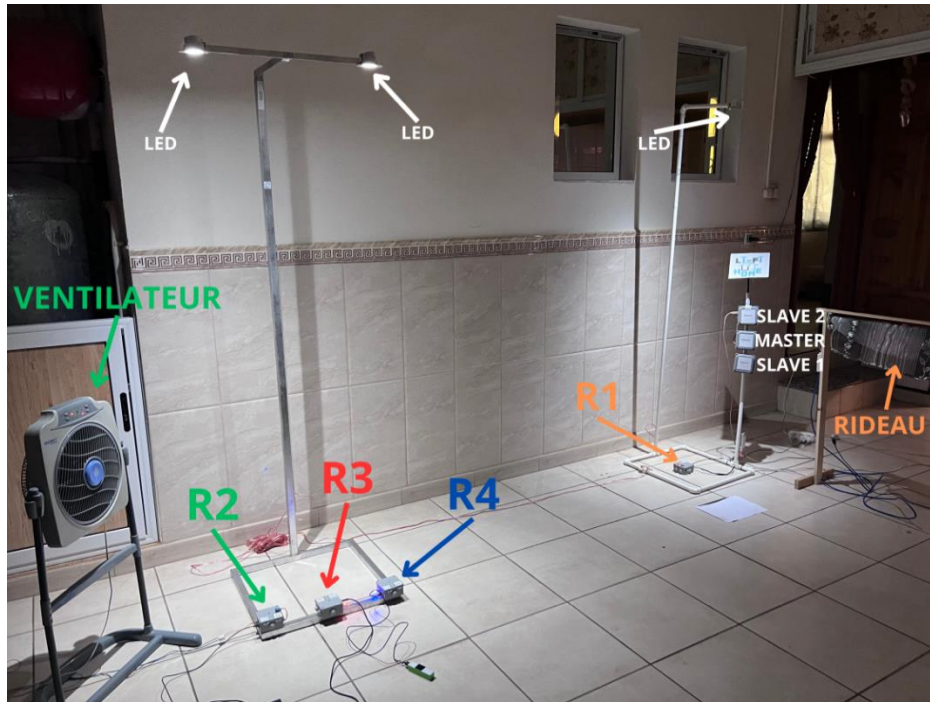


Figure 3.21: Prototype en fonctionnement.

3.2.2. Fonctionnement du prototype

➤ **Étape 1 :**

Alimenter les systèmes du prototype, y compris les récepteurs, le Maître, les deux esclaves et les LED. Positionner les récepteurs sous la zone de couverture des LED.

➤ **Étape 2 :**

Connecter le smartphone au système via Bluetooth. (Figure 2.22).

➤ **Étape 3 :**

Utiliser le système à l'aide de l'application Li-Fi Home. (Figure 2.23-Figure2.26).

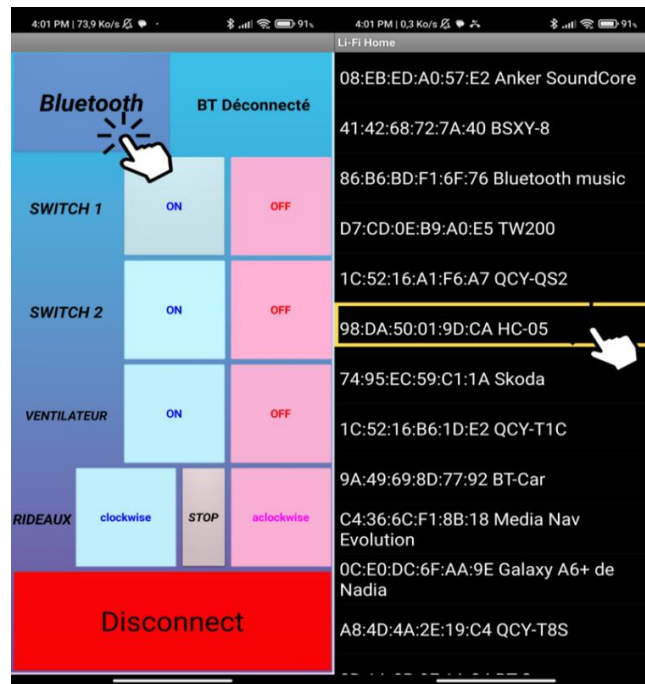


Figure 3.22: connexion du smartphone au système

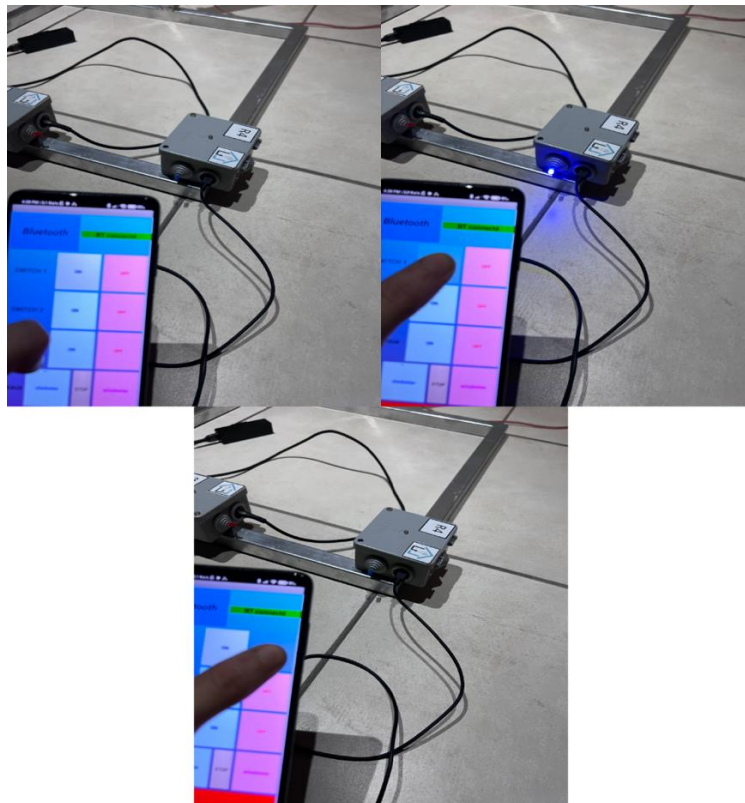


Figure 3.23: Contrôle de la LED Bleue

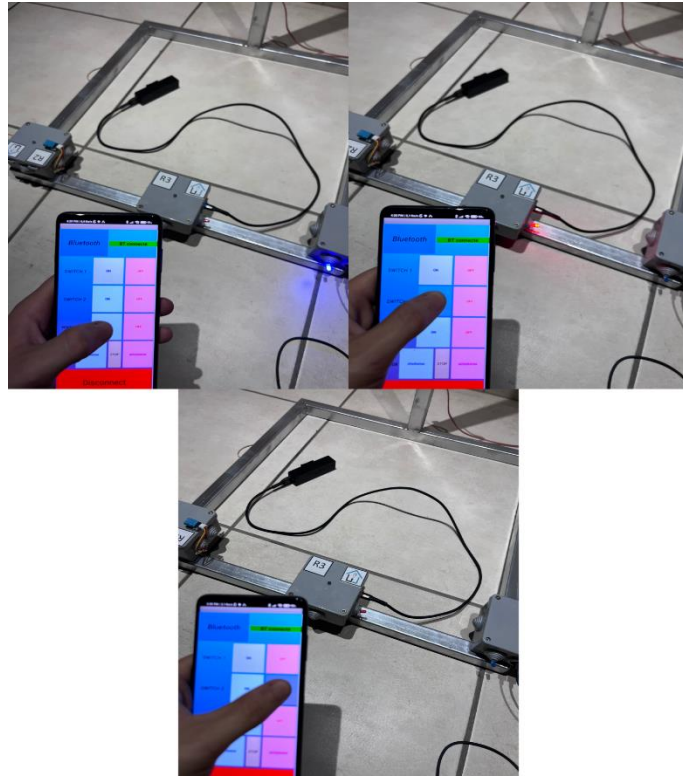


Figure 3.24: Contrôle de la LED Rouge.

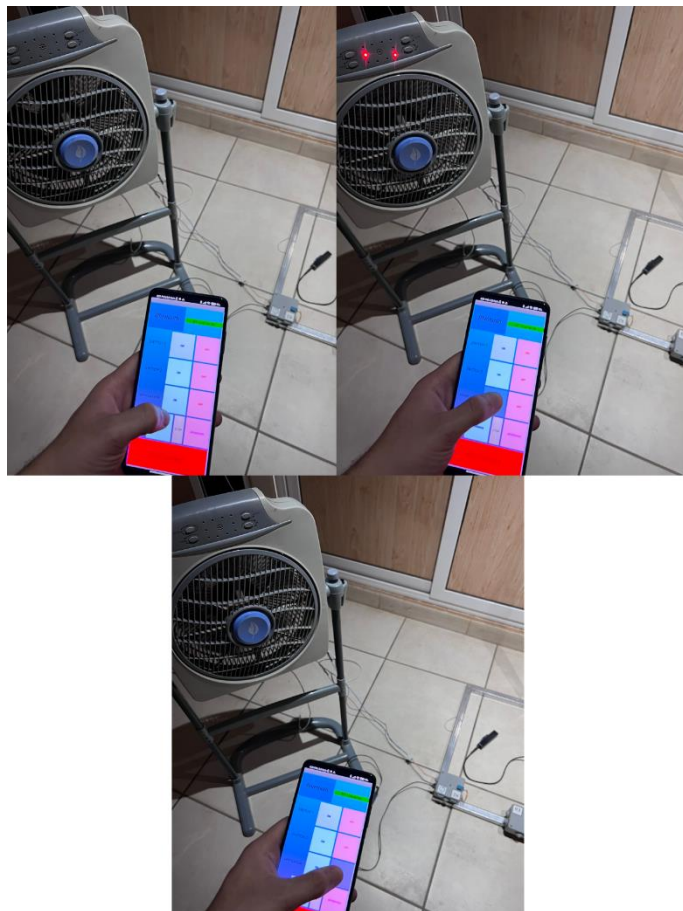


Figure 3.25: Contrôle du Ventilateur.

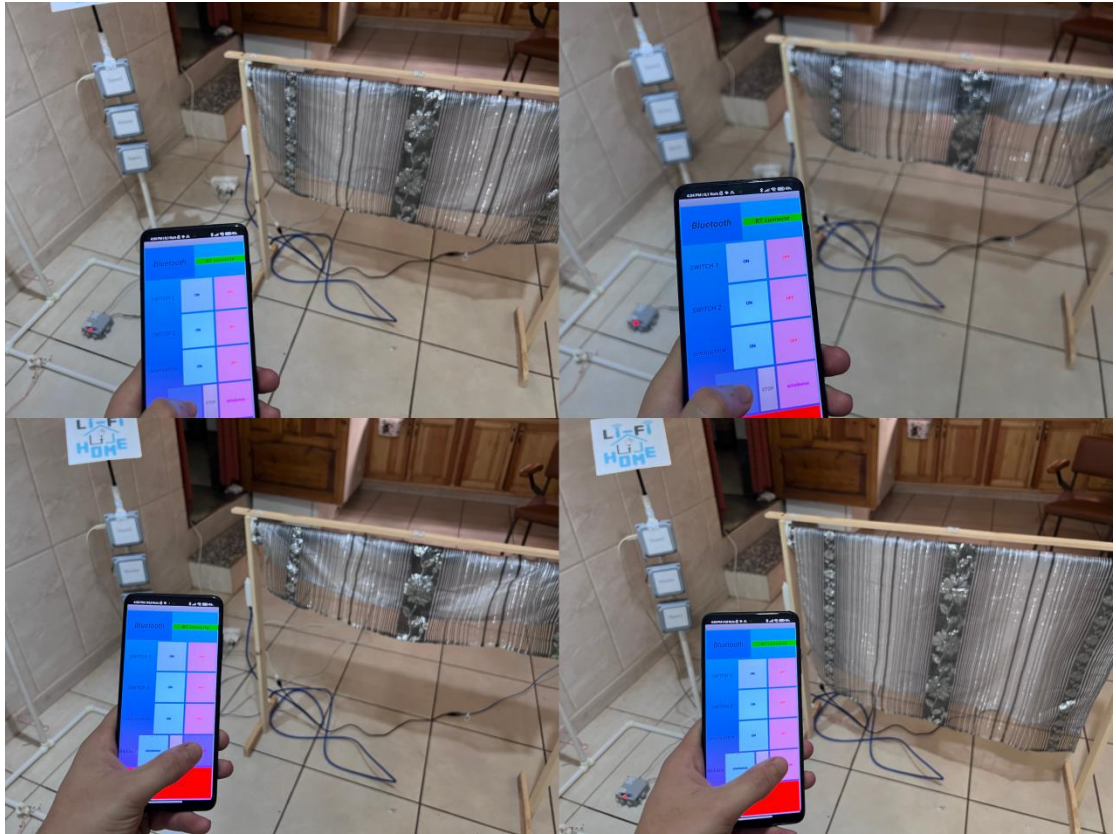


Figure 3.26: Contrôle du volet roulant (Rideau)

3.2.3. Evaluation du système proposé et discussion des résultats

Après avoir testé notre prototype, nous avons observé les points suivants :

1. Extensibilité du système Li-Fi : Ce système offre la possibilité d'ajouter un nombre illimité de récepteurs ou d'émetteurs dans chaque pièce. Cela permet une flexibilité dans l'adaptation du système à différentes configurations et besoins.
2. Portée de transmission : Pour étendre la portée de la lumière émise par les LED, plusieurs approches sont possibles. On peut ajouter plusieurs LED en parallèle ou augmenter la puissance des LED. Cependant, il est important de prendre en compte les limites de distance de transmission, car la portée dépend de la puissance de la source lumineuse et peut être affectée par les interférences.
3. Considérations liées à l'augmentation de la puissance des LED : L'augmentation de la puissance des LED peut permettre une transmission sur de plus longues distances, mais cela peut également entraîner une surchauffe et une réduction

de la durée de vie de la LED. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre la puissance nécessaire pour la transmission et la durabilité des LED.

4. Synchronisation et régulation de la lumière : L'ajout de LED en parallèle peut poser des défis en termes de synchronisation et de régulation de la lumière. Chaque LED doit recevoir la même quantité de courant pour éviter des distorsions dans le signal transmis.
5. Planification de l'installation des récepteurs et émetteurs : Pour assurer une transmission de données fiable, il est essentiel de planifier soigneusement l'installation des récepteurs et émetteurs. Il faut prendre en compte les obstacles physiques tels que les murs, les meubles, et la disposition des pièces pour optimiser la qualité du signal.

En conclusion, notre évaluation du système Li-Fi met en évidence ses avantages en termes d'extensibilité et de flexibilité, ainsi que certaines considérations techniques telles que la portée de transmission, la puissance des LED et la synchronisation de la lumière. Une planification minutieuse de l'installation est également nécessaire pour garantir une transmission de données fiable.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exploré la conception d'un système domotique utilisant la technologie Li-Fi pour offrir une connectivité rapide, sûre et fiable dans les maisons intelligentes. Nous avons examiné les avantages et les défis de l'utilisation de la communication Li-Fi pour la domotique, ainsi que les meilleures pratiques pour la conception et la mise en œuvre de ce type de système.

Nous avons également présenté un prototype basé sur un fonctionnement "Master/Slaves", où un système centralisé "Master" reçoit les instructions de l'application Li-Fi Home et les transmet aux "slaves" chargés de contrôler les récepteurs dans chaque pièce de la maison.

Le prototype a été testé et les résultats ont démontré la capacité d'extension du système Li-Fi, permettant l'ajout d'un nombre illimité de récepteurs ou d'émetteurs pour chaque chambre. Cependant, il est important de prendre en compte les limites de distance de transmission, les interférences potentielles et la planification minutieuse de l'installation des composants.

En somme, ce chapitre a démontré que la communication Li-Fi offre de nombreuses possibilités pour améliorer l'expérience utilisateur de la domotique, offrant une connectivité rapide, sécurisée et réduisant les interférences avec d'autres réseaux sans fil. Cette technologie présente un potentiel prometteur pour l'avenir des maisons intelligentes et ouvre la voie à de nouvelles innovations dans le domaine de la domotique.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études a exploré l'application de la technologie Li-Fi à la domotique, en se concentrant sur la conception d'un système domotique utilisant le Li-Fi pour fournir une connectivité rapide, sûre et fiable dans les maisons intelligentes. Tout au long de ce projet, nous avons examiné les avantages et les défis de l'utilisation du Li-Fi dans le domaine de la domotique, ainsi que les différentes étapes de conception et de mise en œuvre d'un tel système.

La technologie Li-Fi présente un potentiel prometteur pour la domotique, offrant des avantages tels qu'une vitesse de transmission élevée, une sécurité renforcée et une réduction des interférences avec d'autres réseaux sans fil. En utilisant la lumière comme moyen de communication, le Li-Fi permet une connectivité rapide et fiable, ce qui peut améliorer considérablement l'expérience utilisateur dans les maisons intelligentes.

L'implémentation pratique de notre prototype a démontré la faisabilité de l'utilisation du Li-Fi dans la domotique. Nous avons pu contrôler à distance des équipements tels que des ventilateurs, des volets roulants et des systèmes d'éclairage en utilisant l'application Li-Fi Home. Le système "Master/Slaves" mis en place a permis une gestion efficace des instructions et des informations entre les différents composants du système.

Cependant, il est important de noter que le déploiement à grande échelle du Li-Fi dans la domotique nécessite encore des efforts supplémentaires. Des défis techniques tels que la portée de transmission, la synchronisation des dispositifs et la planification minutieuse de l'installation doivent être pris en compte pour garantir une performance optimale du système.

En conclusion, ce projet a ouvert la voie à de nouvelles possibilités pour l'application du Li-Fi dans le domaine de la domotique. Il a démontré les avantages et les défis associés à l'utilisation du Li-Fi pour la connectivité dans les maisons intelligentes, et il a contribué à la conception d'un prototype fonctionnel. Ce travail constitue une base solide pour des recherches futures et des améliorations dans le domaine de la domotique Li-Fi, offrant de nouvelles perspectives pour une vie intelligente et connectée.

Bibliographie

- [1] Albert T.P et Al, «a new definition of intelligent building for Asia, in facilities,,» vol. vol17, pp. pp485-491.
- [2] Galissot, «Modéliser le concept de confort dans l'habitat intelligent : des multisensoriel au comportement,» *thèse de doctorat de l'université de Grenoble*, p. 235p., M 2006.
- [3] [En ligne]. Available: <https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/le-batiment-intelligent-smart-building/le-batiment-intelligent>.
- [4] E. I. B. G. (EIBG).
- [5] C. D.A.?, «How can building be intelligen,» mai2007. [En ligne]. Available: www.coggan.com/intelligent-building.html.
- [6] N. O. D. H. «La Haute Qualité Environnementale ou HQE est une certification,» [En ligne].
- [7] L. O. f. Standardization. [En ligne].
- [8] a. u. e. s. ., Vie de ville, «solutions pour bâtiment intelligent,,» n° % 1N°8, p. p63., janvier2008,.
- [9] Ouvrage BATIMENTS INTELLIGENTS, «EFFICACITE ENERGETIQUE, Optimisation, nouvelles technologies et BIM,» *édition DUNOD*.
- [10] O. n. t. e. B. ., p. EFFICACITE ENERGETIQUE, «Ouvrage BATIMENTS INTELLIGENTS,» *édition DUNOD*.
- [11] L. G. T. d. B. (GTB), «Les missions et les métiers de l'exploitation et de la maintenance des bâtiments public,» *Ouvrage Cerema*, vol. fiche n°06 , n° % 1: quel système choisir ?, pp. , 1 p., février 2017.

- [12] https://fr.wikipedia.org/wiki/Gestion_technique_de_b%C3%A2timent. [En ligne].
- [13] a. u. e. s. Vie de ville, « solutions pour bâtiment intelligent,» n° 1N°8, p. p86., janvier2008.
- [14] dem.
- [15] Z. :, «Présentation générale des réseaux sans fil,» [En ligne]. Available: <https://zenodo.org/record/1038504/files/Chapitre%201%20les%20technologies%20sans%20fils.pdf>.
- [16] «. V. l. c. A. a. s. a. r. c. ». D. C. a. N. v. 3. n. 2. p. 7. m. 2. L. U. Khan, «Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges».
- [17] X. F. P. H. e. P. M. P. H. Pathak, «Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges,» *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. vol. 17, n° 1no 4., pp. p. 2047-2077, , Fourthquarter 2015..
- [18] Q. W. W. H. e. Z. X. Z. Wang, «Visible light communications: modulation and signal processing,» *Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons*, pp. Inc, 2017..
- [19] P. G. e. M. K. Shukla, «Design of a Li-Fi Transceiver,» *Wireless Engineering and Technology*, Vols. %1 sur %2vol. 08., n° %1 no 04, , pp. p. 71-86, 2017.
- [20] A. B. a. X. Z. “. Chaabna, *An Indoor Positioning System Based on Visible Light Communication Using a Solar Cell as Receiver*, p. chapter book: *Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*, , 2018, Springer, DOI:10.1007/978-3-319-73192-6_5, ISB.
- [21] A. Cailean, « Etude et réalisation d'un système de communications par lumière visible (VLC/LiFi). Application au domaine automobile,» Vols. %1 sur %2Thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, France, , 2014. .

- [22] N. Kumar, «Visible Light Communication Based Traffic Information Broadcasting Systems,» *International Journal of Future Computer and Communication*, p. p. 26-30, 2014. .
- [23] R. U.-R. Sm, «Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande,» *Union Internationale des Télécommunications*,, 2018. .
- [24] P. G. e. M. K. Shukla, « Design of a Li-Fi Transceiver », *Wireless Engineering and Technology*,,» vol. vol. 08, n° %1no 04, p. p. 71-86, 2017.
- [25] T. C. e. S. Yilmaz, «An Overview of Visible Light Communication Syst International journal of Computer Networks & Communications,» Vols. %1 sur %2vol. 7,, n° %1 no 6,, pp. p. 139-150,, nov. 2015. .
- [26] L. U. Khan, «Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges,» *Digital Communications and Networks*, , Vols. %1 sur %2vol. 3,, n° %1 no 2, pp. , p. 78-88, , mai 2017. .
- [27] F. M. O. N. T. B. e. E. P. M. Uysal, «EEE Communications Magazine,» *EEE 802.15.7r1 Reference Channel Models for Visible Light Communications* , vol. vol. 55, pp. , p. 212-217, , janv. 2017. .
- [28] I. S. 8.-2. « », «IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light,» pp. p. 1-309,, sept. 2011. .
- [29] ANUSHA., «ELECTRONICSHUB,» (04 /04/2023).. [En ligne]. Available: <<https://www.electronicshub.org/wireless-communication-introduction-types>>.
- [30] G. A. C. Jr, «La radiodiffusion dans le monde ». Publié en 1959 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, place de Fontenoy, Paris 7e.,» p. 190 pages..
- [31] G. A. C. Jr., « La radiodiffusion dans le monde ». Publié en 1959 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, place de Fontenoy, Paris 7e.,» p. 190 pages .

- [32] I. P. C. s, «Différents Types of Wireless Communication with Application,» [En ligne]. Available: <<https://www.elprocus.com/types-of-wireless-communication-applications/>>.
- [33] I. N. MAGAZINE, «Les communications en satellites en pleine évolution,» n° %1No. 2, , p. 52 pages., 2019, .
- [34] R. W. EncyclopædiaUniversalis, «TÉLÉCOMMUNICATIONS La communication sans fil,» [En ligne]. Available: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/telecommunications-la-communication-sans-fil/>..>
- [35] Zenodo., «Présentation générale des réseaux sans fil,» [En ligne]. Available: <https://zenodo.org/record/1038504/files/Chapitre%201%20les%20technologies%20sans%20fils.pdf>.
- [36] E. P. Cus, «Différents Types of Wireless Communication with Applications,» (05/04/2023).. [En ligne]. Available: <<https://www.elprocus.com/types-of-wireless-communication-applications/>>.
- [37] E. P. Cus, «Différents Types of Wireless Communication with Applications,» (06/04/2023).. [En ligne]. Available: <https://www.elprocus.com/types-of-wireless-communication-applications>.
- [38] L. R. INFRAROUGES, (06/09/2020).. [En ligne]. Available: <http://www.utl-morlaix.org/wp-content/uploads/2017/06/UTL-7-LES-INFRAROUGES.pd>.
- [39] M. Guillaume, «Comment une télécommande infrarouge transmet-elle de l'information ?,» *Lycée Camille Claudel, Pontault Combault –Groupe de réflexion voie technologique, Académie de Créteil, , février 2014..*
- [40] E. P. Cus., « différents Types of Wireless Communication with Applications,» (06/04/2023).. [En ligne]. Available: <<https://www.elprocus.com/types-of-wireless-communication-applications/>>.

- [41] F. Tech, «Wi-Fi, vitesse de connexion et portée,» (06/09/2020. [En ligne]. Available: <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/internet-wi-fi-1648>.
- [42] ANUSHA, «ELECTRONICSHUB,» 06/09/2020).. [En ligne]. Available: <https://www.electronicshub.org/wireless-communication-introduction-types-applications/>>.
- [43] Frandroid., «Tout sur le Bluetooth : objets connectés et geomarketing,» (06/2020. [En ligne]. Available: https://www.frandroid.com/comment-faire/comment-fonctionne-la-technologie/232622_dossier-bluetooth-fonctionnement-interet-les-objets-connectes.
- [44] J. GARCIA-MARQUEZ, «LES COMMUNICATIONS par lumière visible : le Li-Fi,» *INDUSTRIE DES OBJETS CONNECTES*, n° % 1, Suat TOPSU..
- [45] Rapport, « Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande,» *Série SM Gestion du spectre, Genève, le*, n° % 1 UIT-R SM.2422-0, 06/2018..
- [46] Zenodo., « Présentation générale des réseaux sans fi,» [En ligne]. Available: <https://zenodo.org/record/1038504/files/Chapitre%201%20les%20technologies%20sans%20fils.pdf>.
- [47] L. L.-F. p.-i. r. l. r. s.-f. à. l. maison. [En ligne]. Available: <https://www.numerama.com/tech/143911-quest-ce-que-le-li-fi-ce-reseau-qui-veut-illuminer-le-monde.html> (Le Li-Fi peut-il révolutionner les réseaux sans-fil à la maison.
- [48] D. J. S. e. D. A. A. «. L.-F. (-F. T. o. D. t. L. o. F. T. ». P. Verma, p. 12, 2015. (P. Verma, 2015) .
- [49] T. [l. D. s. :. h.-a. « LIFI - Light Fidelity : Internet par lampe LED - 14 milliards de point LIFI d'ici 2020 Ans est-ce réaliste ? LiFi - Li-Fire and Visible Light Communication - concept and reality ». [En ligne].

- [50] «N2082401 (double-la-vitesse de-communication-du-lifi. N2082401, s.d.),»
[En ligne]. Available: [https://www.usinenouvelle.com/editorial/ces-2023-le-francais-oledcomm-double-la-vitesse de-communication-du-lifi](https://www.usinenouvelle.com/editorial/ces-2023-le-francais-oledcomm-double-la-vitesse-de-communication-du-lifi). .
- [51] «. L. L. p. L. .: C. Jurczak, *Illuminer les Télécommunications*, p. p. 18, 2017.
- [52] X. W. e. H. H. «. Y. Wang, « Resource Allocation in LiFi OFDMA Systems », in GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference,,» pp. , p.1-6 , Singapore, 2017.
- [53] L. L. p. L. C. Jurczak, «Illuminer les Télécommunications,» p. p. 18, , 2017..
- [54] C. C. e. D. O. H. Haas, « A guide to wireless networking by ligh,» «t », *Progress in Quantum Electronics*, , vol. vol. 55, p. p. 88-111, sept. 2017. .
- [55] « », « IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks,» IEEE, 2011.
- [56] Lucibel, «souhaite la bienvenue à l'IEEE 802.11bb, futur standard LiFi | Zone Bourse,» [En ligne]. Available: <https://www.zonebourse.com/LUCIBEL-16911681/actualite/Lucibel-souhaite-la-bienvenue-a-l-IEEE-802-11bb-futur-standard-LiFi-26975065/>.
- [57] I. 2. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks », «IEEE, 2011,» *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks* ».
- [58] F. Aftab, «International Journal of New Computer Architectures and their Applications,,» *POTENTIALS AND CHALLENGES OF LIGHT FIDELITY BASED INDOOR COMMUNICATION SYSTEM*, Vols. %1 sur %2vol. 6, , n° %1no 3,, , p. p. 91-102, 2016. .
- [59] [En ligne]. Available: <https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-materiaux-intelligents-55/page/2/>
.
- [60] [R. Mahendran, « Integrated LiFi (Light Fidelity) for smart communication through illumination », 2016 International Conference on Advanced

Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), Ramanathapuram, 2016, pp. 53-56

- [61] H. Haas, L. Yin, Y. Wang et C. Chen, « What is LiFi? », dans *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no 6, p. 1533-1544, 15 mars 2016
- [62] M. D. Soltani, M. Safari et H. Haas, « On throughput maximization based on optimal update interval in Li-Fi networks », 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montréal, QC, 2017, pp.1-6
- [63] M. H. Ahfayd, Z. A. Farhat, M. J. N. Sibley, P. J. Mather et P. I. Lazaridis, « Visible light communication-based system using high power LED and dicode pulse position modulation technique », 2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR), Belgrade, 2017, pp. 1-4
- [64] M. Dehghani Soltani, X. Wu, M. Safari et H. Haas, « Bidirectional User Throughput Maximization Based on Feedback Reduction in LiFi Networks », dans *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no 7, p. 3172-3186, juillet 2018
- [65] Z. Chen, D. A. Basnayaka, X. Wu et H. Haas, « Interference Mitigation for Indoor Optical Attocell Networks Using an Angle Diversity Receiver », dans *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no 18, p. 3866-3881, 15 septembre 2018
- [66] T. Nguyen, A. Islam, T. Yamazato et Y. M. Jang, « Technical Issues on IEEE 802.15.7m Image Sensor Communication Standardization », dans *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no 2, p. 213-218, février 2018
- [67] Iman Abdalla, Michael B. Rahaim et Thomas D.C. Little *Journal : IET Communications*, 2019, volume 13, numéro 7, page 822
- [68] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>

Annexe (BMC)



الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان-



تاريخ الايداع: 2023/05/17

المؤطر:

BOUACHA Abdelhafid بو عشة عبد الحفيظ

الطلاب:

Charef Oussama شارف اسامة

Ais Oussama عيس أسامة

رمز المشروع: FT-55

اسم المشروع: Étude et développement d'un système domotique exploitant la technologie Li-Fi

السنة الجامعية: 2023/2022

1. Proposition de valeur (Value proposition) :

Une domotique à la pointe de la technologie utilisant la communication LiFi pour B2C et B2B, qui permet une connectivité de haute qualité sécurisée à des vitesses de transmission de données ultra-rapides.

- ✓ La technologie LiFi offre une alternative innovante et sécurisée comparée à la technologie Wi-Fi traditionnelle, offrant une meilleure protection contre les cyberattaques, les interférences et les perturbations.
- ✓ Des solutions de domotique intelligentes permettant à notre clientèle un contrôle facile et pratique des dispositifs électroniques domestiques à partir d'un Smartphone ou d'une tablette.

2. Segments de clients (Customer segments) :

Étape 1 :

- ✓ Propriétaires de maisons et d'appartements résidentiels
- ✓ Gestionnaires de bâtiments commerciaux, bureaux, hôtels, centres commerciaux ainsi que les PME/PMI

Étape 2 :

- ✓ Les industriels de la domotique ayant besoin d'introduire la technologie Li-Fi dans leurs entreprises pour offrir des services innovants à leurs clients constituent un segment de clientèle potentiel pour notre entreprise.

3. Relations avec les clients (Customer Relationship) :

Service clientèle personnalisé pour :

- ✓ Répondre aux questions des clients,
- ✓ Les conseiller sur les différents produits et services,
- ✓ Les aider dans l'installation et la configuration des équipements,
- ✓ Résoudre les problèmes techniques.

Formation et documentation pour :

- ✓ Aider les clients à comprendre le fonctionnement de la technologie LiFi au service de solutions efficaces.

- ✓ A en tirer le meilleur parti par l'optimisation du rendement de leurs investissements dans ces solutions intelligentes donc durables

Retours et échanges faciles

- ✓ En cas de problème de qualité ou de défaut de fabrication des produits.

Nous offrons à nos clients la possibilité de bénéficier de tests gratuits

- ✓ Pour leur permettre de découvrir les fonctionnalités de notre produit et de s'assurer de leur adéquation avec leurs besoins avant de procéder à l'achat.

Notre entreprise propose un système de points de fidélité

- ✓ Qui permet à nos clients de gagner des points à chaque achat et de les échanger contre des réductions sur des achats futurs, ce qui encourage leur fidélité et renforce leur engagement envers notre marque.

4. Canaux de distribution (Channels) :

Le Site web de la société (<https://www.lifi-home.net/>) présentant :

- ✓ Les différents produits et services offerts,
- ✓ Des informations sur les innovations technologiques et les dernières tendances en matière de domotique et de technologie Li-Fi.
- ✓ Réseaux sociaux (Facebook, Instagram, LinkedIn, Twitter) pour augmenter la visibilité et perfectionner notre offre via les feed back de la marque, stimuler l'engagement des clients et attirer de nouveaux prospects.

La Participation régulière à :

- ✓ Des événements de l'industrie,
- ✓ Des salons professionnels et des conférences pour présenter les produits et services de la société,
- ✓ Établir des contacts avec des clients potentiels
- ✓ Renforcer la notoriété de la marque et mieux diagnostiquer le besoin industriel.

5. Partenaires stratégiques (Key partners)

- ✓ Les fournisseurs de composants électroniques (industries chinoises et locales) : Ils fournissent les composants électroniques nécessaires pour la production des produits de domotique LiFi.
- ✓ Les fabricants de matériel informatique (fournisseurs étrangers et locaux) : Ils fournissent les ordinateurs et les serveurs nécessaires pour la configuration des systèmes de domotique Li-Fi chez les clients.
- ✓ Les fournisseurs d'équipements de test et de validation : Ils fournissent les équipements nécessaires pour tester et valider les produits de domotique Li-Fi avant leur mise sur le marché.
- ✓ Les fournisseurs d'équipements de production : les entreprises locales et internationales qui proposent des solutions domotiques utilisant la technologie Li-Fi en Algérie, fournissent les équipements nécessaires pour la production à grande échelle des produits de domotique LiFi.

6. Activités clés (Key Activities) :

- ✓ Recherche et développement de nouveaux produits de domotique Li-Fi et amélioration des produits existants pour répondre aux besoins des clients (marché algérien).
- ✓ Conception de systèmes de domotique Li-Fi, de protocoles de communication et de logiciels pour assurer une intégration sans failles des différents équipements.
- ✓ Sélection et acquisition de composants électroniques, de matériel informatique et de capteurs auprès de fournisseurs de différentes sources fiables pour assurer une production régulière et une qualité constante des produits.
- ✓ Production de produits de domotique Li-Fi à grande échelle, en utilisant des méthodes de fabrication efficaces et des normes de qualité strictes pour garantir une production cohérente et fiable.
- ✓ Installation, configuration et maintenance de systèmes de domotique Li-Fi chez les clients, en veillant à ce que les produits fonctionnent correctement et répondent aux exigences des clients.

- ✓ Formation et maintenance pour les clients pour les aider à comprendre les produits de domotique Li-Fi et à les utiliser de manière efficace et efficiente.

7. Ressources principales (Key resources) :

- ✓ Personnel qualifié en développement de logiciels en électronique
- ✓ Partenaires et fournisseurs fiables pour l'approvisionnement en équipements
- ✓ Propriété intellectuelle protégée par des labels ; brevets et des marques.
- ✓ Financement suffisant pour le développement et la commercialisation des produits et services de domotique Li-Fi
- ✓ Infrastructure technique solide incluant laboratoires de recherche et de développement, installations de production, centres de données, outils de conception et de simulation, ainsi que des plateformes de test et de validation.
- ✓ Investissement dans le marketing et la communication pour promouvoir les produits et services de domotique Li-Fi et renforcer la notoriété de la marque.

8. Structure des coûts (Cost structure) :

- ✓ Coûts de développement et de recherche :

Ressources humaines pour la recherche et le développement de nouveaux produits et services Li-Fi. (170.000 DA)

- ✓ Coûts d'achat d'équipements de laboratoire, de test et de validation. (50.000)

- ✓ Coûts de production :

Un système Li-Fi home de 4 récepteurs :

3 LED (3.000 DA)

2 slaves (4.000 DA)

1 Master (2.500 DA)

4 récepteurs (16.000 DA)

Cout d'assemblage : 0 da

TOTAL : 25.500 DA

- ✓ Coûts de marketing et de vente :

Sponsor réseaux sociaux (100 \$ par mois) .

- ✓ Coûts liés à la création de supports marketing tels que des brochures, des vidéos et des sites Web. (200 \$ par mois) cout de formation
- ✓ Coûts d'exploitation :

Ressources humaines pour la gestion de l'entreprise, la comptabilité et les opérations quotidiennes.

- ✓ Coûts de location, d'électricité, d'eau et d'autres frais généraux. (50.000 da / mois) .
- ✓ Coûts liés à la gestion de la chaîne d'approvisionnement et à la logistique. (30.000 DA) .

9. Sources de revenus (Revenue streams) :

- ✓ Vente de produits de domotique Li-Fi pour la maison, tels que des éclairages intelligents, des capteurs, des prises intelligentes, des interrupteurs, des systèmes de sécurité, des systèmes de surveillance vidéo et solutions d'éclairage intelligent, des capteurs de température, des systèmes de contrôle d'accès, des systèmes de gestion de l'énergie, etc.
- ✓ Contrats de service pour l'installation, la maintenance et la mise à jour des équipements de domotique Li-Fi .
- ✓ Formation de personnel .
- ✓ Abonnements pour les mises à jour logicielles et les nouvelles fonctionnalités.

Business Model Canvas

Designed for:

Li-Fi Home

Designed by:

Charef Oussama
AIS Oussama

Date:

16/05/2023

Key Partners	Key Activities	Value Propositions	Customer Relationships	Customer Segments
<p>1- les fournisseurs de composants électroniques (industries chinoises). 2 -Fabricants de matériel informatique (Fournisseurs locaux). 3- Fournisseurs d'équipements de test et de validation. 4-Fournisseurs d'équipements de production. 5- Partenaires de distribution. 6- Partenaires de recherche.</p>	<p>1- Recherche et développement. 2- Sélection et acquisition de composants électroniques 4- Conception de systèmes de domotique LiFi 5- Production de produits de domotique LiFi à grande échelle. 6- installation, configuration et maintenance de systèmes de domotique LiFi . 7- formation et maintenance pour les clients. 8- Marketing et promotion des produits de domotique LiFi</p> <p>Key Resources</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Personnel qualifié 2- Partenaires et fournisseurs fiables 3- Infrastructure technique solide 4- Investissement dans le marketing et la communication 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Une domotique à la pointe de la technologie utilisant la communication LiFi 2- Des solutions de domotique intelligentes permettant un contrôle facile et pratique des dispositifs électroniques domestiques 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Service clientèle personnalisé 2- Formation et documentation pour aider les clients 3- Retours et échanges faciles en cas de problème de qualité <p>Channels</p> <ol style="list-style-type: none"> 1-Site web de la société 2-Réseaux sociaux (Facebook, Instagram, LinkedIn, Twitter) 3- Participation à des événements de l'industrie, des salons professionnels et des conférences 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Etape 1 : <ol style="list-style-type: none"> 1- Propriétaires de maisons et d'appartements résidentiels 2- Gestionnaires de bâtiments tertiaires: commerciaux, bureaux, hôtels, centres commerciaux,(PME/PMI) etc. 2- Etape 2: <ol style="list-style-type: none"> 1-Les industriels de la domotique
<p>Cost Structure</p> <p>Coûts de production :</p> <p>Un système Li-Fi home de 4 récepteurs :</p> <p>3 LED (3.000 DA) 2 slaves (4.000 DA) 1 Master (2.500 DA) 4 récepteurs (16.000 DA) TOTAL : 25.500 DA</p>		<p>Revenue Streams</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Vente de produits de domotique LiFi 2-Contrats de service pour l'installation, la maintenance 3- Abonnements pour les mises à jour logicielles et les nouvelles fonctionnalités. 		