

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



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
2^{ème} Année Master

Visible light communication :

Etude des performances d'un système MIMO

Filière : Automatique
Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Présenté par :
AFFOUNE Oussama
NAIDJA Abderaouf

Sous la direction de :
Pr. BABOURI Abdesselam

Septembre 2020

Remerciement

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

Le grand merci à notre encadreur Pr. Babouri Abdesselam pour avoir d'abord proposé ce thème, et d'avoir mis à notre disposition tous les moyens qui nous ont permis de mener à terme cette étude et aussi pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance à notre Co-encadreur de mémoire,

Dr. Xun Zhang, de l'Institut supérieur d'électronique de Paris (ISEP), qui a été toujours disponible durant notre stage.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à Dr. Chaabna Ameer et Monsieur Chouabia Halim pour leur aide et leur serviabilité.

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

Résumé

Dans ce travail nous avons réalisé et étudié les performances d'un système de communication sans fils à base de communication par la lumière visible (Li-Fi). Le système se compose de deux périphériques Arduino (microcontrôleur) comme émetteur et récepteur. L'interface utilisateur, basée sur le langage de programmation Python, est utilisée pour contrôler l'envoi et la réception de données. Une LED marque le début et la fin de la transmission de données. Pendant la transmission, une autre LED s'allume et s'éteignent signalant les 0 et 1 binaires. Ce système peut transmettre des textes et des images avec succès. Le débit au niveau du canal est 790 bits/s. Cependant, avec la limitation du temps de réponse du Photodiode, il est difficile d'atteindre des vitesses élevées de transmission de données. Avec des composants haut de gamme et à faible temps de réponse, il serait capable de transmettre des vidéos en direct à des vitesses élevées.

Mots clés : Communication sans fil, Li-fi, VLC, LED, Arduino.

Abstract

In this work we realized and studied the performances of a wireless communication system based on visible light communication (Li-Fi). The system consists of two Arduino peripherals (microcontroller) as transmitter and receiver. The user interface, based on the Python programming language, is used to control the sending and receiving of data. An LED marks the start and end of data transmission. During transmission, another LED lights up and goes out signaling binary 0 and 1. This system can transmit texts and images successfully. The rate at the channel level is 790 bps. However, with the limitation of the response time of the Photodiode, it is difficult to achieve high data transmission speeds. With high-end components and low response time, it would be able to transmit live video at high speeds.

Keywords : Wireless communication, Li-fi, VLC, LED, Arduino.

ملخص

في هذا العمل قمنا بدراسة اداء النظام اللاسلكي. LI-Fi يتكون النظام من اثنين من الأجهزة الطرفية اردوينو 'Arduino' (متحكم دقيق) كمرسل ومستقبل. يستخدم للتحكم في إرسال واستقبال البيانات بناءً على لغة البرمجة بايثون. يشير مؤشر LED الاول إلى بداية ونهاية نقل البيانات ,يضيء مؤشر LED آخر للإشارة إلى الثنائية 0 و 1. يمكن النظام نقل النصوص والصور بنجاح.حيث المعدل على مستوى القناة هو 790 بيت في الثانية.

ومع ذلك ، مع التقييد مع وقت استجابة ال Photodiode من الصعب تحقيق سرعات نقل بيانات عالية.

مع المكونات المتطورة ووقت الاستجابة المنخفض ، سيكون قادرًا على نقل الفيديو المباشر بسرعات عالية.

كلمات البحث : اتصالات لاسلكية , Li-fi , LED , Arduino , VLC .

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la communication sans fil	3
I.1 Introduction	4
I.2 DEFINITION D'UN SYSTEME DE COMMUNICATION SANS FIL	4
I.3 Différents systèmes de communication sans fil actuelles	4
I.3.1 Radiodiffusion	5
I.3.2 Communication sans fil par satellite	6
I.3.3 Téléphonie mobile cellulaire	8
I.3.4 Communication infrarouge	8
I.3.5 WLAN (Wi-Fi).....	10
I.3.6 Bluetooth	11
I.3.7 Communication sans fil par la lumière visible.....	12
I.4 Les avantages et les inconvénients des système de communication sans fil	14
I.4.1 Les avantages du déploiement d'un système de communication sans fil.....	14
I.4.1.1 Pour les utilisateurs :.....	14
I.4.1.2 Pour les responsables du déploiement du système de communication sans fil :	15
I.4.2 Les inconvénients d'un système de communication sans fils	15
I.5 Conclusion.....	16
Chapitre II : La Technologie VLC et Domaines d'Application	17
II.1 INTRODUCTION	18
II.2 Définition et principe de fonctionnement	18
II.2.1 Définition.....	18
II.2.2 Principe de fonctionnement.....	18
II.3 architecture d'un système de communication VLC.....	19
II.3.1 L'émetteur VLC	19
II.3.2 Le récepteur VLC	20
II.3.3 Canal de transmission :	20
II.3.4 Classification des liens optiques	21
II.3.4.1 Liens LOS.....	21
II.3.4.2 Liens diffus (NLOS)	21
II.3.5 Les modulations associées aux communications VLC.....	22

II.3.5.1	La Modulation OOK.....	22
II.3.5.2	La modulation VPPM.....	23
II.3.5.3	La modulation OFDM	23
II.3.5.4	La modulation CSK (Color shift keying)	24
II.4	DOMAINE D'APPLICATION	26
II.4.1	INDOOR	26
II.4.1.1	Localisation indoor.....	26
II.4.1.2	Transmission de données LI-Fl.....	26
II.4.1.3	Aviation.....	27
II.4.1.4	Hôpitaux et soins de santé.....	27
II.4.1.5	Environnements dangereux	28
II.4.2	OUTDOOR.....	28
II.4.2.1	Communications sous-marines	28
II.4.2.2	Véhicule et transport	29
II.5	Les différents systèmes de TRANSMISSION (SISO, SIMO, MISO et MIMO)	30
II.5.1	Système SISO	30
II.5.2	Système MISO.....	30
II.5.3	Système SIMO.....	31
II.5.4	Système MIMO	32
II.6	avantages et points faibles	33
II.6.1	Avantages.....	33
II.6.2	Points faibles	34
II.7	Conclusion.....	35
 Chapitre III : Réalisation et études des performances d'un système de communication par la lumière visible		36
III.1	INTRODUCTION	37
III.2	Matériel, équipement et langage de programmation.....	37
III.2.1	Microcontrôleur (Carte Arduino).....	37
III.2.2	LED ou Diode Laser (LD)	38
III.2.3	Photodiode (PD)	38
III.2.4	Circuit amplificateur.....	39
III.2.5	Installation d'équipements	39
III.2.6	Langage Python	41
III.2.7	Langage Arduino (Arduino, C, C++ ...)	41
III.3	La communication série Arduino/Python	42
III.3.1	Lecture des données à partir d'Arduino	42

III.3.2	Envoie des données à l'Arduino	42
III.3.3	Le module Serial	42
III.3.4	Initialisation du port série	43
III.4	Conception du système et protocole de transmission	43
III.4.1	Conception du système.....	43
III.4.1.1	Conception de l'émetteur.....	43
III.4.1.2	Conception du récepteur.....	44
III.4.2	Transmission des données et synchronisation.....	45
III.4.2.1	Emission des données	45
III.4.2.2	Réception des données	46
III.4.2.3	Synchronisation.....	46
III.4.3	Protocole de Transmission :.....	46
III.4.3.1	Transmission des textes :.....	48
III.4.3.2	Transmission des images.....	48
III.5	Description et commentaires du programme utilisé	49
III.5.1	Programation de l'interface de transmission (Python).....	49
III.5.1.1	La fonction pic ().....	49
III.5.1.2	La fonction bin_str ()	49
III.5.1.3	Initialisation du port série.....	49
III.5.1.4	Le message de confirmation entre Arduino et Python	50
III.5.1.5	Programme de transmission d'une image.....	50
III.5.1.6	Programme de Transmission d'un texte	51
III.5.2	Programmation du module émetteur (Arduino) :.....	52
III.5.2.1	La fonction void setup ()	52
III.5.2.2	La fonction SendData()	53
III.5.2.3	La fonction Transm() et ResetLight().....	53
III.5.2.4	La fonction loop()	54
III.5.3	Programmation du module récepteur (Arduino)	55
III.5.3.1	La fonction Void setup () et Voidloop ()	55
III.5.3.2	La fonction GetData () :	55
III.5.4	Programation de l'interface de réception (Python).....	56
III.5.4.1	Programme de réception d'une image :.....	56
III.5.4.2	Programme de réception d'un texte :	57
III.6	Etudes des performances du système réalisé.....	58
III.6.1	Débit maximale et taille de transmission des données	58
III.6.2	Taux d'erreur binaire (BER)	59

III.6.3	Influence de la distance entre émetteur et récepteur	60
III.6.4	Amélioration des performances.....	60
III.7	CONCLUSION.....	60
Conclusion Générale.....		61

Liste des abbreviations

GPS: Global Positioning System

IR: Infra Rouge

EM: Electromagnetic

OWC: Optical wireless communications

OOK: On-Off Keying

QAM: Quadrature amplitude modulation

LED: Light Emitting Diode

Li-Fi: Light Fidelity

VLC: Visible Light Communication

LD : Laser Diodes

PD: Photodiode

RF: Radiofréquence

RVB: Rouge Vert Bleu

BER: Bit Error Rate

DAC : Digital Analog Converter for Information Interchange

LOS : Line of Sight

NLOS : No Line of Sight

TCA : Transconductance

V2V : véhicule/ véhicule

I2V : infrastructure / véhicule

ADC : Analog Digital Converter

IoT : Internet of Things

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IM: Intensity Modulated

DD: Direct Detected

PWM : Pulse Width Modulation

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OOK : On Off Keying

TDMA : Time Division Multiple Access

PPM : Pulse Position Modulation

VPPM : Variable Pulse Position Modulation

CSK : Color Shift Keying

SISO : single Input-single Output

SIMO : single Input-Multiple Output

MISO : Multiple Input-single Output

MIMO : Multiple Input-Multiple Output

AOP : Amplificateur Opérationnel

CAN : Convertisseur Analogique Numérique

ASCII : American Standard Cod

Table des figures

FIGURE I.1 SYSTEME DE RADIODIFFUSION SANS FIL	5
FIGURE I.2 SYSTEME DE RADIO-TELEVISION SANS FIL	6
FIGURE I.3 COMMUNICATION SANS FIL PAR SATELLITE	7
FIGURE I.4 TELEPHONIE MOBILE CELLULAIRE	8
FIGURE I.5 COMMUNICATION SANS FIL INFRAROUGE	9
FIGURE I.6 SPECTRE DE FREQUENCES DES ONDES INFRAROUGES	10
FIGURE I.7 COMMUNICATION SANS FIL PAR WI-FI	11
FIGURE I.8 COMMUNICATION SANS FIL PAR BLUETOOTH	12
FIGURE I.9 SPECTRE DE FREQUENCES DE LA LUMIERE VISIBLE	13
FIGURE I.10 COMMUNICATION PAR LUMIERE VISIBLE (VLC)	14
FIGURE II.1 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	19
FIGURE II.2 SCHEMA FONCTIONNEL D'UN SYSTEME VLC	19
FIGURE II.3 CANAL DE TRANSMISSION IM/DD	20
FIGURE II.4 TYPES DES LIENS OPTIQUES	22
FIGURE II.5 MODULATION VPPM	23
FIGURE II.6 MODULATION CSK	25
FIGURE II.7 UTILISATION DE VLC POUR LOCALISATION EN INTERIEUR	26
FIGURE II.8 EXEMPLE D'UN SYSTEME LI-FI	26
FIGURE II.9 UTILISATION DE VLC DANS L'AVION	27
FIGURE II.10 ILLUSTRATION D'SYSTEMES VLC APPLIQUES AU DOMAINE MEDICAL	28
FIGURE II.11 UTILISATION DE VLC DANS LA COMMUNICATION SOUS-MARINE	29
FIGURE II.12 COMMUNICATION V2V ET I2V	29
FIGURE II.13 DISPOSITIF MISO	31
FIGURE II.14 DISPOSITIF SIMO	32
FIGURE II.15 DISPOSITIF MIMO	32
FIGURE II.16 LES DIFFERENTS SYSTEMES	33
FIGURE III.1 PHOTO DE LA CARTE ARDUINO UNO UTILISEE.	37
FIGURE III.2 PHOTO DES DIODES LASER UTILISES.	38
FIGURE III.3 PHOTO DE DES PHOTODIODES BPW34 UTILISEES.	39
FIGURE III.4 PHOTO DU SYSTEME DE COMMUNICATION LI-FI REALISE	40
FIGURE III.5 PHOTO DU MODULE EMETTEUR	40
FIGURE III.6 PHOTO DU MODULE RECEPTEUR	41
FIGURE III.7 MODULE EMETTEUR AVEC CIRCUIT	43
FIGURE III.8 MODULE RECEPTEUR AVEC CIRCUIT	44
FIGURE III.9 MODULE RECEPTEUR AVEC CIRCUIT AMPLIFICATEUR	45
FIGURE III.10 DIAGRAMME D'ALLUMAGE ET D'EXTINCTION DE LED	45
FIGURE III.11 SCHEMA RESUMANT LE PROTOCOLE DE TRANSMISSION DES TEXTES ET DES IMAGES.	47

Liste des tableaux

TABLEAU II.1 MODULATION CSK.....	25
TABLEAU III.1 RESULTATS DES ESSAIS DE TRANSMISSION.....	58

Introduction générale

La communication sans fils est couramment utilisée dans la vie moderne. Elle est définie comme la communication entre deux points sans connexion physique directe ni conducteur électrique entre eux. Dans les années 2000, le Wi-Fi, le Bluetooth, la radio étaient les types standard de communication sans fil.

Récemment, une nouvelle technique de communication sans fils basée sur la communication par la lumière visible s'appelle Li-Fi. Le terme Li-Fi a été introduit par Harald Hass dans son discours *TED Global sur Visible light Communication*. Hass a dit « Au cœur de cette technologie se trouve une nouvelle génération de diodes électroluminescentes à haute luminosité ». Il a également introduit le processus de transmission comme « Très simplement, si la LED est allumée, un 1 numérique est transmis, si elle est éteinte, 0 est transmis. Ils peuvent être allumés et éteints très rapidement, ce qui donne de belles opportunités pour les données transmises. ». Les données à transmettre sont d'abord encodées dans la lumière en variant le taux de scintillement qui génère différentes chaînes de 1 et 0. Généralement, la vitesse de modulation de la LED est si rapide que l'œil humain ne peut pas détecter la variation, et par conséquent la sortie est générée en continu [1].

Les communications sans fil, telles que le Wi-Fi et le Bluetooth, sont couramment utilisées dans la vie quotidienne. Cependant, alors que de plus en plus d'appareils sans fil occupent les fréquences disponibles, le spectre de fréquences atteint une capacité maximale. Dans le spectre des fréquences radio ou le spectre électromagnétique, le Wi-Fi est de 2,4 GHz à 5 GHz, et la lumière visible est comprise entre 400 et 750THz. Ainsi, le Li-Fi, communiquant par ondes lumineuses entre deux appareils, devient une future solution pour transmettre des données. Les dispositifs LED avec un générateur d'ondes de données peuvent conserver la fonctionnalité d'éclairage d'une LED tout en envoyant des données en arrière-plan. Avec la gamme complète du spectre de la lumière visible et infrarouge, nous pouvons transmettre des données jour et nuit.

Avec Li-Fi, la communication de données se produit à l'intérieur avec une faible latence et une vitesse élevée, et il est difficile à le détourner de l'extérieur de la pièce. Du côté du récepteur, un petit panneau solaire reçoit à la fois le signal et recycle l'énergie pour charger la batterie pour une utilisation future [2],[3],[4],[5]. Il économise ainsi l'énergie perdue lors de la transmission de données sans fil standard. Les transmissions de données sans fil sont toujours autour de nous. Cependant, les appareils ménagers tels que les micro-ondes, les téléphones

sans fil et autres utilisent les mêmes fréquences que le Wi-Fi et peuvent interférer avec la connexion Wi-Fi. En outre, d'autres facteurs tels que l'espace physique et certains matériaux peuvent diminuer la qualité de la connexion. De plus, les pirates sans fils peuvent utiliser un faux signal Wi-Fi pour inciter les gens à se connecter via leur réseau et à récupérer les informations de leurs appareils. Bien que le Wi-Fi puisse être protégé par des mots de passe, il est parfois sujet au piratage. L'initiative de ce projet est de trouver un autre moyen d'accroître la sécurité des données et d'augmenter la stabilité et la vitesse de transmission des données. Dans ce travail nous allons réaliser et étudier les performances d'un système de communication sans fils à base de communication par la lumière visible (Li-Fi).

Ce mémoire est composé de trois chapitres. Le premier porte sur les différents types de communication sans fil. Le deuxième chapitre est consacré à la communication par la lumière visible (VLC). Dans le troisième chapitre, nous allons réaliser et étudier les performances d'un système de communication sans fils. L'objectif de ce travail de fin d'étude est la mise en œuvre d'un système Li-Fi permettant la transmission des textes et des images.

Chapitre I

Généralités sur la communication sans fil

I.1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, la majorité des appareils électroniques et la quasi-totalité des appareils «mobiles» (tels que les téléphones portables, microordinateurs...) disposent de moyens de connexion à un ou plusieurs types de système de communication sans fil comme le Wifi, le Bluetooth ou l'infrarouge. Le terme de communication sans fil a été introduit au 19ème siècle et la technologie de communication sans fil s'est développée au cours des années suivantes. C'est l'un des moyens les plus importants de transmission d'informations d'un appareil à d'autres appareils. 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. De nos jours, la technologie de communication sans fil fait référence à une variété de dispositifs et technologies allant de téléphones intelligents aux ordinateurs, onglets, ordinateurs portables, technologie Bluetooth, imprimantes. Ce chapitre donne un aperçu sur les systèmes de communications sans fils [6].

I.2 DEFINITION D'UN SYSTEME DE COMMUNICATION SANS FIL

Un système de communication sans fil (en anglais Wireless communication) est, comme son nom l'indique, un système dans lequel au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaison filaire. Grâce aux systèmes de communication 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 [7].

I.3 DIFFERENTS SYSTEMES DE COMMUNICATION SANS FIL ACTUELLES

De nos jours, le système de communication sans fil est devenu une partie essentielle de divers types de dispositifs, qui permet à l'utilisateur de communiquer même à partir de zones

éloignées. 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.

Les importants systèmes de communication sans fil actuelles sont :

I.3.1 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 (Figure I.1) [8].

En tant que moyen de grande information, la radiodiffusion fut plutôt une application spéciale et un perfectionnement de la radiotéléphonie qu'une innovation technique proprement dite. Comme la radiotélégraphie, la radiotéléphonie a été appliquée d'abord dans le service maritime, et, du fait qu'elle n'exigeait pas l'emploi du code morse, on pouvait se contenter d'opérateurs relativement peu qualifiés pour en assurer le service. Mais le lourd handicap de la radiotéléphonie était l'impossibilité d'assurer le secret des communications : les messages radiotéléphoniques étaient accessibles à quiconque disposait d'un récepteur. La radiodiffusion est née au moment où l'on a décidé d'exploiter cette absence de secret [9].

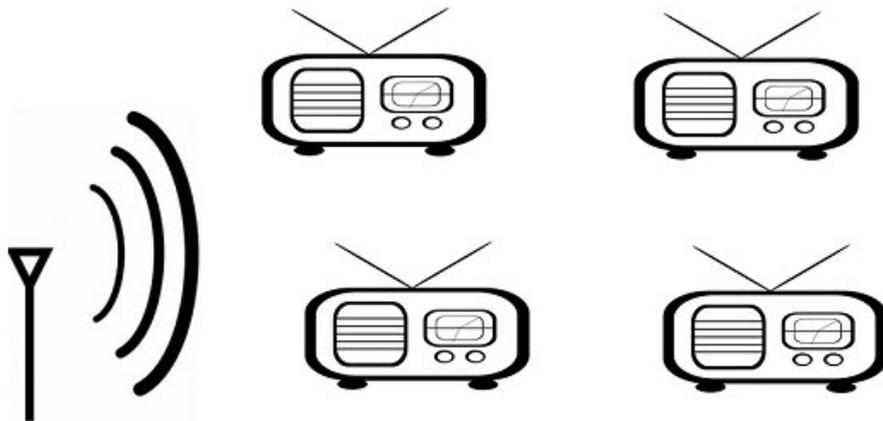


Figure I.1 Système de radiodiffusion sans fil

Les stations radio-électriques sont caractérisées par leur fréquence d'émission. La gamme des fréquences dont elles peuvent disposer constitue ce qu'on appelle généralement le spectre radio-électrique (ou électromagnétique). L'utilisation rationnelle de ce spectre, de capacité

limitée, est la clé de bien des problèmes qui se posent en radiodiffusion. Les caractéristiques des bandes de fréquences situées dans les diverses parties du spectre influent sur l'efficacité et sur la portée des émissions de radio. Sur telle fréquence, on peut diffuser des programmes de haute fidélité avec une bonne réception dans une zone de dimensions restreintes ; une autre fréquence permettra de couvrir une zone plus vaste, des dimensions d'un pays ou d'une région ; une autre enfin permettra de desservir directement les habitants d'un pays situé à des milliers de kilomètres de l'émetteur. Mais la radiodiffusion n'est pas le seul service à utiliser le spectre des fréquences. Elle doit en effet le partager avec la télévision, la radiotélégraphie et la radiotéléphonie à grande distance, les services aéronautiques et maritimes, le service des amateurs, celui des stations gouvernementales et bien d'autres encore [9].

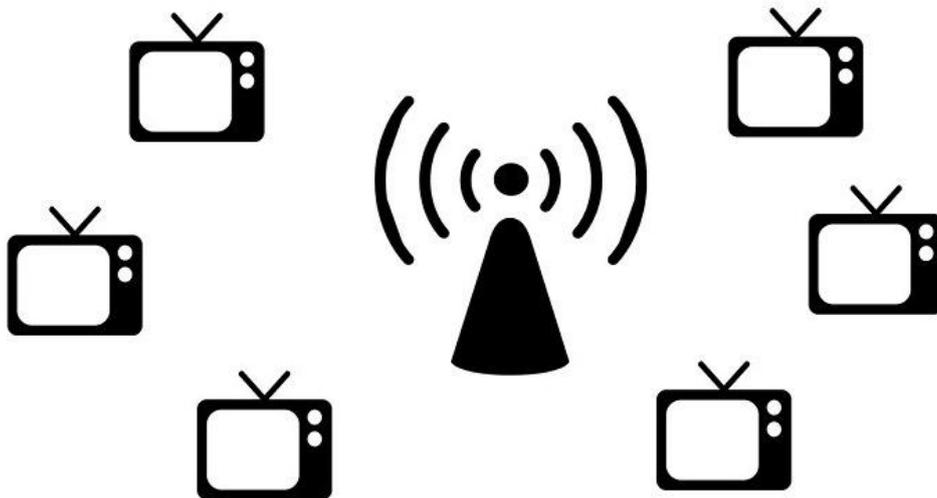


Figure I.2 Système de radio-télévision sans fil

I.3.2 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 I.3 Communication sans fil par satellite

La communication par satellite est un type de technologie de communication sans fil autonome, elle est largement répandue dans le monde entier pour permettre aux utilisateurs de rester connectés presque partout sur la terre. Lorsque le signal (un faisceau de micro-ondes modulé) est envoyé à proximité du satellite, le satellite amplifie le signal et le renvoie au récepteur d'antenne qui se trouve à la surface de la terre. La communication par satellite comprend deux composants principaux comme le segment spatial et le segment sol : le segment sol comprend les équipements fixes ou mobiles de transmission, de réception et d'équipements auxiliaires et le segment spatial, qui est principalement le satellite lui-même [6].

Les satellites jouent un rôle essentiel pour améliorer le quotidien des populations dans l'économie numérique d'aujourd'hui. La quasi-totalité des secteurs font appel aux technologies par satellite d'une manière ou d'une autre, qu'il s'agisse de l'agriculture, des services bancaires ou des transports. Les satellites contribuent à sauver des vies en situation d'urgence et fournissent des données fondamentales pour parvenir à mieux protéger l'environnement. Ils joueront un rôle majeur pour accélérer la réalisation des objectifs de développement durable fixés par les Nations Unies, en particulier grâce à des innovations pouvant offrir des solutions plus économiques pour connecter ceux qui ne le sont pas encore et fournir de meilleurs services. Les petits satellites, les satellites à haut débit, les satellites à propulsion tout électrique et les satellites en orbite terrestre basse (LEO) comptent parmi les innovations révolutionnaires qui offrent une gamme de solutions pour les services financiers numériques, l'amélioration des soins de santé ou encore des villes plus intelligentes [10].

I.3.3 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 [11].



Figure I.4 Téléphonie mobile cellulaire

L'avancement des réseaux mobiles est dénombré par générations. De nombreux utilisateurs communiquent sur une seule bande de fréquences via les téléphones mobiles. Les téléphones cellulaires et sans fil sont deux exemples de communication sans fils. En règle générale, les téléphones cellulaires ont une plus grande gamme de réseaux pour fournir une couverture, mais les téléphones sans fil ont une portée limitée. À l'instar des appareils GPS, certains téléphones utilisent les signaux des satellites pour communiquer [6].

I.3.4 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 I.5 Communication sans fil infrarouge

Dans le spectre électromagnétique, le rayonnement IR se situe entre les micro-ondes et la lumière visible. Ainsi, ils peuvent être utilisés comme source de communication. Pour une communication infrarouge réussie, un émetteur photo LED et un récepteur photo diode sont nécessaires. L'émetteur LED transmet le signal IR sous forme de lumière non visible, qui est capturée et enregistrée par le photorécepteur. Ainsi, les informations entre la source et la cible sont transférées de cette manière. La source et la destination peuvent être des téléphones mobiles, des téléviseurs, des systèmes de sécurité, des ordinateurs portables, etc. prend en charge la communication sans fil [6].

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 (figure I.6) [12].

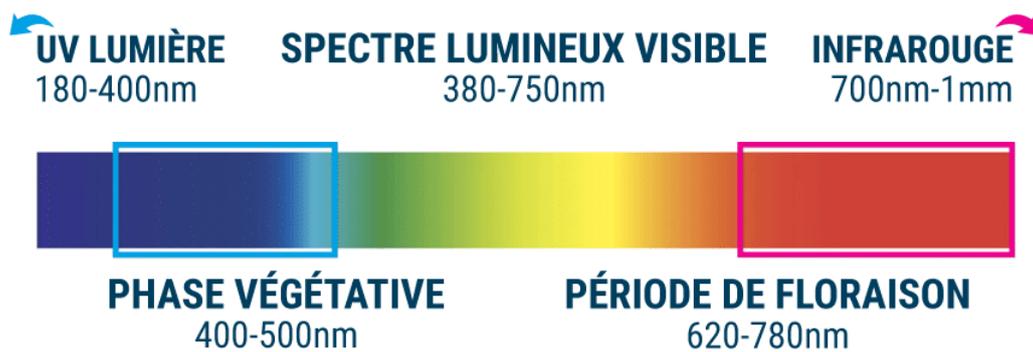


Figure I.6 Spectre de fréquences des ondes infrarouges

L'inconvénient de l'infrarouge est sa propagation : si en intérieur le rayon peut se réfléchir sur les murs, en extérieur il faut viser le récepteur pour ne pas avoir d'erreur de transmission de l'ordre. Bien que modulé entre 30 et 40 kHz, celui-ci est perturbé par les néons, les lampes à économie d'énergie ou les rayons du soleil, et ne fonctionne que sur quelques mètres. Aucun obstacle ne doit figurer alors sur le trajet [13].

I.3.5 WLAN (Wi-Fi)

Le Wi-Fi est une communication sans fil de faible puissance, utilisée par divers appareils électroniques tels que les téléphones intelligents, les ordinateurs portables, etc. Dans cette configuration, un routeur fonctionne comme un centre de communication sans fil. Ces réseaux permettent aux utilisateurs de se connecter uniquement à proximité d'un routeur. Le Wi-Fi est très courant dans les applications de réseau qui offre une portabilité sans fil. Ces réseaux doivent être protégés par des mots de passe à des fins de sécurité, sinon il y aura accès par d'autres [6].

La technologie de communication sans fil Wi-Fi fonctionnent 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.

En intérieur, la portée radio du Wi-Fi est capable de traverser des murs en béton armé ou des étages (trois maximum) mais, dans ces conditions, le débit est ralenti jusqu'à 1 Mbit/s avant la perte du signal, et la portée peut descendre à 15 mètres. La plupart du temps, en intérieur, on compte une portée de 25 mètres dans un environnement dense (de gros obstacles) et 50 mètres s'il n'y a que de petites cloisons à traverser.

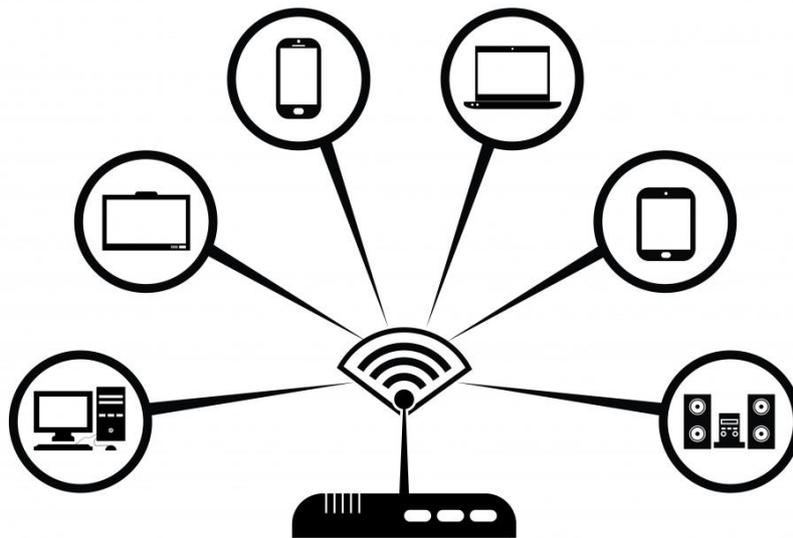


Figure I.7 Communication sans fil par Wi-Fi

La norme IEEE 802.11 a été publiée en 1997. Elle a évolué à plusieurs reprises afin de faire progresser son débit, renforcer sa sécurité et sa compatibilité. Les iBook d'Apple furent les premiers ordinateurs à intégrer un module Wi-Fi à partir de 1999. C'est à partir de cette date que le terme « Wi-Fi » a été popularisé par la société Interbrand à qui l'on doit également le logo noir et blanc qui évoque le symbole du Yin et du Yang.

Aujourd'hui, le Wi-Fi est omniprésent, tant dans les usages domestiques que professionnels ou dans les lieux publics. Il sert principalement à accéder à Internet, mais aussi aux communications téléphoniques dites voix IP (VoIP). Dans le cadre d'un usage privé, il est recommandé aux utilisateurs de sécuriser leur point d'accès Wi-Fi avec un mot de passe afin d'éviter tout usage frauduleux car, alors, leur responsabilité légale est engagée [14].

I.3.6 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. [6],[8].

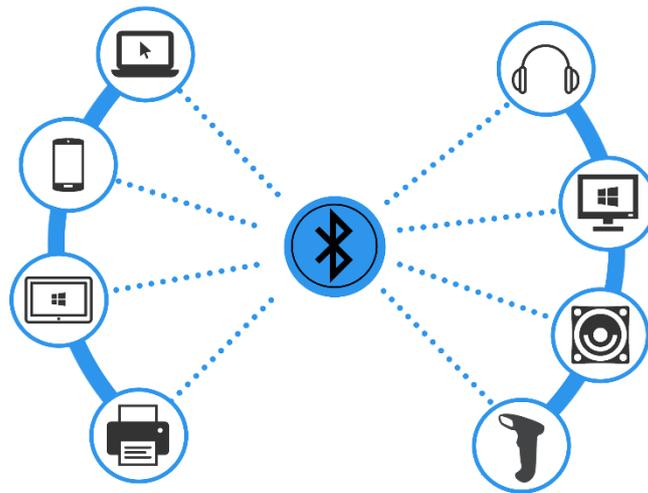


Figure I.8 Communication sans fil par Bluetooth

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 [15].

I.3.7 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) [16].

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 [17].

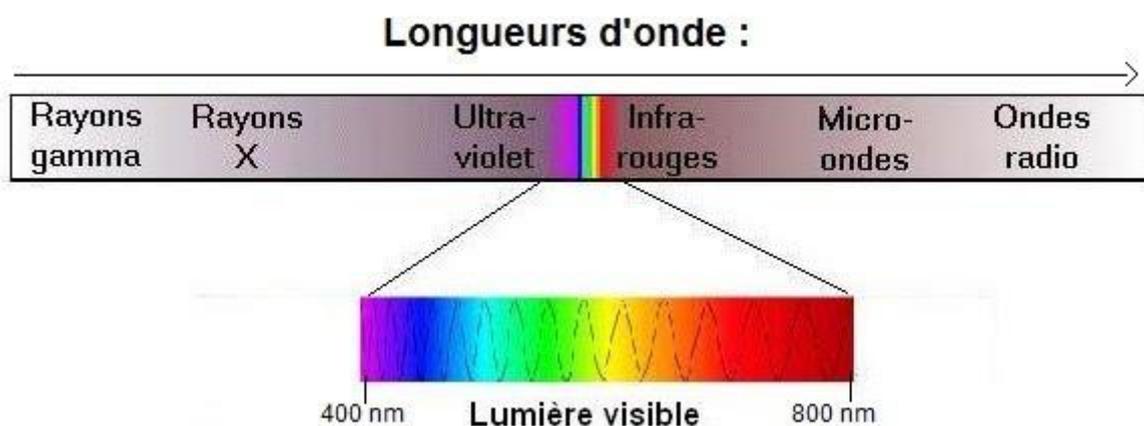


Figure I.9 Spectre de fréquences de la lumière visible

Cette méthode d'utilisation rapide d'impulsions de lumière pour transmettre des informations sans fil est techniquement appelée communication par lumière visible (VLC). Les progrès promettent une vitesse 100 fois plus rapide que le Wi-Fi. Le Li-Fi peut fonctionner même sous l'eau. Si cette technologie peut être mise en pratique, chaque ampoule peut être utilisée comme un point d'accès Wi-Fi pour transmettre des données sans fil et nous avancerons vers un avenir plus propre, plus vert, plus sûr et plus brillant [18].



Figure I.10 Communication par lumière visible (VLC)

I.4 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES SYSTEMES DE COMMUNICATION SANS FIL

I.4.1 Les avantages du déploiement d'un système de communication sans fil

I.4.1.1 Pour les utilisateurs :

- Premièrement, la portabilité : un ordinateur portable, un ordinateur de poche ou un téléphone portable suffit pour se connecter.
- Deuxièmement, le choix du lieu de communication, sous contrainte d'être toujours sous la couverture du système de communication sans fil.
- Troisièmement, la flexibilité : la communication est indépendante de la marque ou des caractéristiques techniques des appareils connectés. Seuls les systèmes de communication sans fil doivent garantir une compatibilité avec la norme à laquelle ils font référence.
- Quatrièmement, la facilité : pas de câble signifie moins d'encombrement. Les appareils sur le marché tendent à se connecter automatiquement.
- Cinquièmement, la mobilité : les utilisateurs peuvent se déplacer sans couper la communication sans fil.
- Sixièmement, le prix : ils tendent à baisser suivant l'évolution du marché. Il est difficile d'acheter un ordinateur portable sans système de communication sans fil intégré.

I.4.1.2 Pour les responsables du déploiement du système de communication 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 système de communication filaire, en termes d'espace de connexion (et pas en termes d'analyse du système).
- 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.

I.4.2 Les inconvénients d'un système de communication sans fils

- Le premier consiste à disposer d'un débit souvent plus faible qu'un système de communication câblé.
- Le deuxième consiste, selon les cas, en une atténuation rapide de la communication en fonction de la distance qui induit l'impossibilité pour un émetteur de détecter une collision au moment même. En effet, le medium utilisé est dit Half-duplex, ce qui correspond à un medium 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 natures diverses à savoir des émetteurs travaillant à des fréquences trop proches ; des bruits parasites dus à l'environnement ; des phénomènes d'atténuation, de réflexion et de chemins multiples dus 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 communications sans fil ont un caractère nomade portable. Emettre 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 [7].

I.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons défini et expliqué les différents types de communications sans fil. Nous avons également présenté les avantages et les inconvénients de la communication sans fil. Dans ce mémoire de Master, nous nous sommes intéressés à la communication sans fil par la lumière visible (VLC).

Chapitre II

La Technologie VLC et Domaines d'Application

II.1 INTRODUCTION

La communication par lumière visible (VLC) est une nouvelle technologie qui pourrait révolutionner l'avenir de la communication sans fil. Dans VLC, les informations sont transmises en modulant le spectre de la lumière visible (380–750 nm) qui est utilisé pour l'éclairage. Des travaux analytiques et expérimentaux ont montré le potentiel de VLC pour fournir une communication de données à haute vitesse avec l'avantage supplémentaire d'une efficacité énergétique améliorée et de la sécurité / confidentialité des communications. VLC est encore au début de la recherche. Dans ce chapitre, nous fournissons un aperçu de VLC ainsi que comment et où cela peut être appliqué dans notre monde aujourd'hui et à l'avenir.

II.2 DEFINITION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

II.2.1 Définition

La communication par lumière visible (VLC) est l'utilisation de la lumière visible comme méthode de transmission de données sans fil. La lumière utilisée dans VLC est comprise entre 380 et 750 nanomètres [19]. Il s'agit d'un protocole qui transforme le Wi-Fi en VLC via la lumière des LED (Diode Electroluminescente). Alors que le Wi-Fi utilise la partie radio du spectre électromagnétique, la VLC utilise le spectre optique et repose sur l'envoi de données par une modulation et selon un protocole bien défini et standardisé. Il s'agit d'un protocole qui transforme le Wi-Fi en VLC via la lumière des LED (Diode Electroluminescente). Alors que le Wi-Fi utilise la partie radio du spectre électromagnétique, la VLC utilise le spectre optique et repose sur l'envoi de données par une modulation et selon un protocole bien défini et standardisé [20].

II.2.2 Principe de fonctionnement

Parce que les LEDs sont des semi-conducteurs, elles ont la capacité des éteindre et de s'allumer avec des temps de l'ordre nanoseconde. En allumant et en éteignant plusieurs milliers de fois par seconde, on peut transmettre des informations en créant une fréquence. Si une LED est allumée, elle transmet un bit 1, si elle est éteinte, un bit 0 (voir Figure II.1). Les changements de fréquence sont si rapides qu'ils ne sont pas visible 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 II.1 Le principe de fonctionnement

II.3 ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMUNICATION VLC

Le principe général d'un système de communication VLC peut être résumé comme suit :

- L'émetteur : transforme un signal électrique en puissance optique rayonnée (Modulation) à travers d'une LED ou LD
- Le canal : l'environnement dans lequel l'onde se propage (LOS+NLOS).
- Le récepteur : détecte une puissance optique par unité de surface via une photodiode PD → signal électrique (Démodulation).

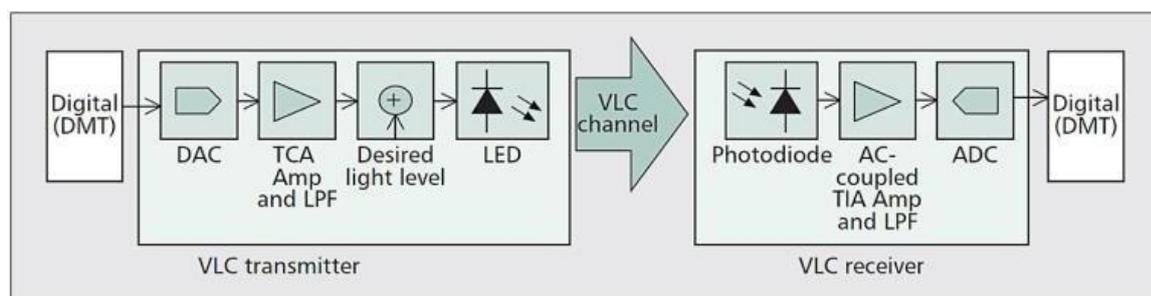


Figure II.2 Schéma fonctionnel d'un système VLC

II.3.1 L'émetteur VLC

Un émetteur VLC est un appareil qui transforme des données dans les messages qui peuvent être envoyés sur le moyen d'expression optique spatial libre en utilisant la lumière visible. Le but de l'émetteur VLC est d'émettre la lumière et transmettre des données en même temps.

Les paramètres de l'émetteur VLC sont principalement limités par les caractéristiques du LEDs [21].

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 [22].

En raison de leur puissance d'émission relativement faible, les LEDs sont généralement utilisées pour des applications courtes distances et des bandes passantes de l'ordre de 155Mbps [23].

II.3.2 Le récepteur VLC

Le récepteur VLC est utilisé pour extraire les données du faisceau lumineux modulé, il transforme la lumière en un signal électrique qui sera démodulé et décodé par le décodeur intégré [21].

Les performances du système VLC sont influencées par les performances du récepteur VLC, la lumière incidente n'est pas seulement due à l'émetteur mais à d'autres sources de lumière (naturelles ou artificielles), le récepteur est exposé aux interférences importantes.

Les performances du récepteur VLC peuvent être améliorées en utilisant un filtre optique qui enlève les composants du spectre non souhaitables [19].

II.3.3 Canal de transmission :

La plupart des systèmes optiques sans fil sont des systèmes à modulation d'intensité et à détection directe, Intensity Modulation/Direct Detection.

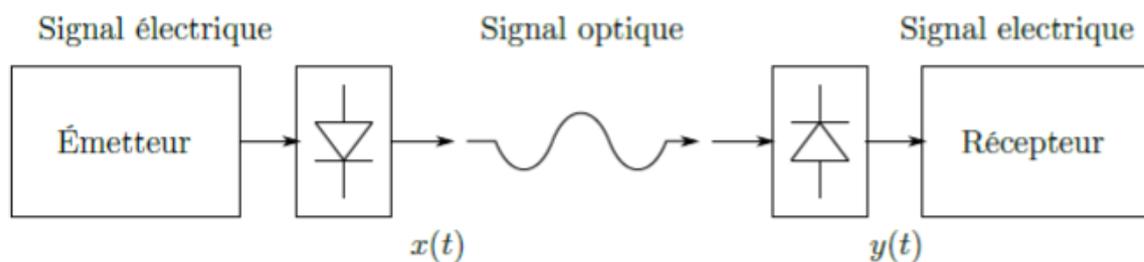


Figure II.3 Canal de transmission IM/DD

Dans un système IM/DD, l'information n'est pas portée par la fréquence ou la phase mais par l'intensité du signal optique. La conversion entre le signal électrique et l'intensité optique $x(t)$ est réalisée par une diode électroluminescente (LED). L'onde optique est alors propagée sur le canal optique sans fil. En réception, il est nécessaire de réaliser la conversion inverse permettant de revenir au domaine électrique. Cette fonction est assurée par la photodiode. La photodiode réalise une détection directe *i.e.* elle produit un photo-courant $y(t)$ proportionnel à

l'intensité optique reçue. L'objectif principal du récepteur est de déterminer l'information contenue dans $x(t)$ à partir du signal reçu $y(t)$ [24].

II.3.4 Classification des liens optiques

Il existe de nombreux critères permettant de classer les différents types de liens optiques. Tel que la présence d'un lien direct ou non entre l'émetteur et le récepteur (LOS ou non LOS). De plus, l'angle d'ouverture de l'émetteur et le champ de vision (Field Of View (FOV)) du récepteur.

II.3.4.1 Liens LOS

Les liens optiques LOS sont caractérisés par la présence d'un lien direct entre l'émetteur et le récepteur optique. La présence d'un lien direct permet d'augmenter la puissance optique reçue par la photodiode tout en diminuant l'impact de l'interférence entre symbole. Ainsi, les liaisons LOS permettent d'obtenir d'excellentes performances. En revanche, ces liens sont extrêmement sensibles aux phénomènes de blocage.

De plus, si la mobilité de l'émetteur doit être considérée, il est nécessaire de mettre en place un dispositif de suivi permettant de maintenir l'alignement entre l'émetteur et le récepteur. On distingue alors plusieurs types de suivi, en fonction de l'alignement de l'émetteur et/ou du récepteur. Les liens LOS Full Tracked (FT), cette liaison bénéficie d'une très faible atténuation permettant d'obtenir un rapport signal sur bruit (SNR) élevé. Pour les liens LOS Half Tracked (HT), seul l'émetteur maintient l'alignement vers le récepteur. La liaison LOS HT permet de relâcher les contraintes sur le récepteur en éliminant le système de suivi. Cette solution est particulièrement adaptée dans des cas multi-utilisateurs (avec plusieurs émetteurs). Enfin, les liens LOS Non Tracked (NT), les orientations de l'émetteur et du récepteur sont fixes et verticales quelle que soit la position de l'émetteur [24].

II.3.4.2 Liens diffus (NLOS)

Les liens optiques diffus établissent un lien entre l'émetteur et le récepteur par l'intermédiaire d'au moins une réflexion sur une paroi de l'environnement indoor et utilisent des angles d'ouvertures élevés pour l'émetteur et un large FOV pour le récepteur. Cette topologie est plus robuste face aux phénomènes de blocage que les liens LOS. Ces liens permettent d'obtenir un grand degré de mobilité au prix d'une atténuation plus importante (ce qui diminue la puissance optique reçue) [24].

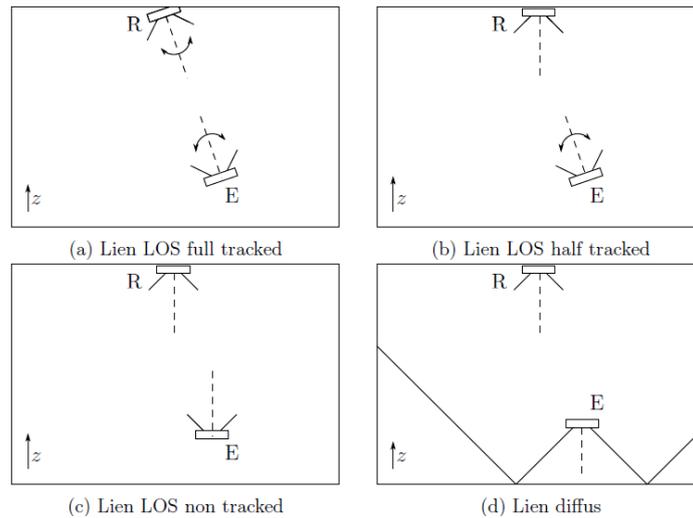


Figure II.4 types des liens optiques

II.3.5 Les modulations associées aux communications VLC

Il existe plusieurs techniques de modulations associées aux communications optiques sans fil.

II.3.5.1 La Modulation OOK

L'OOK est une technique de modulation simple dans laquelle le «1» numérique est représenté par la présence du signal, correspondant à l'état « ON », tandis que la donnée «0 » est représentée par un signal de valeur égale à zéro, ou l'état « OFF ». Le « ON » et le « OFF » représentent deux niveaux d'amplitude distincts, nécessaires à la communication, et n'impliquent pas nécessairement que la source de lumière soit complètement éteinte. Pour OOK, la norme IEEE 802.15.7 mentionne l'utilisation du code de Manchester pour s'assurer que la période des impulsions positives est identique à celle des impulsions négatives, mais cela double également la bande passante requise pour la transmission OOK [25].

Alternativement, pour des débits binaires plus élevés, on utilise un codage à longueur limitée (RLL, Run Length Limited) qui est plus efficace spectralement. La gradation est prise en charge en ajoutant une extension OOK qui ajuste la sortie agrégée au niveau correct [26].

II.3.5.2 La modulation VPPM

La modulation VPPM est une variante de la Pulse Position Modulation (PPM), développée spécifiquement pour les communications VLC. En modulation PPM, l'information est représentée par la position de l'impulsion dans le temps. La variante VPPM introduit en plus la variation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse Width Modulation), en fonction du niveau d'intensité lumineuse (voir Figure II.5). Il s'agit d'une modulation Manchester OOK à laquelle on applique un rapport cyclique variable. La modulation VPPM permet de s'affranchir des problèmes de scintillement car on supprime les longues suites de symboles « 0 » et la technique PWM permet de contrôler l'intensité lumineuse [21].

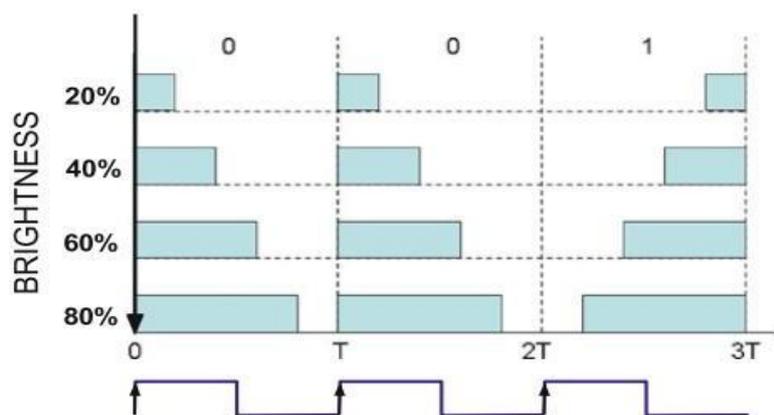


Figure II.5 Modulation VPPM

II.3.5.3 La modulation OFDM

Pour les applications hauts débits, on se retrouve rapidement confronté aux problèmes de limitation de la bande passante des sources ainsi que de génération de l'IES (Interférence Entre Symboles). Afin de répondre au mieux à ces problématiques, on peut utiliser une modulation de type OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing).

Le principe de cette modulation est de considérer que les données sont envoyées sur plusieurs canaux en parallèle en utilisant différentes sous porteuses. Ainsi, le temps de chaque symbole correspondant à chaque sous porteuse est bien plus grand que son équivalent pour une porteuse unique, réduisant ainsi grandement l'impact de l'IES tout en permettant d'optimiser la bande passante.

L'utilisation d'un intervalle de garde permet également d'éliminer l'interférence entre sous-porteuses. Le principal avantage est alors de pouvoir réaliser une égalisation très simple en

réception. De plus, il est possible de maximiser les performances en définissant différents débits et puissances transmises pour chaque sous porteuse.

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

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

Malgré les nombreux avantages, la mise en œuvre de cette modulation est complexe, augmentant ainsi le prix des systèmes utilisant cette méthode [21].

II.3.5.4 La modulation CSK (Color shift keying)

A l'instar de la modulation VPPM, la modulation «Color-Shift Keying» est spécifique aux VLC. Elle a été proposée dans la norme IEEE 802.15.7 pour améliorer le débit de données qui était faible dans d'autres types de modulation. La capacité de commutation ralentit en produisant une lumière blanche à l'aide de phosphore jaune et de LEDs bleues. Par conséquent, une autre façon de produire la lumière blanche consiste à utiliser trois LEDs distinctes, le vert, le bleu et le rouge. Elle est spécialement définie en utilisant l'intensité des trois couleurs d'une source LED RGB (Red Green Blue). La modulation CSK dépend du diagramme de chromaticité de l'espace colorimétrique. Contrairement aux autres modulations, les symboles sont ici sélectionnés de manière à ce que l'émission lumineuse reste constante alors que les différentes composantes chromatiques associées à chaque couleur varient. Cette modulation mappe toutes les couleurs perceptibles à l'œil sur deux paramètres de chromaticité tels que x et y .

(La figure II.6) illustre les sept bandes de longueur d'onde visibles par l'œil présentées dans le tableau II.1 avec leurs centres représentés sur le diagramme.

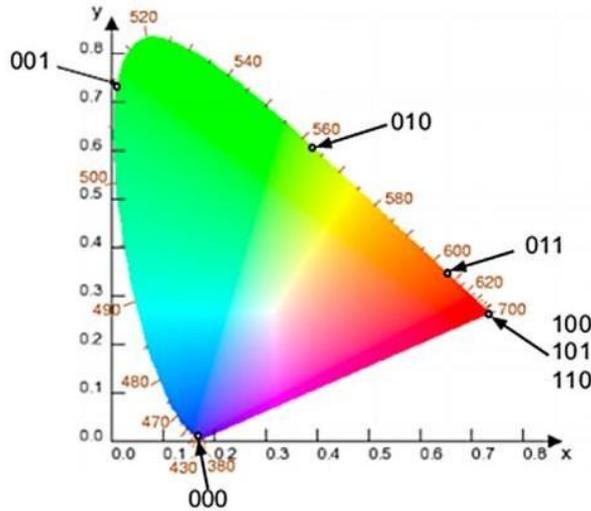


Figure II.6 Modulation CSK

Tableau II.1 Modulation CSK

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

Cette technique permet de s'affranchir complètement des problèmes de scintillement. De plus, comme le flux lumineux émis est constant, le courant de commande reste constant lui aussi, diminuant ainsi grandement les contraintes sur les sources. La limitation de cette modulation est liée à la complexité et à la nécessité en réception d'être capable de recevoir chaque couleur [21].

II.4 DOMAINE D'APPLICATION

II.4.1 INDOOR

II.4.1.1 Localisation indoor

En plus du Li-Fi, la VLC peut fournir très efficacement la localisation en intérieur. En déterminant le temps d'arrivée (TOA) ou la puissance du signal reçu (RSS), et en utilisant un des techniques de localisation (triangulation, trilateration, proximité et fingerprinting), la VLC est capable de fournir une localisation avec une précision centimétrique. Le GPS classique ne peut pas fonctionner à l'intérieur des bâtiments. VLC est très pratique dans ces applications.

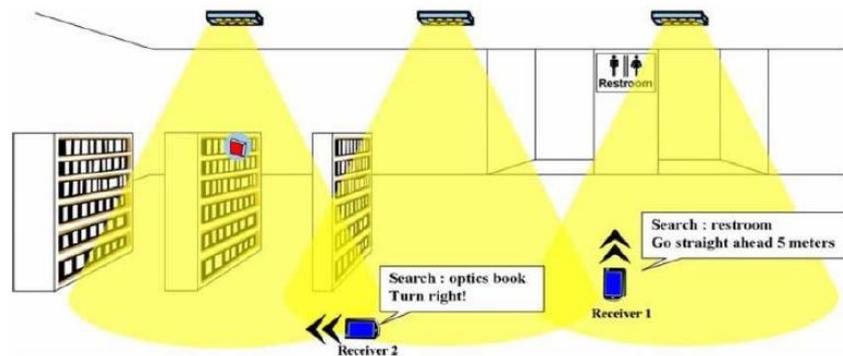


Figure II.7 Utilisation de la VLC pour localisation indoor

II.4.1.2 Transmission de données LI-FI

Le Li-Fi est un système de communication sans fil avec la lumière visible bidirectionnel à haute vitesse entièrement connecté. Il est analogue au Wi-Fi qui utilise la fréquence radio pour la communication. Un Li-Fi prête aussi soutien à l'Internet des objets (IoT). Une vitesse allant jusqu'à 10Gbits/s peut être obtenue en utilisant le Li-Fi, qui est 250 fois plus grande que la vitesse du très haut débit.



Figure II.8 Exemple d'un système Li-Fi

II.4.1.3 Aviation

Les passagers ne peuvent pas utiliser les ondes radio. Les éclairages à base de LED sont déjà utilisés dans les cabines d'aéronefs et chacun de ces éclairages pourrait être un potentiel émetteur VLC pour fournir à la fois des services d'éclairage et des services multimédias aux passagers. De plus, cela réduira les coûts de construction de l'avion et son poids.

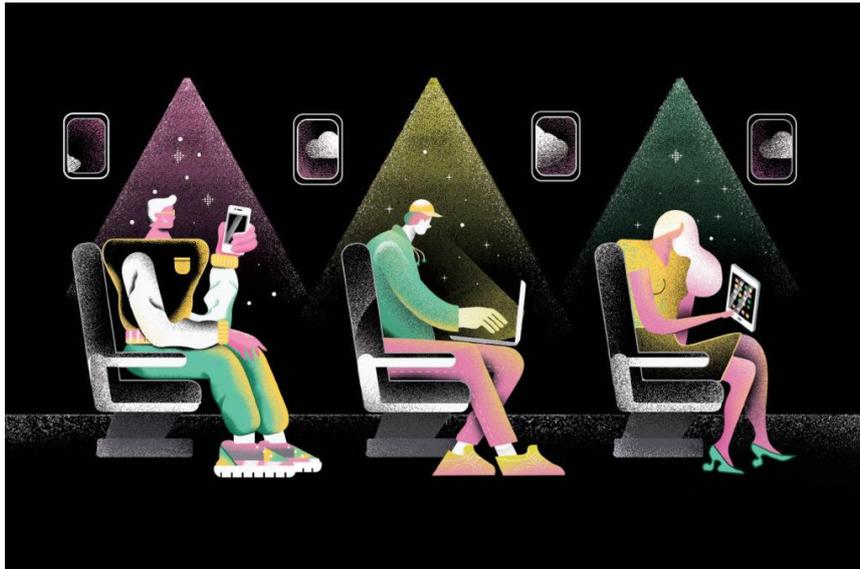


Figure II.9 Utilisation de la VLC dans l'avion

II.4.1.4 Hôpitaux et soins de santé

Dans les hôpitaux, certains équipements sont susceptibles d'interférer avec les ondes radio. L'utilisation du VLC présente de nombreux avantages dans ce domaine.



Figure II.10 Illustration des systèmes VLC appliqués au domaine médical

II.4.1.5 Environnements dangereux

Dans des environnements tels que les usines pétrochimiques, les mines...etc., les radiofréquences sont potentiellement dangereuses car il existe des risques d'explosion, ce qui rend la communication difficile. VLC peut être utilisée dans ce domaine, car il s'agit d'une technologie sûre qui fournit à la fois un éclairage et la communication.

II.4.2 OUTDOOR

Concernant les applications extérieures, il existe un domaine où la technologie VLC propose une solution performante là où la technologie RF n'en apporte pas.

II.4.2.1 Communications sous-marines

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

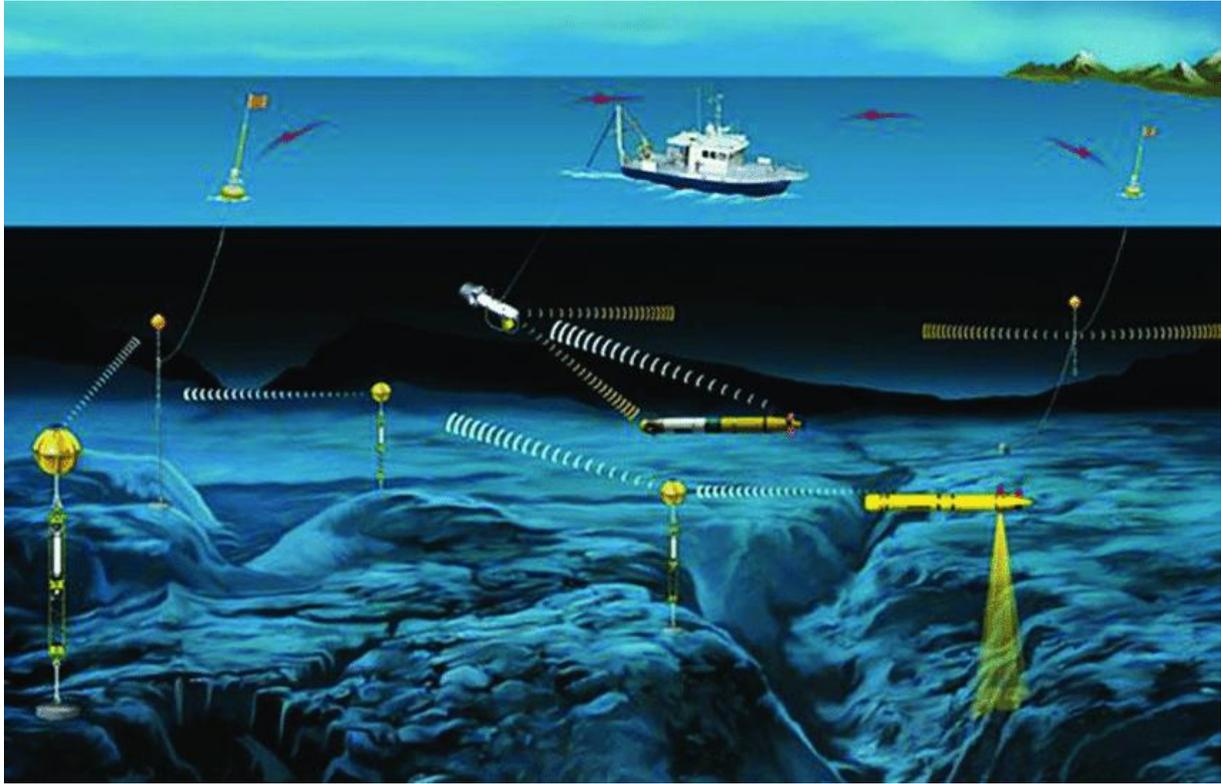


Figure II.11 Utilisation de VLC dans la communication sous-marine

II.4.2.2 Véhicule et transport

VLC pourrait être très utile dans Les systèmes de transport intelligent (STI). Pour permettre la communication véhicule/ véhicule (V2V) et /ou infrastructure / véhicule (I2V) l'information peut être transmise à la voiture avant avec le phare et la voiture derrière avec les feux rouges. Les données se propagent ainsi sur l'autoroute

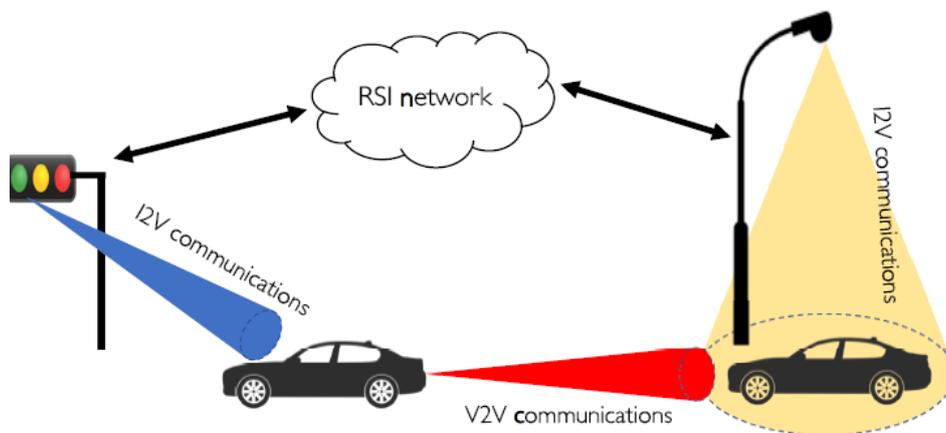


Figure II.12 Communication V2V ET I2V

II.5 LES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRANSMISSION (SISO, SIMO, MISO ET MIMO)

L'objectif principal des systèmes de communication est de transmettre le plus haut débit possible avec la plus grande fiabilité. Ainsi le débit de transmission est-il associé à la capacité du canal, qui est représentée par un nombre de données maximum transmises à chaque instant. La fiabilité de la transmission, quant à elle, est associée à la probabilité d'erreur qui est inversement liée au rapport signal sur bruit. Pour améliorer le débit et la fiabilité, une simple solution consiste à augmenter la puissance de transmission mais dans un contexte multi-utilisateur, la puissance des interférences va parallèlement accroître. La deuxième solution consiste à changer effectivement le type de modulation des données mais il est nécessaire d'augmenter le spectre d'émission. La plus récente technique est d'utiliser les techniques multi-antennes en émission et réception qui permet d'améliorer la fiabilité et le débit de transmission en gardant le même spectre et la même puissance de transmission.

Ces systèmes sont bien répandus sous le nom de « systèmes MIMO » (“Multiple-input multiple output”). [27]

Parmi les systèmes utilisés pour la transmission sans fil on trouve :

II.5.1 Système SISO

C'est l'architecture la plus simple qui utilise une seule antenne en émission et une autre en réception.

La capacité du canal SISO est : $C = w \cdot \log_2 \left(1 + \frac{p}{N_0 W} \right)$ (1)

Où : P : la puissance du signal utile en Watt, N_0 : la densité spectrale de puissance du bruit calculé en W/Hz, W : la bande passante donnée en Hz, avec ρ est le rapport signal sur bruit.

En normalisant la capacité par la bande utile W , on obtient :

$$C = \log_2(1 + \rho)(2)$$

II.5.2 Système MISO

C'est une technique de diversité spatiale en émission. C'est-à-dire Plusieurs antennes émettent des signaux qui sont interceptés par une seule antenne en réception.

Dans ce mode de transmission, une superposition du signal transmis simultanément par les N_t antennes émettrices est reçue. Chaque antenne émet le même symbole d'énergie ES/N_t . C'est-à-dire que la puissance émise est divisée sur le nombre d'antenne telle que :

$$P = \sum_{i=1}^{N_t} P_i \quad (3)$$

Avec P_i est la puissance émise sur chaque antenne. Si cette puissance est égale sur toutes les antennes, alors on dira que $P = N_t \cdot P_i$ (4).

La capacité du canal MISO :

$$C = w \cdot \log_2 \left(1 + N_t \frac{P_i}{N_0 W} \right) = w \cdot \log_2 \left(1 + \frac{p}{N_0 W} \right) \quad (5)$$

En normalisant la capacité par la bande utile W , on obtient :

$$C = \log_2 (1 + \rho) \quad (6)$$

L'équation (1) et (5) sont identiques, mais l'avantage de la technique MISO par rapport à la technique SISO est dans le fait que dans les multi trajets ; la probabilité d'évanouissement dans N_t antennes est inférieure à la probabilité d'évanouissement sur une seule antenne.

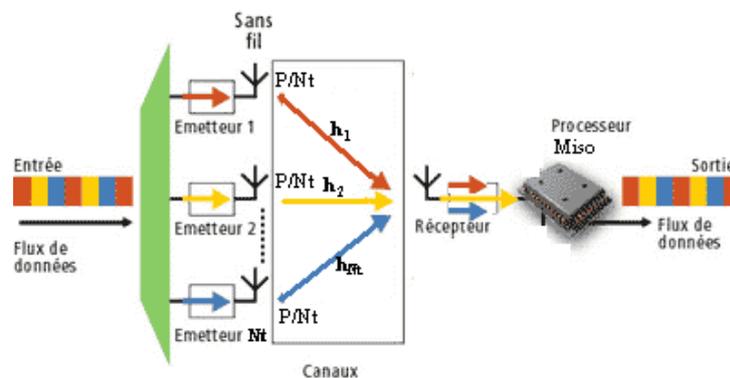


Figure II.13 Dispositif MISO

II.5.3 Système SIMO

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal. Le signal reçu est additionné et le rapport signal sur bruit total est la somme des rapports signaux sur bruits de chacun des antennes de la réception. Ce principe est représenté (la Figure II-14). La capacité du canal SIMO :

$$C = w \cdot \log_2 \left(1 + N_r^2 \frac{p}{N_0 W} \right) \quad (7)$$

N_r : le nombre d'antenne réceptrice.

$$C = w \cdot \log_2 (1 + N_r^2 \rho) \quad (8)$$

Avec ρ est le rapport signal sur bruit.

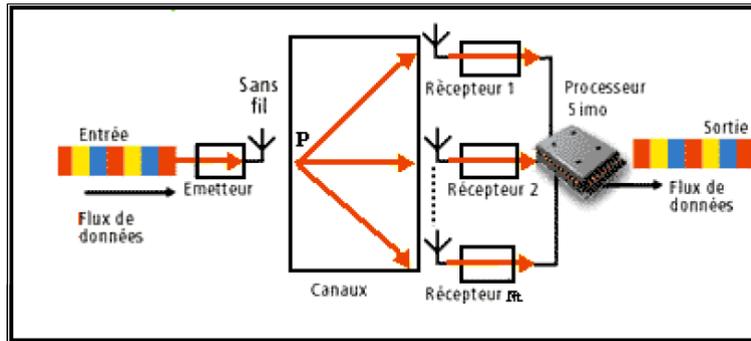


Figure II.14 Dispositif SIMO

II.5.4 Système MIMO

La technologie MIMO permet d'augmenter le débit linéairement avec le nombre d'antenne à la réception et de contrer l'évanouissement du canal. Ainsi, elle permet de minimiser la probabilité d'évanouissement et d'atténuation du signal. La différence entre un système MISO et un système MIMO est que ; le MISO envoie les mêmes paquets aux antennes qui émettent à la même fréquence. Tandis que, le MIMO envoie des paquets différents aux antennes qui émettent à la même fréquence. [27]

Foshini et Telatar ont démontré que la capacité théorique du canal MIMO avec N_t antennes à l'émission et N_r antennes à la réception croît linéairement avec $\min(N_t, N_r)$. [28]

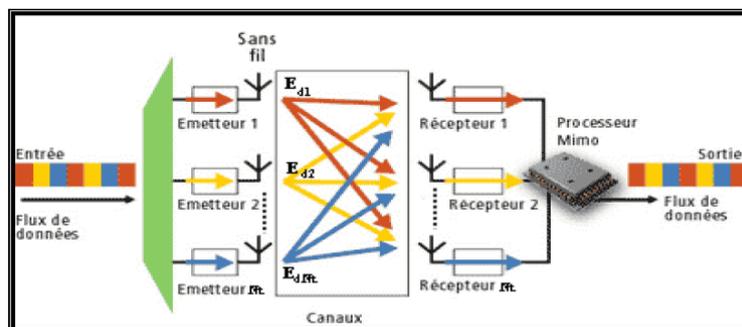


Figure II.15 Dispositif MIMO

Les avantages de système de communication MIMO par rapport aux autres systèmes (SISO, SIMO et MISO) parmi lesquels on retrouve :

- 1- Le gain de beamforming (“Formation de voie” en français).
- 2- Le gain de diversité spatiale.
- 3- Le gain de multiplexage spatial.

Les deux premiers existent également dans les systèmes SIMO et MISO. Toutefois, le système MIMO est le seul disposant du gain de multiplexage [27].

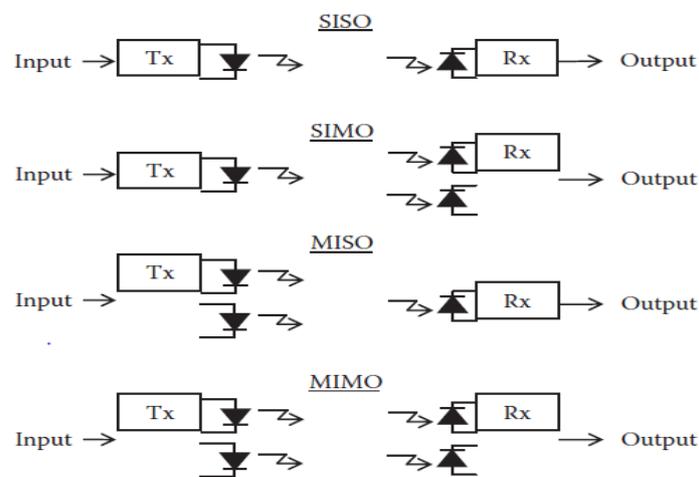


Figure II.16 Les différents systèmes

II.6 AVANTAGES ET POINTS FAIBLES

II.6.1 Avantages

Comparées aux technologies RF, les communications par optique sans fil présentent de nombreuses caractéristiques très avantageuses.

Le premier argument avancé est la bande passante disponible pour cette technologie. Contrairement aux RF, elle s’étend sur plusieurs GHz et peut être utilisée sans restriction. Cet avantage permet de répondre au problème croissant de la congestion du spectre RF, limitant de plus en plus le déploiement de nouveaux appareils et réseaux de communications.

Deuxièmement, du fait des valeurs des longueurs d'onde ($\approx \text{nm}$) par rapport aux dimensions des récepteurs ($\approx \text{cm}$) cette technologie n'est pas, contrairement aux RF, sujette aux évanouissements multi-trajets.

Autre avantage : l'absence de génération de perturbations électromagnétiques. L'utilisation d'ondes lumineuses permet en effet de s'affranchir des problèmes de perturbation qui se posent dans le domaine RF, spécifiquement dans des environnements comme les avions, les trains ou encore les milieux hospitaliers.

On peut ensuite noter le fait que les rayons lumineux traversent mal la matière. Ils sont donc généralement confinés dans leur environnement. C'est un avantage qui permet d'améliorer la sécurité de l'information (interception des données impossible de l'extérieur), mais qui limite de manière évidente la couverture et rend aussi cette technologie très sensible aux phénomènes déblocages.

Enfin, cette technologie permet de combiner les fonctions d'éclairage et de communication et donc s'appuie sur des émetteurs disséminés un peu partout dans l'environnement. Chaque lampe est en effet susceptible de transmettre à condition que l'ampoule soit à LED. Ainsi, les besoins en termes d'installation et de maintenances ont réduits.

II.6.2 Points faibles

Toute technologie présente des inconvénients, et les communications par optique sans fil n'échappent pas à cette règle.

Tout d'abord, comme précisé précédemment, le fait que la lumière ne puisse pas traverser la matière opaque pose de graves problèmes de blocages. En effet, si le récepteur est bloqué par n'importe quel objet, aucun signal lumineux ne peut parvenir jusqu'à lui, rompant ainsi son lien avec le signal émis.

D'autre part, l'impact de la puissance optique émise ne peut être négligé. Dans le domaine de l'infrarouge ou de l'ultraviolet, cela se manifeste par une limitation en puissance liée au danger de ce type de rayonnement sur la rétine ou sur la peau. Dans le domaine du visible, cette limitation est liée à la notion d'éblouissement car le signal émis dépend de l'éclairement fourni par la source. On note également que si on éteint totalement la source lumineuse, on ne peut émettre aucun signal.

De plus, il existe certains cas pour les quels la lumière visible peut aussi avoir un impact physiologique. En effet, il est possible de voir apparaître des effets de scintillements lors de l'envoi d'informations. Cet effet peut être dû, par exemple, à une longue suite d'états où la lumière est éteinte, créant ainsi une trop grande discontinuité du signal optique. Ceci a pour effet de rendre perceptible le changement d'état de la source, conduisant à un inconfort visuel et même parfois à des nausées. Il existe néanmoins de nombreuses méthodes au niveau de la modulation du signal permettant de résoudre ce problème.

Enfin, on peut noter que cette technologie peut être parasitée par de nombreuses sources de bruits optiques ambiants comme le soleil, les lampes à incandescences ou n'importe quelle autre source lumineuse.

II.7 CONCLUSION

Ce chapitre couvre les principes de base de la communication avec la lumière visible et l'architecture d'un tel système. Les avantages de cette technologie ont également été identifiés. Toutes ses propriétés bénéfiques conduisent au fait que la technologie de communication à lumière visible complète, même dans certains cas, une alternative prometteuse aux systèmes de communication sans fil traditionnels RF.

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.

Chapitre III : Applications

*Réalisation et études des performances d'un système
de communication par la lumière visible*

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons réaliser et étudier les performances d'un système de communication sans fils à base de la communication par la lumière visible. Tout d'abord, nous allons présenter le matériel, l'équipements et les langages de programmation. Ensuite, nous décrivons le système Li-Fi réalisé ainsi que le programme utilisé. En fin, nous présentons les résultats de l'étude du système et ses performances.

III.2 MATERIEL, EQUIPEMENT ET LANGAGE DE PROGRAMMATION

Dans cette partie nous présentons le matériel, les équipements et les langages de programmations utilisées.

III.2.1 Microcontrôleur (Carte Arduino)

Le modèle UNO de la société ARDUINO est une carte électronique dont le cœur est un microcontrôleur ATMEL de référence ATmega328. L'ATmega328 est un microcontrôleur 8bits de la famille AVR dont la programmation peut être réalisée en langage C/C++...

Nous avons utilisé la carte Microcontrôleur Arduino UNO (Figure III.1) comme module d'émission et de réception dans notre système [29].



Figure III.1 Photo de la Carte Arduino UNO utilisée.

III.2.2 LED ou Diode Laser (LD)

Une diode électroluminescente (LED) est une source de lumière semi-conductrice à deux conducteurs. Il s'agit d'une diode à jonction PN, qui émet de la lumière lorsqu'elle est activée.

On a utilisé le modèle de diode laser suivant : TÊTE DE MODULE DE DIODE LASER 650NM 5MW 5V (Figure III.2).

Ses caractéristiques sont :

- Puissance de sortie : 2–5 mW
- Longueur d'onde : 650 nm
- Tension de fonctionnement : 5 V, forme laser : DOT
- Température de fonctionnement : -10 °C ~ + 40 °C objectif et logement : plastique
Dimensions : 6 x 10 mm [30].

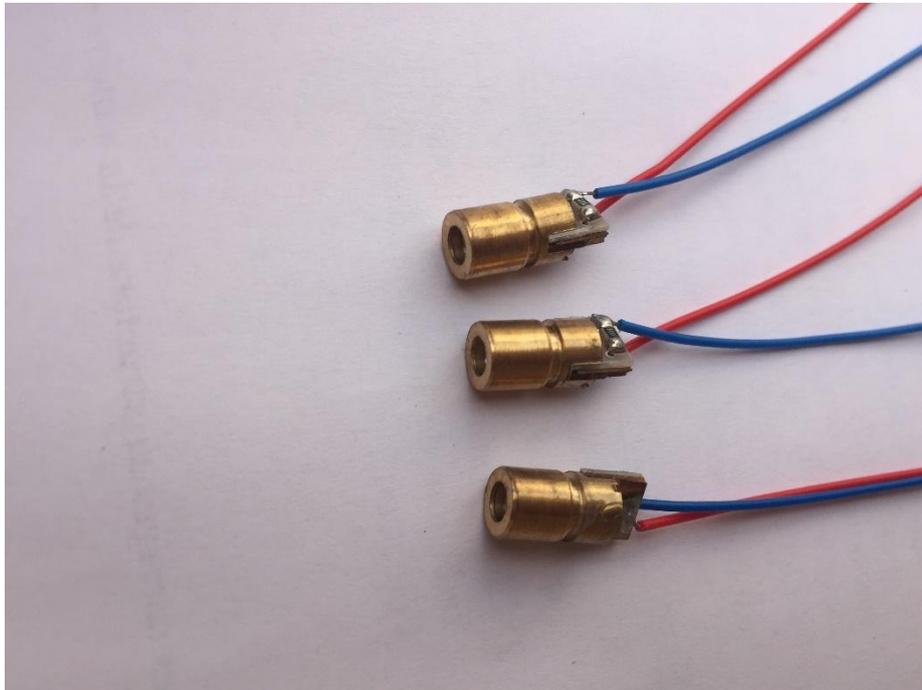


Figure III.2 Photo des Diodes laser utilisés.

III.2.3 Photodiode (PD)

La BPW34 (Figure III.3) est une photodiode PIN silicium à haute vitesse et haute sensibilité de rayonnement dans un boîtier plastique transparent, plat et miniature. Elle est sensible aux rayonnements visibles et quasi-infrarouges. Ses caractéristiques sont :

- Large angle de détection 2x 65°
- Temps de réponse rapide (20 ns)

- Forte sensibilité
- Zone sensible de 3x3 mm
- Capteur de 4.5 mm
- Pour applications de 400 - 1100 nm [31].



Figure III.3 Photo de des Photodiodes BPW34 utilisées.

III.2.4 Circuit amplificateur

Le rôle du circuit amplificateur est l'amplification d'onde électrique généré par le Photodiode. Le circuit se compose de deux amplificateurs opérationnels de type LM741 (amplificateurs de tension non-inverseur), chaque AOP amplifie le signal reçu par l'un des deux photodiodes, le gain de l'amplification peut être modifié en changeant la valeur des résistances.

III.2.5 Installation d'équipements

L'ensemble du système que nous avons réalisé (Figure III.4) est composé d'un module émetteur, un module récepteur et deux interfaces utilisateurs (deux microordinateurs). Le module émetteur est constitué de deux diodes Laser connectés à une carte Arduino par contre le module récepteur est composé de deux photodiodes branchées à une autre carte Arduino.

Le module émetteur est présenté dans la Figure III.5 et le module récepteur est présenté dans la Figure III.6. Les deux modules sont connectés aux interfaces utilisateurs via décâbles USB.

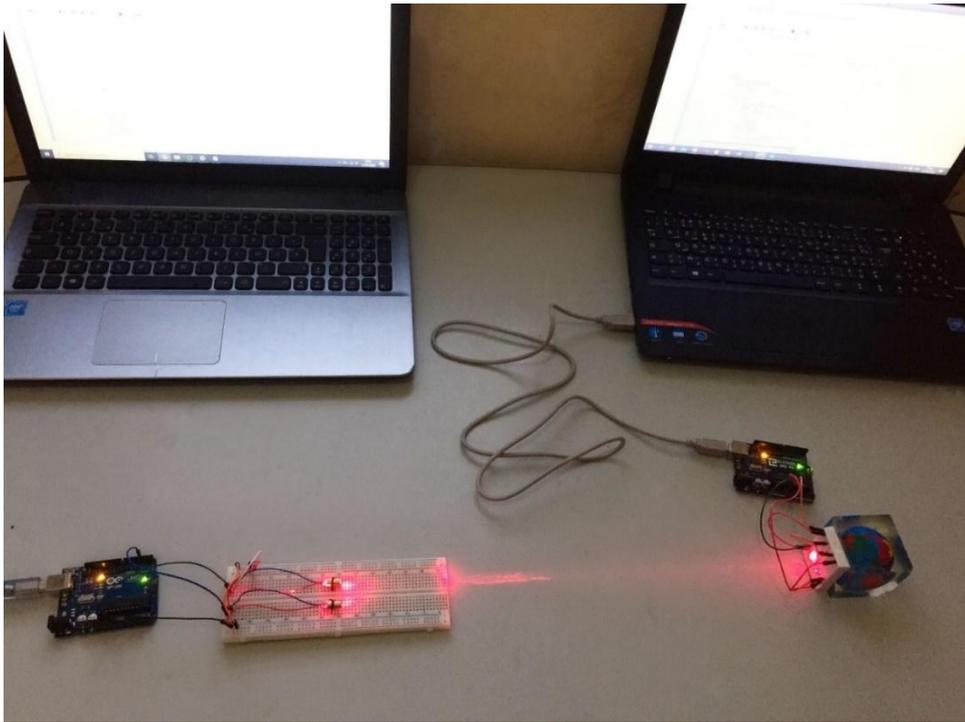


Figure III.4 Photo du système de communication Li-Fi réalisé

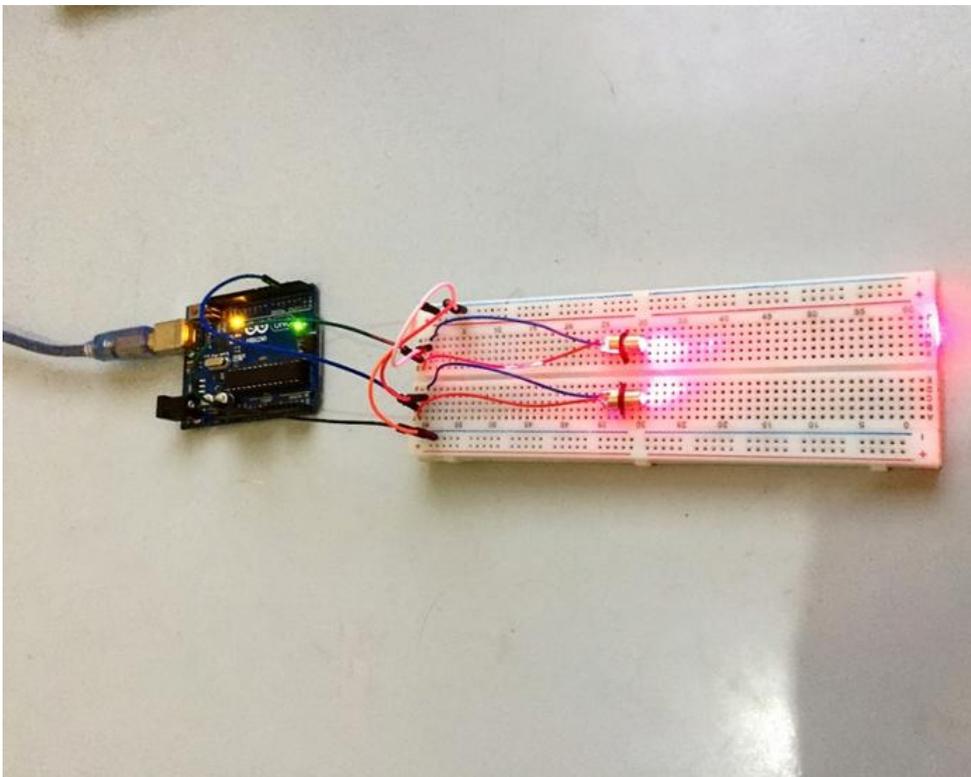


Figure III.5 Photo du module émetteur

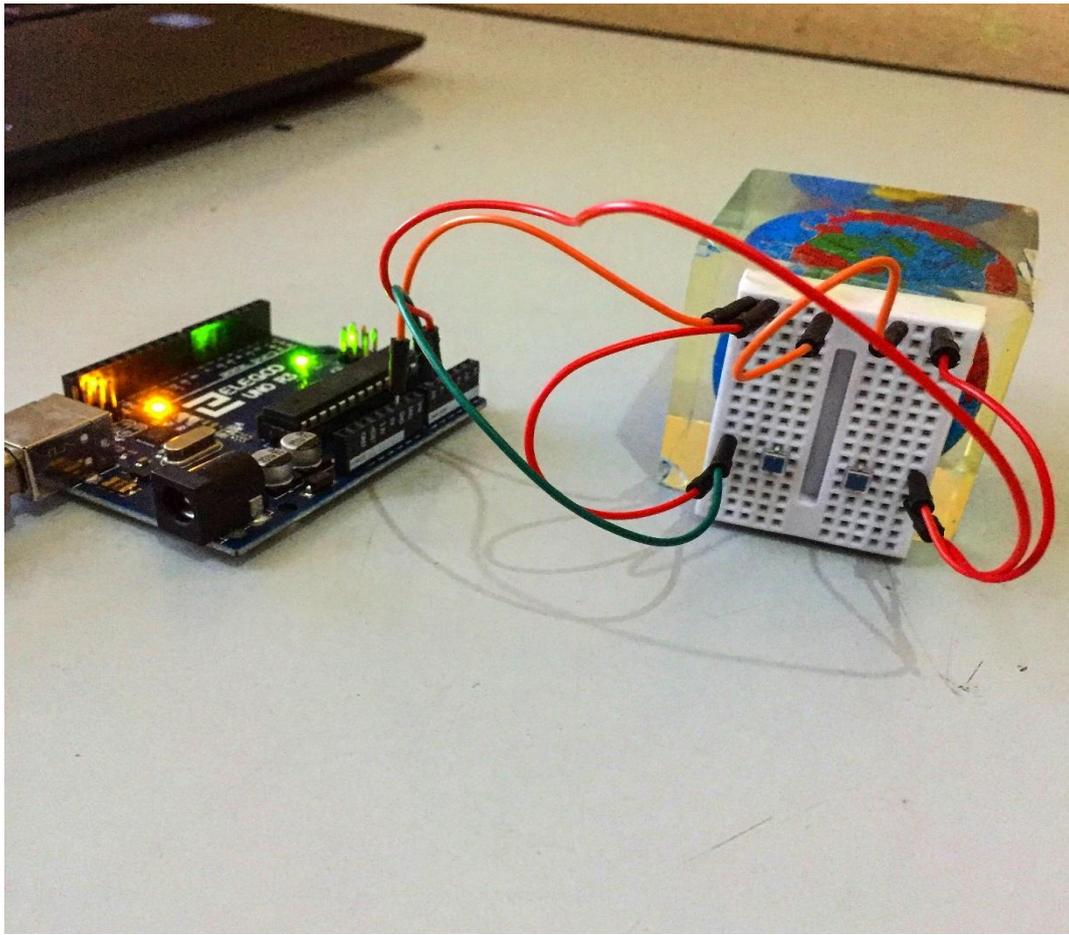


Figure III.6 Photo du module récepteur

III.2.6 Langage Python

Python est parmi les langages de programmation les plus utilisés. De son côté, Python compile de nombreux avantages : il est rapide, léger, facile à installer, et compatible avec la plupart des systèmes d'exploitation. Python est un langage qui peut s'utiliser dans de nombreux contextes et s'adapter à tout type d'utilisation grâce à des bibliothèques spécialisées. Il permet de réaliser facilement une communication série via USB entre un PC et une carte Arduino. Dans ce projet, l'interface utilisateur est basée sur le langage de programmation Python.

III.2.7 Langage Arduino (Arduino, C, C++ ...)

La carte Arduino est un microcontrôleur, c'est à dire une sorte de mini-ordinateur qui sert d'interface entre l'environnement (actions, mesures de grandeurs...) et un utilisateur. Elle se programme nativement dans un langage dérivé du C : le langage « Arduino ». Le langage Arduino est très proche du C et du C++. Ici, on se sert du langage Arduino pour programmer

l'émetteur et le récepteurs, ces deux dispositifs sont des cartes microcontrôleurs de type Arduino.

III.3 LA COMMUNICATION SERIE ARDUINO/PYTHON

Parfois, il est nécessaire d'envoyer des données dans les deux sens entre un ordinateur et un Arduino, Les communications série offrent une façon simple et souple de faire communiquer l'Arduino avec un ordinateur ou d'autres périphériques. En connectant le port série de l'Arduino avec l'ordinateur. On peut envoyer et recevoir des données grâce à cette fonctionnalité [32].

III.3.1 Lecture des données à partir d'Arduino

La carte Arduino permet de faire l'acquisition d'un signal analogique par l'intermédiaire d'un capteur et de le convertir en signal numérique grâce à son CAN (10 bits). Il est ensuite possible de transférer ces données par le port série vers l'ordinateur pour réaliser un traitement numérique avec Python.

Donc très schématiquement on se sert de l'interface de programmation d'Arduino pour écrire un petit programme qui explique à la carte comment faire l'acquisition (programme qui est ensuite téléverser sur la carte par le port série) puis on récupère les données via le port série pour en faire une analyse avec Python.

III.3.2 Envoie des données à l'Arduino

Au niveau de l'interface utilisateur et à l'aide de Python, on fait des analyses sur des données tels que le codage d'un fichier image. Ces données sont ensuite envoyées par le port série de l'ordinateur à l'Arduino. On se sert de l'interface de programmation d'Arduino pour écrire un petit programme qui explique à la carte comment manipuler les sorties suivant ses données.

III.3.3 Le module Serial

L'utilisation du port série sous Python est relativement aisée grâce à un module dédié : le module Serial. Ce module n'est pas un module natif « built-in » du langage Python et il nécessite d'être installé au préalable avec l'installateur Python (*pipinstallpyserial*). Une fois installé, le module s'importe sous la forme : *import serial* [33].

III.3.4 Initialisation du port série

Python permet de réaliser facilement une liaison via USB entre un PC et une carte Arduino.

L'initialisation du port série se fait assez simplement une fois la carte Arduino est programmée et branchée sur le port série.

III.4 CONCEPTION DU SYSTEME ET PROTOCOLE DE TRANSMISSION

III.4.1 Conception du système

III.4.1.1 Conception de l'émetteur

Le coté émetteur du système Li-Fi se compose de deux LED, une pour l'émission des données binaires et l'autre pour assurer la synchronisation entre émetteur et récepteur. Le circuit émetteur est illustré dans la Figure III.7.

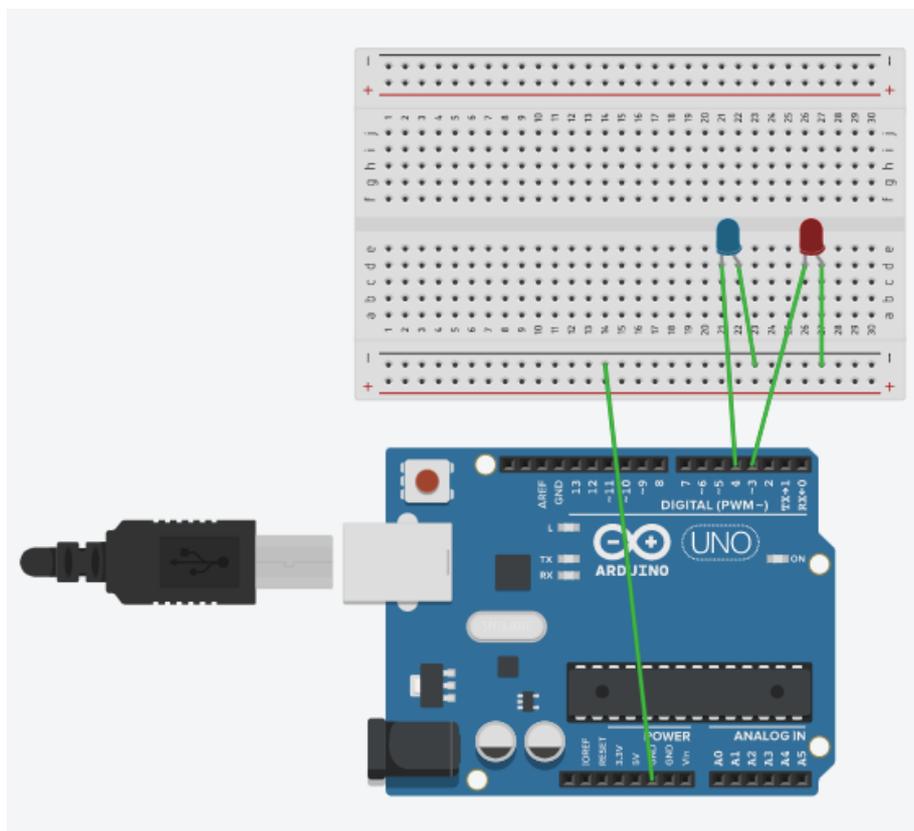


Figure III.7 Module émetteur avec circuit.

III.4.1.2 Conception du récepteur

Le coté récepteur de ce système est composé d'un circuit amplificateur et de deux Photodiodes. La première photodiode sert à recevoir les données binaires. En outre, la deuxième est spécialement pour la synchronisation. Le rôle du circuit amplificateur est l'amplification d'onde électrique générée par le Photodiode.

Le circuit récepteur est illustré dans la Figure III.8.

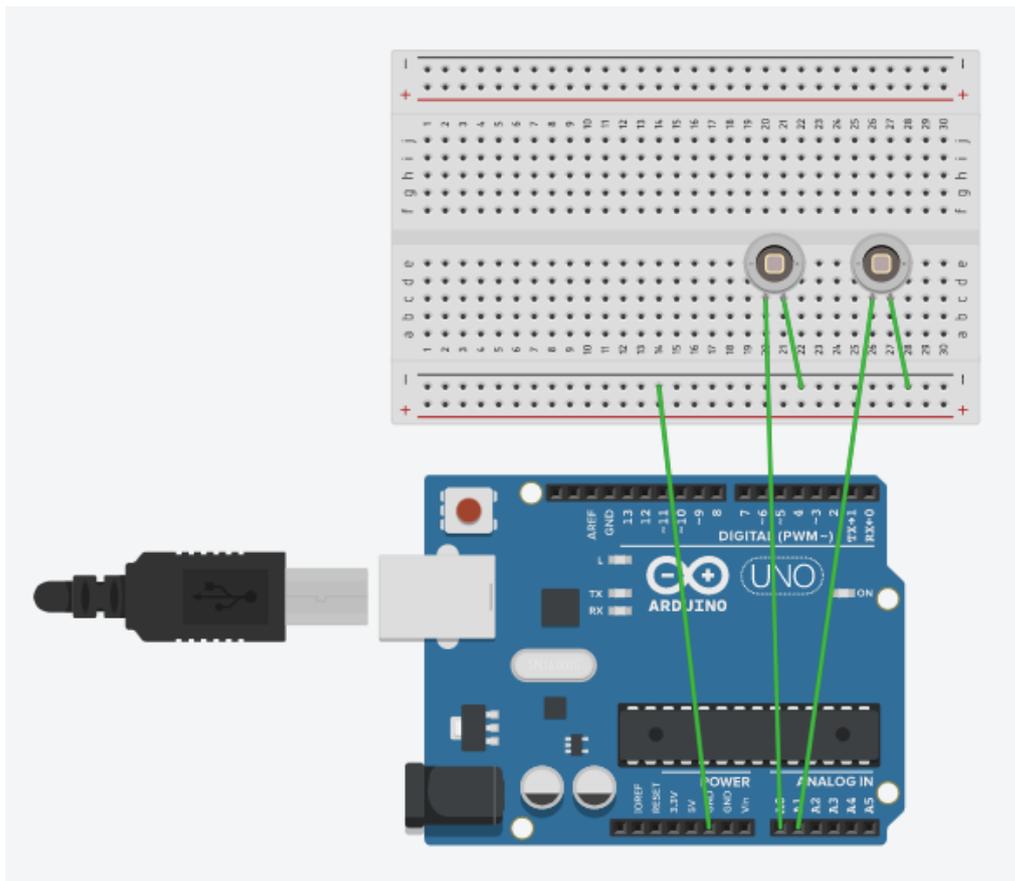


Figure III.8 Module récepteur avec circuit

Le circuit récepteur avec amplification est illustré dans la Figure III.9.

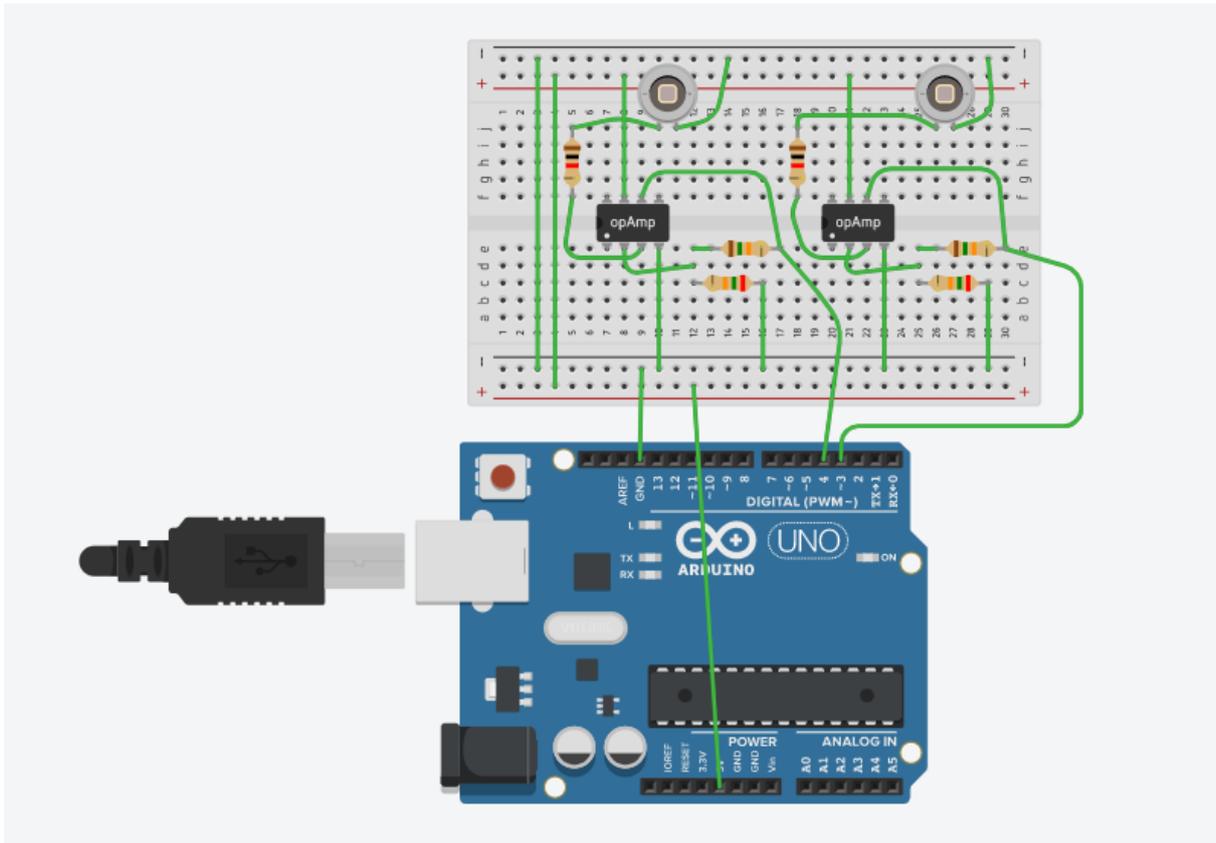


Figure III.9 Module récepteur avec circuit amplificateur

III.4.2 Transmission des données et synchronisation

III.4.2.1 Emission des données

L'Arduino transmet les données binaires en manipulant la LED (LED allumée signifie '1' et LED éteinte signifie '0'), Cette méthode d'encodage conçue sur mesure est le protocole utilisé pour émettre un bit dans un seul canal.

La Solution Naïve la plus simple à réaliser et sans penser à la correction des erreurs et autres interférences est : Allumer la LED pendant t secondes signifie '1' et éteindre la LED pendant t secondes signifie 0.

Exemple : Si les données binaires brutes sont 100110111100, le diagramme d'allumage et d'extinction de LED est illustré dans la Figure III.10.

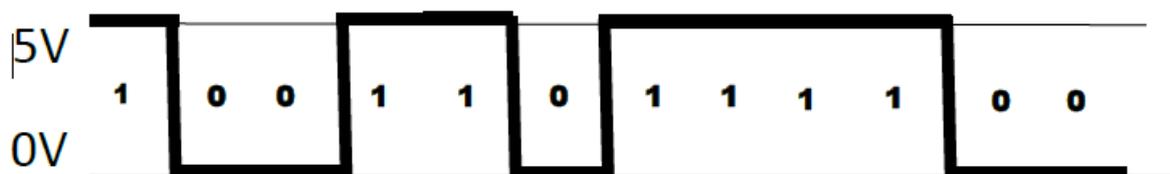


Figure III.10 Diagramme d'allumage et d'extinction de LED.

III.4.2.2 Réception des données

Lors de la configuration du récepteur dans un nouvel environnement, on doit recalibrer le seuil, qui est la moyenne de la différence de potentiel de pic reçue de la lumière ambiante.

Lors de la détection de la différence de potentiel, l'Arduino compare cette valeur avec la valeur seuil. Si la valeur reçue est supérieure à la valeur seuil, elle est considérée comme un pic élevé, et vice versa.

L'Arduino convertit les données analogiques en données numériques avec cette méthode.

III.4.2.3 Synchronisation

Le récepteur et l'émetteur doivent être synchronisés pour chaque transmission. Sinon, le bit peut être décalé et les données reçues peuvent ne pas être précises. Un protocole est nécessaire pour contrôler le début et la fin de la transmission des données, ce protocole utilise une deuxième LED pour signaler le début et la fin de la transmission des données.

III.4.3 Protocole de Transmission :

Le Schéma de protocole de transmission des textes et des images est présenté dans la Figure III.11. Nous expliquons ci-dessous les étapes de chaque protocole :

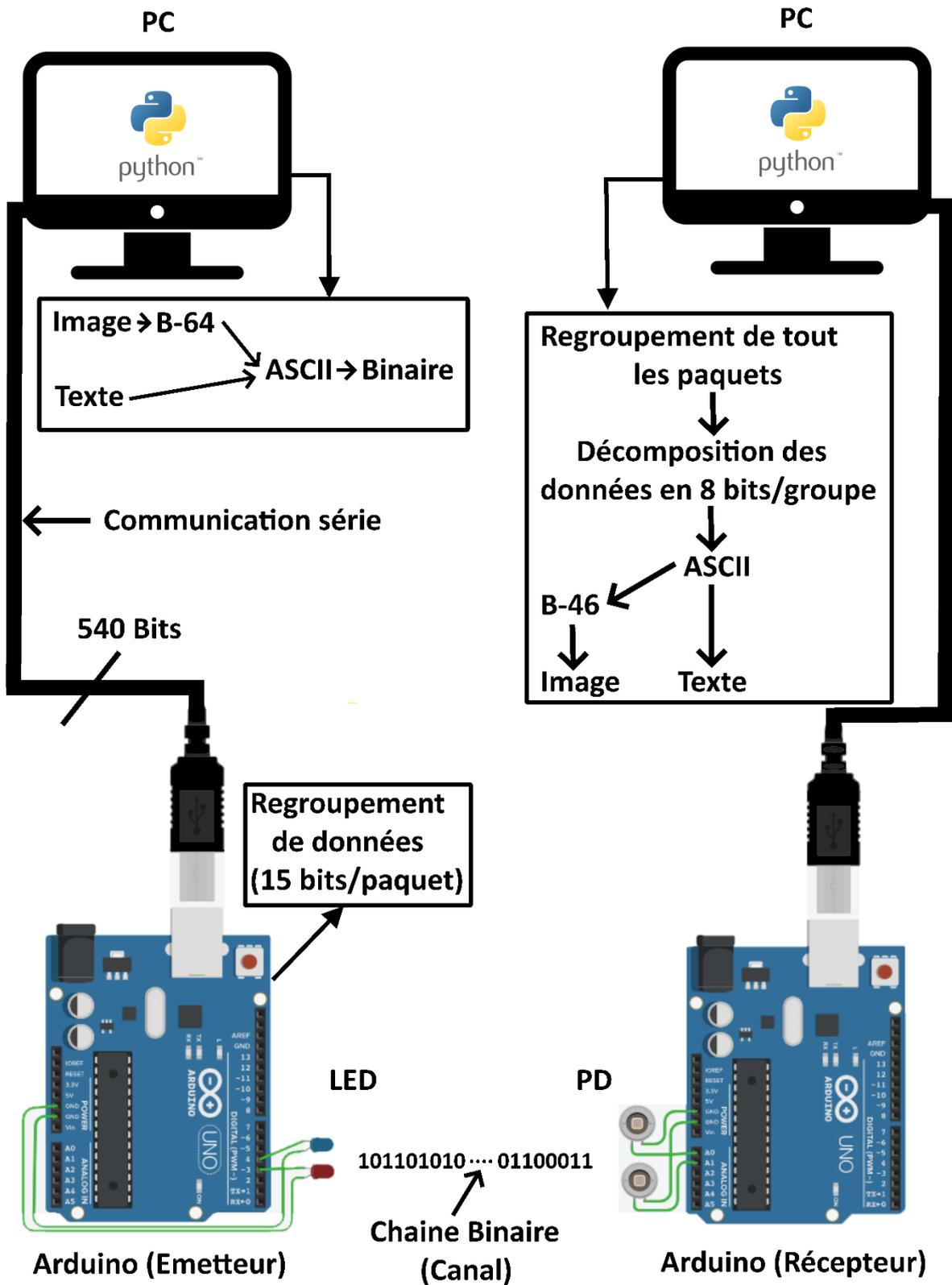


Figure III.11 Schéma résumant le protocole de transmission des textes et des images.

III.4.3.1 Transmission des textes :

A- Emission

- L'ordinateur utilise Python pour lire le texte depuis le clavier du PC, il s'agit donc d'un tableau de caractères.
- Python convertit chaque caractère en binaire basé sur le codage ASCII et remplit les 0 sur la gauche pour mettre chaque caractère en 8 bits.
- L'ordinateur utilise Python pour communiquer avec le moniteur série de l'Arduino.
- La limite pour qu'un ordinateur envoie une chaîne binaire au moniteur série Arduino est de 540 bits.
- Les bits bruts sont regroupés à 540 bits / groupe et envoyés à l'Arduino.
- Lorsque l'Arduino reçoit 540 bits, il les regroupe à 15 bits / paquet.
- Le paquet de données (la plus petite unité d'une transmission) est de 15 bits pour éviter les fausses lectures.
- Une transmission de données complète contient un en-tête et plusieurs paquets de données. L'en-tête donne le nombre de paquets dans une série. L'en-tête et le paquet utilisent un codage binaire.
- L'Arduino manipule la LED en fonction des bits bruts.

B- Réception

- Le côté récepteur reçoit d'abord l'en-tête de données et le convertit en un nombre « n » qui indique le nombre de paquets à recevoir « n ».
- Python reçoit le même numéro de quantité de paquets de données « n ».
- Après avoir reçu tous les bits bruts, le programme les regroupe en 8 bits / groupe. Ensuite, il fait la conversion de chaque 8 bits en caractère.

III.4.3.2 Transmission des images

- Lorsque vous utilisez Python pour lire une image, les images peuvent être lues en tant que fichier base64, qui est un tableau de caractères long.
- La transmission utilise la même méthode pour transmettre ce tableau sous forme de texte long à l'autre côté.
- Le récepteur reconvertit le fichier base64 à partir de la chaîne.

III.5 DESCRIPTION ET COMMENTAIRES DU PROGRAMME UTILISE

III.5.1 Programation de l'interface de transmission (Python)

III.5.1.1 La fonction *pic* ()

C'est une fonction qui prend en arguments l'adresse de l'emplacement de l'image à transférer, et renvoie le codage bases-64 de l'image (chaîne de caractères).

L'argument « s » est l'emplacement du fichier image. Les différents commentaires sont mentionnés ci-dessous :

```
def pic(s):
    """
    Le parametre 's' est le lien de l'image
    """
    #Ouvrir L'image avec Le mode « rb » (ouvrir Le fichier binaire en lecture et écriture)
    with open(s,"rb") as imageFile:
        strr = base64.b64encode(imageFile.read()) #Convertir L'image en base64.
        print(str(strr)[2:-1])
        return str(strr)[2:-1] #Elle renvoie Le codage B-64 de L'image
```

III.5.1.2 La fonction *bin_str* ()

Fonction qui prend en arguments un caractère « s » et qui renvoie le code ASCII en binaire de ce caractère. Puis elle fait l'ajout des zéros à la fin de chaque code binaire pour qu'il devienne uniforme (8 bits).

```
def bin_str(s):
    """
    le paramètre 's' est un caractère.
    Elle renvoie Le nombre ASCII en binaire avec des 0 de remplissage
    pour les rendre uniformes.
    """
    data = ""
    for i in s:
        temp = str(bin(ord(i)))[2:] #caractaire -> ASCII -> Binaire.
        data +=temp.rjust(8,'0') #Ajouter des zéros (8 bits).
    return data
```

III.5.1.3 Initialisation du port série

Une fois la carte Arduino est programmée et branchée sur le port série on peut faire facilement l'initialisation du port série.

- COM4 : est le même port que celui utilisé par Arduino.
- 115200 : est le débit.

```
ser = serial.Serial('COM4',115200,timeout=.1) #débuter la communication série
```

III.5.1.4 Le message de confirmation entre Arduino et Python

Cette partie du programme se répète plusieurs fois. Elle sert à assurer la synchronisation entre l'Arduino et Python.

Lorsque l'Arduino envoie à Python le mot « DONE » sur le Port Série ça veut dire que l'Arduino est prêt (l'instruction `Serial.println("DONE")` ; est exécutée).

L'instruction « `ser.readline()` » permet de lire ce que l'Arduino envoie a Python sur le Port Série.

Donc, tant que l'Arduino n'a pas encore envoyé le message de confirmation « DONE », l'exécution du programme reste dans la boucle infinie « While » jusqu'à ce que la condition de sortie soit satisfaite.

```
#Attendez que l'envoi du message soit confirmé par l'émetteur
while(not "DONE".encode() in ser.readline()):
    pass
```

III.5.1.5 Programme de transmission d'une image

- Python lit et fait la conversion de l'image à transférer en base 64 (chaîne de caractères). Ensuite, il fait la conversion de cette chaîne de caractère en binaire (avec l'ajout de zéros de remplissage à la fin de chaque code binaire pour qu'il devienne uniforme (8 bits))
- Après la mesure de la taille de cette image (data), Python met cette chaîne binaire dans une matrice de 540bits/colonne (540 bits est la limite d'un seul envoi à la fois vers l'Arduino)
- Python calcule le nombre de paquets de 15 bits que « data » contient et envoie ce nombre à l'Arduino.
- Python envoie les 540 bits à l'Arduino pour qu'il les regroupe en 15 bits/paquets. Le paquet de données (la plus petite unité d'une transmission) de 15 bits est pour éviter les fausses lectures.

```

if (a=="s"): # 's' est le mode : transmission d'une image
    print(
        "----- Transmission d'une image -----\n"
        "-----\n"
    )
    pbar = tqdm(total=100) # Afficher une barre de progression. ex: 15 % | █

    t0 = time.clock() # Initialisation de l'horloge
    data = bin_str(pic(img_link))# image->base64-> binaire
    #taille de données (nombre de bits que constitue la chaîne binaire à envoyer)
    temp = len(data)
    # Regrouper la chaîne binaire en 540 bits/ group
    data = [ data[i:i+540] for i in range(0, len(data), 540) ]

    #Envoyer le nombre de paquets à l'Arduino.
    ser.write(bytes("{0:b}".format(temp//8).rjust(15,'0')+"\n",encoding="ascii"))
    print(temp) #Afficher le nombre de paquets.
    ser.flush()
    print(len(data))#Afficher la taille de la chaîne binaire.

    # Attendre la confirmation entre Arduino et Python.
    while(not "DONE".encode() in ser.readline()):
        pass

    #Envoyer les groupes de 540 bits à l'Arduino. L'Arduino va les regrouper en 15 bits / paquet.
    for i in range(len(data)):
        ser.write(bytes(data[i]+"n",encoding="ascii"))
        ser.flush()
        pbar.update(1/len(data)*100
        while(not "DONE".encode() in ser.readline()):
            pass
    print(bin_str(pic(img_link)))# Afficher la chaîne binaire.
    print(time.clock()-t0)

```

III.5.1.6 Programme de Transmission d'un texte

Python lit le texte à transmettre à l'aide de l'instruction *Input ()* et il stocke ce texte dans « data ». Ensuite, il envoie à Arduino le signal de début « 00010 » sur le port série. Si Arduino confirme à Python qu'il a reçu le signal de début, Python fait la conversion des données (data) en binaire (avec l'ajout de zéros de remplissage pour les rendre 8 bits) et envoie ces données à Arduino. Après, Si Arduino confirme la réception des données binaires, Python envoie le signal de fin « 00011 » à Arduino.

```

if(a=="t"): #'t' est le mode: transmission d'un text
    print(
        "##-----Transmission d'un text-----##\n"
        "##-----Transmission d'un text-----##\n"
        "## Tapez le texte que vous voulez transmettre ici ##\n"
    )
    count = 0
    while(1):
        data = input()
        print("No."+str(count)+" -- Données brutes: ")
        #Envoyer sur le port série le signal de début.
        ser.write(bytes("00010\n",encoding="ascii"))
        ser.flush()
        while(not "DONE".encode() in ser.readline()):#boucle de confirmation
            pass
        #data est le texte lu depuis le clavier du PC.
        #Python convertit tout caractère en chaîne binaire 8-bits et l'envoie à l'Arduino.
        for i in data:
            ser.write(bytes(str(bin(ord(i))).rjust(8,'0')+"\n",encoding="ascii"))
            ser.flush()
            print(bytes(str(bin(ord(i))).rjust(8,'0'), encoding="ascii"),end="")
            while(not "DONE".encode() in ser.readline()):
                pass
        #Envoyer le signal de fin.
        ser.write(bytes("00011\n",encoding="ascii"))
        ser.flush()
        print()
        count+=1
        while(not "DONE".encode() in ser.readline()):
            pass

```

III.5.2 Programmation du module émetteur (Arduino) :

III.5.2.1 La fonction void setup ()

- Établir une communication série entre l'Arduino et l'ordinateur avec un débit de communication de 115200.
- Envoyer à Python sur le port série la chaîne de caractère « DONE » pour confirmer que l'Arduino est prêt.
- Déclarer des entrées sorties par la définition des broches numériques dans le registre de direction pour le port D et B.

```

void setup() {
Serial.begin(115200); /* Définir le débit de communication avec le PC.*/
Serial.setTimeout(10);
Serial.println("DONE"); /* Envoyer une confirmation a Python.*/
DDRD = DDRD | B11111100; /* Définir les broches d'Entrées / Sorties */
 DDRB = DDRB | B00010000; /* du microcontrôleur sur une carte Arduino UNO */
randomSeed(analogRead(5));
receive = true;
  PORTD = B00101000; /* Initialisation des LED avant
                       le début de transmission. */
}

```

III.5.2.2 La fonction *SendData()*

L'Arduino transmet les données binaires en manipulant la LED (LED allumée signifie '1' et LED atteinte signifie '0').

Allumer la LED pendant t secondes signifie 1 et éteindre pendant t secondes signifie 0.

```

void SendData() {
PORTD = B00111000;
for(int i = 0; i < data.length(); i++){
  if(data[i] == '1') /*Si le bit est 1*/
  {
    PORTD = B00111000; /*Allumer la LED*/
delayMicroseconds(sync);
  }
  else /*Si le bit est 0*/
  {
    PORTD = B00010000; /* Eteindre la LED*/
delayMicroseconds(sync);
  }
}
PORTD = B00101000; /* Réinitialiser les LED avant
                    de passer a l'analyse du bit suivant */
}

```

III.5.2.3 La fonction *Transm()* et *ResetLight()*

On utilise toujours ces deux fonctions ensemble l'une après l'autre :

La fonction *Transm()* vérifie s'il y a vraiment des données à transmettre. Ensuite, si oui elle fait appelle à la fonction *SendData()* pour débiter la transmission des données.

III.5.3 Programmation du module récepteur (Arduino)

III.5.3.1 La fonction *Void setup ()* et *Voidloop ()*

Établir une communication série entre l'Arduino et l'ordinateur avec un débit de communication de 115200.

En fonction des signaux captés par le Photodiode de synchronisation, le programme commence la réception des données (l'appel de la fonction *GetData()*).

```
void setup()
{
  Serial.begin(115200); /*Définir le débit de communication avec
                        le PC */
  receive = true;
}
void loop()
{  if (receive)
  {
    while(analogRead(A0)<thr_inf){ //Tant que La LED infrarouge est etteinte
    }
    delayMicroseconds(sync / 2);
    GetData();           //L'appel de la fonction GetData ()
  }
}
```

III.5.3.2 La fonction *GetData ()* :

La fonction *GetData ()* permet l'acquisition des signaux envoyés par l'émetteur (LEDs). L'acquisition de ces signaux se fait par l'intermédiaire d'un capteur photodiode. Lors de la détection de la différence de potentiel, Arduino compare cette valeur avec la valeur seuil. Si la valeur reçue est supérieure à la valeur seuil, ceci indique que la LED est allumée (le bit '1') sinon elle est éteinte (le bit '0'). Et c'est comme ça que la chaîne binaire se remplit. Le seuil est la moyenne de la différence de potentiel de pic reçue par les LEDs.

```

void GetData()
{
  int pre = -1;
  String datastring = "";
  while (true)
  {
    int pre = micros();
    String ss = "";
    if (analogRead(A0) < thr_inf) //Tant que La LED infrarouge est etteinte
    {
      if (datastring != "")
      {
        Serial.println(datastring); /* Si la chaine binaire reçue n'est pas vide, envoyer
                                     cette chaine sur le port série de l'arduino */
      }
      break;
    }
    if (analogRead(A1) > thr_red) //Si la LED est allumée
    {
      datastring += "1"; //Ajouter le bit '1' à la chaine binaire
    }
    else //Si la LED est etteinte
    {
      datastring += "0"; //Ajouter le bit '0' à la chaine binaire
    }
    while (micros() - pre < sync)
    {
    }
  }
}
}

```

III.5.4 Programation de l'interface de réception (Python)

III.5.4.1 Programme de réception d'une image :

- Le côté récepteur reçoit d'abord l'en-tête de données et le convertit en un nombre « n » qui indique le nombre de paquets à recevoir « n ».
- Python reçoit sur le port série la chaine binaire envoyée par l'Arduino. Premièrement, il identifie le nombre de paquets « n » qui est l'entête de cette chaine binaire.
- Après avoir reçu toute la chaine binaire, le programme Python regroupe cette chaine en 8 bits/groupe et fait la conversion de chaque groupe en caractère.
- Le résultat de la conversion est la chaine de caractères base-64 de l'image.
- Python reconvertit le fichier base-64 à partir de la chaîne de caractère base-64 résultante.
- Python fait la sauvegarde de cette image dans une adresse spécifique dans notre pc.

```

if (a == "s"):
    print(
        "##-----Réception d'une image-----##\n"
        "##-----##\n"
    )
    flag = False
    while True:
        a = ser.readline() #Lire Les données envoyées sur le port série
        data = a
        if (len(a) > 0):
            pbar = tqdm(total=100) # Afficher une barre de progression. ex: 15 % | ███
            if (not flag):
                n = int(a, 2)
                # n est le nombre prévu de paquets à recevoir
                print(n) # Afficher Le nombre de paquets
                pic = ""
                picdata = ""
                count = 0
                while len(pic) < n * 8:
                    # Recevoir et sauvegarder Les paquets dans une seule chaîne binaire
                    a = ser.readline()
                    if (len(str(a)) > 15):
                        pic += str(a)[2:17]
                        pbar.update(15 / n / 8 * 100)
                    elif (len(str(a)) > 3):
                        pic += str(a)[2:-5]
                        pbar.update((len(str(a)) - 7) / n / 8 * 100)
                print(pic)
                i = 0
                #Regrouper La chaîne binaire en 8 bits/groupe et Les convertir en caractères.
                data = [pic[i:i + 8] for i in range(0, len(pic), 8)]
                print(len(data))
                for i in data:
                    data_part = i
                    x = int(data_part, 2)
                    message = chr(x)
                    picdata += message
                print(picdata)
                # Le résultat de la conversion est la chaîne de caractère base-64 de l'image.
                picdata = base64.standard_b64decode(picdata)
                # Enregistrer et ouvrir l'image
                fh = open("C:/Users/Affoune Oussama/Desktop/vlc/image.jpg", "wb")
                fh.write(picdata)
                fh.close()
                img = mpimg.imread('C:/Users/Affoune Oussama/Desktop/vlc/image.jpg')
                plt.imshow(img)
                plt.show()

```

III.5.4.2 Programme de réception d'un texte :

- Si Python détecte le signal binaire de début « 00010 », il commence l'affichage et l'écriture des données reçues jusqu'à la détection du signal de fin « 00011 ».
- Lorsque Python détecte le signal de fin, il arrête l'affichage et il attend à nouveau le signal de début.
- Deux boucles *While* sont imbriqués, lorsque python reçoit le signal de fin, il sort de la deuxième boucle pour qu'il se trouve dans la première boucle et attendre le nouveau signal de début.

```

if a=="t" :
    print(
        "##-----Réception d'un texte-----##\n"
        "##-----Réception d'un texte-----##\n"
    )
    count = 0
    while(1):
        a = ser.readline()
        data = a
        if(str(data)[2:-5]=="00010"):
            #Détecter si reçu un signal de début.
            print("-----> "+(str(count)),end="")
            while(1):
                a = ser.readline()
                data = a
                if(str(data)[2:-5]=="00011"):
                    #Si le signal de fin est détecté, il attend un nouveau signal de début.
                    print()
                    count+=1
                    break
                if(len(data)>3):
                    # S'il s'agit d'un caractère, Afficher ce caractère sur la même ligne.
                    print(chr(int(data,2)),end="")
                    sys.stdout.flush()

```

III.6 ETUDES DES PERFORMANCES DU SYSTEME REALISE

III.6.1 Débit maximale et taille de transmission des données

Les résultats des essais de transmission sont présentés dans le tableau III.1. La vitesse de transmission (Débit) des données au niveau du canal est de 790 Bits/s.

Tableau III.1 : Résultats des essais de transmission.

Taille de données	Temps
10 KB	13s
47 KB	59s
183 KB	3min et 52s

Exemples de transmission d'image :

Ci-dessous deux exemples d'images que nous avons testés. Les données relatives sont présentées pour chaque image.



Cette image est de taille : 14.8 Ko

Taille des données envoyées au niveau du canal : 20.22 Ko

Temps de transmission : 204.84 secondes



Cette image est de taille : 4.3 Ko

Taille des données envoyées au niveau du canal : 5.88 Ko

Temps de transmission : 59.61 secondes

- Le système peut envoyer n'importe quelle taille de données, il n'y a pas une limite sur la taille.

III.6.2 Taux d'erreur binaire (BER)

La vitesse de transmission de données atteinte par ce système est la vitesse maximale pour que le système assure la transmission des données sans aucune perte et sans aucune faute.

Nous avons vérifié qu'au niveau du canal, la chaîne binaire peut se transmettre sans aucun bit manquant et sans aucun bits erronés ($BER = 1$) à la vitesse de transmission 0,79 KB/s.

III.6.3 Influence de la distance entre émetteur et récepteur

Dans ce système, la distance entre l'émetteur et le récepteur n'a presque aucun effet sur la vitesse de transmission des données tant que la portée de l'émetteur n'est pas dépassée. La distance maximale entre l'émetteur et le récepteur est la distance maximale de la portée de l'émetteur. Par exemple, la portée de la diode laser utilisée est de dizaines de mètres.

Si on veut augmenter la distance entre l'émetteur et le récepteur, on peut utiliser d'autres types d'émetteurs qui ont une grande portée tels que les lasers pointeurs (portée en km).

III.6.4 Amélioration des performances

On peut augmenter le débit de transmission en utilisant des Photodiodes de haute gamme qui ont un taux de sensibilité rapide (réaction rapide avec la lumière).

Aussi, on peut utiliser plusieurs canaux (large bande) pour améliorer le débit de transmission. Le problème c'est que chaque courbe électrique est différente et doit être configurée séparément. Cependant, l'Arduino ne peut traiter qu'un seul canal à la fois. Pour le multicanal Li-Fi, on peut utiliser différentes couleurs de lumière (différentes longueurs d'onde) pour transmettre des données afin d'éliminer les interférences entre elles. En outre, en utilisant d'autres types de microcontrôleurs on peut traiter plusieurs canaux en même temps.

III.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mis en place un système de communication sans fils à base de communication par la lumière visible (Li-Fi). Le système englobe deux cartes Arduino (microcontrôleur) comme module émetteur et récepteur. L'interface utilisateur (Python) est utilisée pour contrôler l'envoi et la réception des textes et des images. Nous avons également étudié les performances du système réalisé.

Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons réalisé et étudié les performances d'un système de communication sans fils à base de communication par la lumière visible (Li-Fi).

Nous avons réalisé un système de communication sans fils à base de communication par la lumière visible (Li-Fi) qui se compose de deux périphériques Arduino (microcontrôleur) comme émetteur et récepteur. L'interface utilisateur, basée sur le langage de programmation Python, est utilisée pour contrôler l'envoi et la réception de données.

La vitesse de transmission des données au niveau du canal (Débit) est de 790 Bits/s. Par ailleurs le système peut envoyer n'importe qu'elle taille de données, il n'y a pas une limite sur la taille. Nous avons également vérifié qu'au niveau du canal, la chaine binaire peut se transmettre sans aucun bit manquant et sans aucuns bits erronés ($BER = 1$) à la vitesse de transmission 790 Bits/s.

En perspectives à ce travail, on peut augmenter le débit de transmission en utilisant des Photodiodes de haute gamme qui ont un taux de sensibilité rapide (réaction rapide avec la lumière). Aussi, en utilisant d'autres types de microcontrôleurs on peut traiter plusieurs canaux en même temps.

Bibliographie

- [1] Akshay Pathak, MarimuthuPadayachi, Rahul Kosamkar, Saritha LR. “*Broadcasting using LiFi*”. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 3, March-2017, ISSN 2229-5518.
- [2] Ameer Chaabna, Abdesselam Babouri, Chuanxi HUANG and Xun Zhang” Visible Light Communication System for Indoor Positioning Using Solar Cell as Receiver” international journal of energy optimization and engineering (IJE OE): Volume 8, Issue 2, Pages (47-60), 2019.
- [3] Chaabna, A. Babouri and X. Zhang, “An Indoor Positioning System Based on Visible Light Communication Using a Solar Cell as Receiver” chapter book: Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems, 2018, Springer, DOI:10.1007/978-3-319-73192-6_5, ISBN-13: 978-3319731919.
- [4] Chaabna, A. Babouri, X. Zhang and S. Laifa “Performance Evaluation of Illuminance Based on LEDs Spacing in Indoor Positioning System Based on VLC” Third International Conference on Technological Advances in Electrical Engineering, ECTAEE18. 10-11 December 2018, Skikda, Algeria.
- [5] Chaabna, A. Babouri and X. Zhang, “An Indoor Positioning System Based on Visible Light Communication Using a Solar Cell as Receiver,” International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems, IC-AIRES'2017, 2017. 22-24 Octobre 2017, Tipaza, Algeria.
- [6] El Pro Cus. Different Types of Wireless Communication with Applications”. Disponible sur : <<https://www.elprocus.com/types-of-wireless-communication-applications/>>. (06/09/2020).
- [7] Zenodo. « *Présentation générale des réseaux sans fil* ». Disponible sur : <https://zenodo.org/record/1038504/files/Chapitre%201%20les%20technologies%20sans%20fils.pdf>>. (06/09/2020).
- [8] ANUSHA. « *ELECTRONICSHUB* » Disponible sur : <<https://www.electronicshub.org/wireless-communication-introduction-types-applications/>>. (06/09/2020).
- [9] George A. Coddington 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, 190 pages.

- [10] « *Les communication en satellites en pleine évolution* ». ITU News MAGAZINE No. 2, 2019, 52 pages.
- [11] René WALLSTEIN. Encyclopædia Universalis « *TÉLÉCOMMUNICATIONS La communication sans fil* ». Disponible sur :
< <https://www.universalis.fr/encyclopedie/telecommunications-la-communication-sans-fil/>>. (06/09/2020).
- [12] « *LES RAYONS INFRAROUGES* ». Disponible sur : < <http://www.utl-morlaix.org/wp-content/uploads/2017/06/UTL-7-LES-INFRAROUGES.pdf>>, (06/09/2020).
- [13] MILLEZ 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.
- [14] Futura Tech. « *Wi-Fi, vitesse de connexion et portée* ». Disponible sur:
< <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/internet-wi-fi-1648/>>, (06/09/2020).
- [15] Frandroid. « *Tout sur le Bluetooth : objets connectés et geomarketing* ». Le 01 mai 2017. Disponible sur : < https://www.frandroid.com/comment-faire/comment-fonctionne-la-technologie/232622_dossier-bluetooth-fonctionnement-interet-les-objets-connectes (06/09/2020).
- [16] Jorge GARCIA-MARQUEZ1, Suat TOPSU. « *LES COMMUNICATIONS par lumière visible : le Li-Fi* ». INDUSTRIE DES OBJETS CONNECTES, 2017 page 22.
- [17] Rapport UIT-R SM.2422-0. « *Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande* », Série SM Gestion du spectre, Genève, le 06/2018.
- [18] Akshay Pathak, Marimuthu Padayachi, Rahul Kosamkar, Saritha LR. « *Broadcasting using LiFi* ». International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 3, March-2017, ISSN 2229-5518.
- [19] R. U.-R. Sm, « *Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande* », Union Internationale des Télécommunications, 2018.
- [20] Chaabna, A. Babouri and X. Zhang, “An Indoor Positioning System Based on Visible Light Communication Using a Solar Cell as Receiver” chapter book: Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems, 2018, Springer, DOI:10.1007/978-3-319-73192-6_5, ISBN-13: 978-3319731919.

- [21] Clement Le Bas. Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil. Optique / photonique. Université de Limoges, 2017. Français. NNT : 2017LIMO0087 . tel-01703408.
- [22] P. Goswami et M. K. Shukla, « Design of a Li-Fi Transceiver », *Wireless Engineering and Technology*, vol. 08, no 04, p. 71-86, 2017.
- [23] Octave Ringar. Utilisation des techniques avancées d’Emission / Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande. Optique / photonique. Université de Limoges, 2015. Français. NNT : 2015LIMO0100. tel-01271419.
- [24] N. Barbot, S. Sahuguede, A. Julien-Vergonjanne, and J.-P. Cances, “LDPC and Fountain Code Performances over Mobile Wireless Optical Channel,” *Transactions On Emerging Telecommunications Technologies*, Article soumis le 30/08/2013.
- [25] M. Falcitelli et P. Pagano, « Visible Light Communication for Cooperative ITS », in *Intelligent Transportation Systems*, vol. 52, M. Alam, J. Ferreira, et J. Fonseca, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2016, p. 19-47.
- [26] « An IEEE Standard for Visible Light Communications | Visible Light Communications ». [En ligne]. Disponible sur : <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/>. [Consulté le : 18-mars-2019].
- [27] Nuttapol PRAYONGPUN, “Modélisation et étude de la capacité du canal pour un système multi-antennes avancé exploitant la diversité de polarisation”, THESE, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE 1, le 29 avril 2009.
- [28] Didier Le Ruyet et Berna Özbek, “Systèmes MIMO et codage spatio-temporel”, CNAM, 292 rue Saint Martin, 75141 Paris Cedex 3, France.
- [29] Bertrand Cottenceau. « Carte ARDUINO UNO Microcontrôleur ATmega328 ». Microcontrôleurs EI3 AGI, ISTIA, 2016-2017.
- [30] Amazon. « Aihasd 10PCS 5V Tête laser Cuivre Filaire Diode Laser Module WL rouge mini 650nm 6mm 5mW ». Disponible sur : < <https://www.amazon.fr/Aihasd-10PCS-Cuivre-Filaire-Module/dp/B07H93XR1X>>, (06/09/2020).
- [31] Farnell. « BPW34 Photodiode ». Disponible sur : < <https://fr.farnell.com/vishay/bpw34/photodiode/dp/1045425>>, (06/09/2020).
- [32] Michael Margolis, Nicholas Weldin. « *Arduino Cookbook* ». 2^{ème} édition, ISBN9782100727124, 2015, 5 rue Laromiguière, 75005 Paris, 453 pages.
- [33] X. HINAULT. « *Communication série* ». Ateliers Python, Mars 2013.