



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie



N°d'ordre : M...../GE/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

FILIERE : TELECOMMUNICATIONS

Spécialité : Système des Télécommunication

Thème

Étude et réalisation d'un système semi-Duplex de communication
par la lumière visible (VLC) : Application au domaine biomédicale

Présenté par :

Melle BENKHIRA Samia Ines

Soutenu publiquement le : 12/07/2022 devant le jury composé de :

Président: M.BOUKORTT Abdelkader Professeur UMAB

Examineur : M.RESFA Abbès MCB UMAB

Rapporteur : M. ABED Mansour MCA UMAB

Année Universitaire : 2021/ 2022

Dédicaces

Je tiens à dédier cet humble travail à :

A ma tendre mère Hayet et mon très cher père Baghdad

A mes sœurs : Asma , Sennia et surtout ma très chère nièce Lydia

et toute ma famille

A mes frères et mon beau-frère Maarouf Adel

Je tiens aussi de dédier ce travail à M. Abed Mansour

A mes meilleurs amis :

Chahinez , Hafida, Mme ben Yahia Fatima et bien sûr

M. YesguerNouh

Remerciements

Premièrement, je dois Au nom du dieu le miséricordieux le très miséricordieux le tout puissant de m'avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser mon projet de fin d'études. Je remercié le Puissant maitre de l'univers **ALLAH** de la sagesse, la force et la volonté et ma famille pour leur soutien sans faille durant ces années.

Le grand merci à mon encadreur **M. Abed Mansour** pour avoir mis à ma disposition tous les moyens qui m'a permis de mener à terme cette étude et aussi pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Je tiens aussi à exprimer mes reconnaissance à nos futurs docteurs **M. Abdelmoula** et **M. Lantri** de m'avoir aidé et orienté.

J'adresse mes remerciements à **Mme Benyahia Fatima Zohra** aussi pour son aide et son serviabilité durant mon stage.

Je remercié également en fin tous mes amis et collègues.

Liste des Acronymes

ADC : Analog Digital Converter

AM : Amplitude modulation

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

BER : Bit Error Rate

BPM : beats per minute

CSK : Color Shift Kering

CC : courant continue

CPL : courant porteur en ligne

DAC : DigitalAnalogConverter

DD : Direct Detected

DSP : Digital Signal Processor

EMI : Electro-Magnetic Interférence

ECG : Electrocardiogramme

FCS : Frame Control Séquence

FOV : Field of view

FDM : frequency devision multiplexing

FM : Frequency modulation

GPS : global positioning system

GPRS : General Packet Radio Service

HCS : Header Check Sequence

HTTP : Hypertext transfer protocol

IDE : Integrated Development Environment

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT : Internet of Things

IdO : Internet des Objets

IR : Infra-Red

IrDA : Infrared Data Association

ISI:Inter-Symbol interférence

JEITA : Japan Electronics and Information Technology Industries Association

LED : Light Emitting Diode

LLC : Logical Link Control

Los : Line of Sight

LDR : Light Dépendent Résistor

LPF : Low pass filter

LIFI : light fidelity

LTE : Long Term Evolution

MAC : Media Access Control

MCU : Micro Controller Unit

MHR :MAC Header

MIMO : Multiple Input-Multiple Output

MSDU :MAC Service Data Unit

MFR : MAC Footer

NRZ : non-return to zéro

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OOK : On Off Keying

OWC : Optical Wireless Communications

PD : Photodetector

PHR : Physical layer Header

PHY : Physical layer

PIN : Positive Intrinsic Negative

PPDU : Physical layer Data Unit

PPM : Pulse Position Modulation

PSDU : Physical layer Service Data Unit

PWM : Pulse Width Modulation

RF : Radio Frequency

RLL : Run Length Limited

RFID : Radio-frequency identification

SCM : Single Carrier Modulation

SDK: Software Development Kit

SHR: Synchronization Header

SINR:Signal to Interference plus Noise Ratio

SMTP:Simple Mail Transfer Protocol

STI: système de transport intelligent

TCA:Trans-conductance

TIA:Trans-impedanceamplifier

VLC:Visible Light Communication

VPAN:VLC Personal Area Network

VPPM:Variable Pulse Position Modulation

WDM:Wavelength Division Multiplexing

Wi-Fi :Wireless-Fidelity

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les communications par la lumière visible

Figure I.1 : Distribution du spectre électromagnétique avec la lumière visible	3
Figure I.2 : Caractéristiques IV d'une photodiode.....	4
Figure I.3. Photo-coupleur.....	5
Figure I.4 : Cellule photovoltaïque.....	5
Figure I.5 : Les spectres des sources de lumière	6
Figure I.6 : (a) Schématisation simplifiée d'une ampoule LED (b) Combinaison du spectre LED bleu avec les émissions YAG : Ce 3+ pour générer un spectre de lumière blanche dans les systèmes LED.....	7
Figure I.7 : L'effet de couleur d'une PC-LED	8
Figure I.8 : Schéma d'une LED-RGB	8
Figure I.9 : Variation de l'intensité lumineuse d'une RVB-LED en fonction de la longueur d'onde	9
Figure I.10 : Répartition lumineuse d'une LED-RVB	10
Figure I .11 : La composition d'un canal VLC	10
Figure I.12: Utilisation du VLC pour la localisation intérieure	13
Figure I.13: Utilisation du VLC dans un musée.....	13
Figure I.14: Projet Smart City se classent au deuxième rang dans la liste des segments IoT pour les projets Internet des objets existants	14
Figure I.15: Exemple d'une grille intelligente	15
Figure I.16: Objets médicaux connecté à internet.....	16

Chapitre II : Etude des systèmes VLC et de leurs applications pratiques

Figure II.1: Schéma synoptique d'un système VLC bidirectionnel.....	17
Figure II .2 : Le principe de fonctionnement.....	19
Figure II.3 : Schéma fonctionnel d'un système VLC.....	20
Figure II.4: Modulation VPPM.....	21
Figure II.5 : Modulation CSK.....	22
Figure II.6 : Format NRZ.....	23
Figure II.7: Format Manchester	23
Figure II.8 : Utilisation de la VLC pour localisation indoor.....	24
Figure II.9: Utilisation de la VLC dans l'avion	24

Figure II.10: Illustration des systèmes VLC appliqués au domaine médical.....	25
Figure II.11: Utilisation de VLC dans la communication sous-marine.....	25
Figure II.12: Communication V2V ET I2V	26

Chapitre III :Analyse structurelle et algorithmique du système VLC réalisé

Figure III.1. Schéma synoptique du coté émission via le systèmeVLC	28
Figure III.2. Schéma synoptique du coté réception via le systèmeVLC	28
Figure III.3 : Anatomie d'une carte Arduino UNO	29
Figure III.4 : Présentation du logiciel Arduino IDE	31
Figure III.5: Module LED 3W utilisé à l'émission.....	31
Figure III.6 : La photorésistance LDR utilisée à la réception.....	32
Figure III.7: Module LDR compatible avec Arduino	33
Figure III.8: Photodiode BPW34	33
Figure III.9: La forme générale du graphe PQRST	34
Figure III.10 : Le tracé PQRST mesuré par le capteur ECG AD8232 (vitesse de transmission série=9600 baud)	34
Figure III.11 : Le tracé PQRST mesuré par le capteur ECG AD8232 (vitesse de transmission série=4800 baud)	35
Figure III.12: Le capteur ECG AD8232	35
Figure III.13: Présente l'emplacement des électrodes d'un ECG sur le corps humain	36
Figure III.14 : Connexion de l'Arduino avec le capteur ECG AD8232	36
Figure III.15 : Schéma synoptique d'une communication VLC avec un ECG connecté à internet	38
Figure III.16 : Représentation de la section de l'émetteur	38
Figure III.17 : Représentation de la section du récepteur	39
Figure III.18 : Vue d'ensemble du système VLC semi-duplex réalisé contenant un Arduino, un émetteur module LED 3W, et un récepteur de type photorésistance LDR de part et d'autre des deux entités communicantes	39
Figure III.19 : Communication entre la section de l'émetteur contenant le capteur ECG AD8232 et la section de récepteur. (a) Installation des composantes du système et (b) Le test final	40

Figure III.20 : L'organigramme expliquant les étapes de l'émission et de la réception d'un point de vue algorithmique comme implémentées sur les deux Arduinos.....	41
Figure III.21 : Fenêtres du moniteur série de l'Arduino à l'émission et à la réception d'un texte brut.....	42
Figure III.22 : Emission des données BPC d'un ECG par le VLC	43
Figure III.23: Emission des données d'un ECG par le VLC (le signal PQRSTU)	43
Figure III.24 : Effet de variation de la distance de communication par LDR.....	44
Figure III.25 : Affichage de mesure des distances de communication par LDR.....	45
Figure III.26: Mesure de distance et d'angle réceptrice d'une photodiode.....	45
Figure III.27: BER en fonction du rapport signal sur bruit d'une modulation OOK.....	47

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité sur les communications par la lumière visible

Tableau I.1 : Rapports d'une LED blanche tricolore RVB.....9

Tableau I.2 : Comparaison entre VLC, RF et IR.....12

Chapitre II : Etude des systèmes VLC et de leurs applications pratiques

Tableau II.1: Modulation CSK.....22

Chapitre III : Analyse structurelle et algorithmique du système VLC réalisé

Tableau III.1 : Caractéristiques d'une carte Arduino UNO30

Tableau III.1 : Comparaison entre différents photo-détecteurs.....46

Tableau III.3: Exemple des codes ASCII émises et reçus avec l'évaluation du BER.....47

Table des matières :

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des acronymes	
Introduction générale	Error! Bookmark not defined.
Chapitre I : Généralité sur les communications par la lumière visible	
I.1 Introduction	4
I.2 Définition de la lumière visible	4
I.3 Les photo-détecteurs de lumière	4
I.3.1 L'œil	4
I.3.2 Les photodiodes.....	5
I.3.3 Les photo-Darlington	5
I.3.4 Les phototransistors.....	5
I.3.5 Les photo-thyristors.....	5
I.3.6 Les photo-coupleurs... ..	6
I.3.7 Les cellules photovoltaïque.....	6
I.4 Lumière ambiante et bruit sur le canal VLC.....	6
I.5 Types de LEDs utilisé en VLC	7
I.5.1 PC-LED (phosphor-converted-LED)	7
1.5.1.1 Matériaux et caractéristiques spectrales du PC-LED.....	8
1.5.1.2 L'effet d'éclairage du PC-LED	8
I.5.2 LED- RVB (Rouge-Vert-Bleu)	9
I.5.2 .1 Caractéristiques de RVB-LED	10
I.6 Architecture d'un système VLC	11
I.6.1 Emetteur VLC	11
I.6.2 Récepteur VLC	12
I.7 Avantages et inconvénients du VLC	12
I.8 Applications du VLC.....	13
I.9 Conclusion	17
Chapitre II : Etude des systèmes VLC et de leurs applications pratiques	
II.1 Introduction	18
II.2 Description d'un system de communication bidirectionnelle par lumière visible	18

II .2.1 Communication entre la LED de faible puissance et la photodiode	19
II.3 Liaison optique dans un canal VLC	19
II.3.1 Liaison LOS directionnelle	19
II.3.2 Liaison LOS non-directionnelle.....	19
II.4 Définition et principe de fonctionnement.....	20
II.4.1 Définition	20
II.4.2 Principe de fonctionnement	20
II.5 Architecture d'un système de communication VLC.....	20
II.5.1 L'émetteur VLC	21
II.5.2 Le récepteur VLC.....	21
II.5.3 Les modulations associées aux communications VLC	21
II.5.4.1 La Modulation OOK	21
II.5.4.2 La modulation VPPM.....	22
II.5.4.3 La modulation OFDM	22
II.5.4.4 La modulation CSK (Color shift keying)	23
II.6 Types de codage.....	24
II.6 .1 Formats NRZ (Non-Return-to-Zéro)	24
II.6.2 Format Manchester.....	24
II.7 Domaines d'applications.....	24
II.7.1 Environnements indoor	24
II.7.1.1 Localisation indoor	24
II.7.1.2 Aviation	25
II.7.1.3 Hôpitaux et soins de santé	25
II.7.1.4 Environnements dangereux	26
II.7.2 Environnements outdoor	26
II.7.2.1 Communications sous-marines	26
II.7.2.2 Véhicule et transport	27
II .8 Conclusion.....	27
Chapitre III : Analyse structurelle et algorithmique du vlc réaliser	
III.1 Introduction	28
III.2 Analyse structurelle du projet réalisé	29
III.3 Présentation de l'environnement de travail.....	29
III .3.1 Arduino UNO.	30

III.3.2 Module LED 3W	32
III.3.3 Photorésistance	33
III.3.4 Photodiode BPW34.....	34
III.4 Le capteur ECG (Electrocardiogramme)	34
III.4 .1 Qu'est-ce qu'un ECG	34
III.4 .2 Capteur ECAD8232	36
III.4 .3 Emplacement du capteur ECG AD8232 sur le corps.....	37
III.5 Implémentation.....	38
III.5 .1 Section de l'émetteur.	38
III.5 .2 Section de récepteur	39
III.5.3 Analyse algorithmique du système VLC réalisé	42
III.6 Programmation	43
III.6.1 Visualisation de la communication.....	43
III.6 .2 Codage.....	44
III.6 .3 Modulation	45
III.7 Résultats pratiques	45
III.7.1 Résultat de la Transmission avec différents photodétecteurs.....	45
III.7.1.1 Variation de la distance	45
III.7.1.2 Variation du débit	47
III.7.2 BER et SNR de modulation OOK	47
III.8 Conclusion.....	50
Conclusion générale	51

Introduction

Générale

Introduction Générale

A l'époque actuelle, la technologie Wi-Fi (Wireless-Fidelity) est une technologie qualifiée qui s'est imposée dans le monde entier. Son utilisation est toujours débattue en raison des effets inconnus des ondes sur le corps humain. En outre, les débits obtenus ne sont pas très efficace et les réseaux publics commencent à être saturés. La problématique qui se pose est la suivante : Est-ce qu'il y'a des solutions pratiques pour résoudre ces problèmes sans en provoquer de nouveaux ?

D'après la recherche faite, on a trouvé que les VLCs (Visible Light Communications), pourraient être une bonne substitution du réseau Wi-Fi dans certaines conditions et pour des applications multiples. Le standard qui correspond à cette technologie est connu sous le nom de Li-Fi pour Light Fidelity.

Les avantages du VLC sont très variés à savoir :

- ✓ Réduction des interférences entre différents émetteurs actifs ...,
- ✓ Possibilité de fournir une bande passante beaucoup plus large que le Wi-Fi, ce qui permet de desservir plusieurs utilisateurs simultanément avec hauts débits,
- ✓ Sécurisation automatique de transmissions puisque le piratage extérieur est impossible du fait que la lumière ne peut pas pénétrer à travers les murs,
- ✓ D'un point de vue énergétique, le VLC, selon les approximations et les tests effectués, pourrait surpasser largement le Wi-Fi, sur la consommation et l'efficacité de l'énergie.

Les inconvénients du VLC sont très variés a savoir :

- ✓ Le prix d'une (diode électroluminescente) LED Li-Fi est important du fait de sa nouveauté,
- ✓ Le cout d'installation peut- être cher pour mettre en place les LEDs dans un bâtiment existant et déjà équipé,
- ✓ Il faut être obligatoirement sous les ondes lumineuses pour capter le signal,
- ✓ Les données sont descendantes, il faut un autre module (intégré ou non) pour faire remonter les données.

Introduction générale

L'arrivée de LEDs plus puissantes et plus rapides a permis de penser à leur utilisation comme des transmetteurs d'information. La lumière émise par les LEDs 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 est une technologie qui se développe autour des éclairages à LEDs. 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) [1].

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 [2].

Le cahier de charge de notre projet de fin d'études consiste à :

1. Étudier les systèmes VLCs : Une recherche bibliographique concernant le sujet s'avère nécessaire quelque le projet à réaliser. Dans ce contexte, nous avons commencé par comprendre l'architecture de base des systèmes de communications optiques en particulier les émetteurs et récepteurs optiques ainsi que les types de modulation utilisés.
2. Concevoir et réaliser un système de communication par la lumière visible : Le système conçu est composé de :
 - a) Un bloc d'émission à base de LEDs contrôlé par un Arduino,
 - b) Un bloc de réception à base de photo-détecteurs dont l'acquisition de données numériques se fait à travers un deuxième Arduino. Le canal optique s'intercale entre les deux blocs.

Le cheminement des données à transmettre est alors le suivant : Les données numériques à transmettre sont d'abord encodées pour adapter le signal électrique transmis au canal de propagation optique et donc réduire les dégradations subissées. La conversion du signal électrique en un signal lumineux se fait par le biais d'un circuit électronique pilotant une ou plusieurs

Introduction générale

LEDs. Son rôle est de faire varier l'intensité lumineuse des LED en fonction des données transportées par le signal à transmettre. La modulation utilisée est par conséquent une modulation d'amplitude, dont l'exemple le plus simple est la modulation On-Off Keying (OOK) où des 0 et des 1 logiques sont transmis selon un autre type de codage en ligne à savoir le codage NRZ, RZ, Manchester, Manchester différentiel, Miller et autres.

La lumière émise subira certainement des déformations dues principalement aux obstacles en plus des conditions météorologiques.

Le signal lumineux déformé est enfin reçu dans l'autre bout à travers un photorécepteur (photodiode, caméra...) qui le convertit à son tour en courant électrique. Ce dernier est traité puis démodulé et décodé pour récupérer les données transmises par l'émetteur optique. Dans ce mémoire on va étudier le fonctionnement, effectuer la réalisation pratique, et évaluer les performances de la technologie Li-Fi à travers la conception d'un système VLC autour d'Arduinos.

Le reste du manuscrit est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, on introduit la technologie VLC d'une manière générale, en passant aussi par les sources de la lumière, les photo-détecteurs utilisés dans cette technologie, l'architecture VLC ainsi que ses avantages et ses limites.

Le deuxième chapitre est consacré à la description d'un système de communications bidirectionnelles par lumière visible en focalisant sur : Le principe de fonctionnement, les types de modulations et les différentes liaisons optiques utilisées dans les systèmes VLC.

Dans le troisième chapitre, on présente en détails l'analyse structurelle et algorithmique du système VLC réalisé pour le but de transmettre des données biomédicales à base du capteur ECG . Ensuite, on présentera les résultats et les discussions relatives à la mise en œuvre du système Li-Fi conçu permettant la transmission des textes et des images.

Enfin, nous concluons le mémoire par présenter des conclusions et recommandations pour les projets futurs.

C

HAPITRE I

**Généralité sur les
communications par la
lumière visible**

I.1 Introduction

Les systèmes VLC, les sources et récepteurs optiques à base de semi-conducteurs constituent un domaine de recherche très prometteur en vue de concevoir des réseaux de communications ultra rapides, à haute sécurité et très fiables en utilisant une lumière pulsée haute fréquence à très large bande passante. Dans ce contexte, les LEDs sont devenues la source principale d'éclairage dans les systèmes de transmissions sûres de données à grande vitesse.

En plus des transmissions bidirectionnelles traditionnelles, nous vivons actuellement un développement croissant de l'internet des objets (Internet of Things IoT) qui est devenue la principale évolution dans notre monde. Dans ce chapitre, nous présentons quelques notions de base sur la lumière puis nous focalisons notre attention sur la description des différents éléments constituant les systèmes VLC, les avantages et les inconvénients de ces systèmes ainsi que leurs principales applications.

I.2 Définition de la lumière visible

La lumière visible est la forme sous laquelle le rayonnement électromagnétique associé à des longueurs d'onde, dans une plage particulière est interprété par le cerveau humain. La lumière visible est donc par définition composé d'ondes électromagnétiques visuellement perceptibles. Le spectre couvre des longueurs d'onde compris entre 380 nm à 750 nm [3] (Figure I.1).

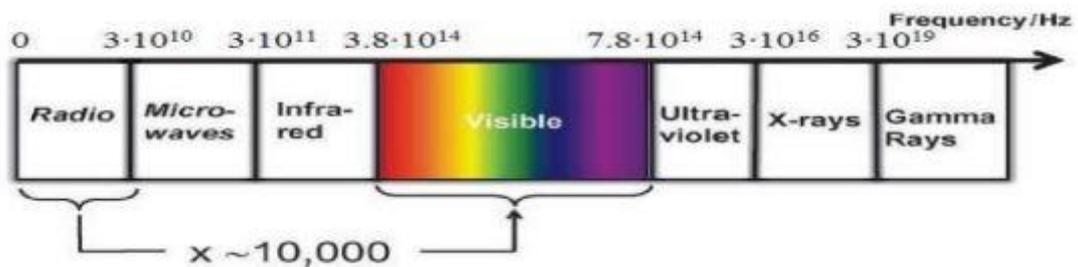


Figure I.1 : Distribution du spectre électromagnétique avec la lumière visible [3].

I.3 Les photo-détecteurs de lumière

I.3.1 L'œil

Il reçoit des rayons lumineux, qui traversent une succession de milieux transparents, et viennent impressionner la rétine. Par l'intermédiaire, des fibres nerveuses formant le nerf optique, les cellules de la rétine transmettent au cerveau un influx nerveux.

I.3.2 Les photodiodes [4]

Considérons une jonction P-N polarisée en inverse. Lorsque cette jonction est dans l'obscurité, elle est le siège d'un courant de fuite que l'on appelle courant d'obscurité. Si l'on illumine cette jonction avec une radiation de longueur d'onde suffisamment faible, il y a création de paires d'électron-trou au sein du cristal.

Dans la pratique les photodiodes ne sont jamais utilisées seules du fait de la faiblesse du courant qu'elles peuvent délivrer. Elles sont donc généralement associées à un amplificateur. Les caractéristiques deviennent alors celles de l'ensemble photodiode/amplificateur (voir Figure I.2).

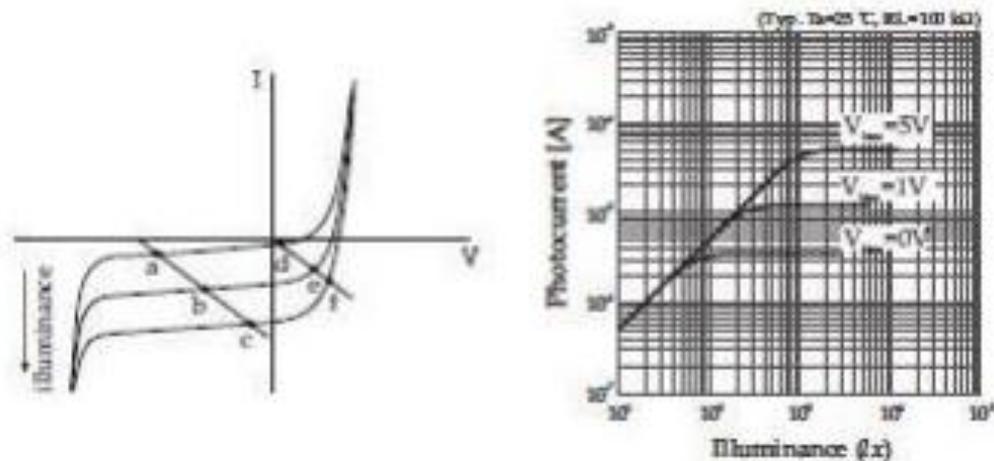


Figure I.2 : Caractéristiques IV d'une photodiode [4].

I.3.3 Les photo-Darlington

Il s'agit d'un composant très voisin du phototransistor à l'exception du gain beaucoup plus élevé du fait de la structure à deux étages.

Le photo-Darlington se révèle un détecteur extrêmement sensible, par contre son temps de réponse est beaucoup plus long que celui du phototransistor. De même, le courant d'obscurité du photo-Darlington, est très supérieur à celui du phototransistor [4].

I.3.4 Les phototransistors

Le phototransistor est un transducteur capable de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les paramètres tels que les longueurs d'onde, les alignements, les interfaces, etc. doivent être considérés avec une plus grande importance lors de la conception du circuit [5].

I.3.5 Les photo-thyristors

Le thyristor est un composant qui permet de commander des puissances relativement importantes avec peu de pertes car ils ne fonctionnent qu'en commutation. C'est un composant de

l'électronique de puissance, mais on le trouve aussi en électronique de faible puissance pour quelques applications spécifiques [6].

I.3.6 Les photo-coupleurs

Un photo-coupleur, ou opto-coupleur, est un composant électronique capable de transmettre un signal d'un circuit électrique à un autre, sans qu'il y ait de contact galvanique entre eux. Le terme de photo coupleur est traduit de l'anglais optocoupler ou optoisolator (voir Figure I.3) [7].

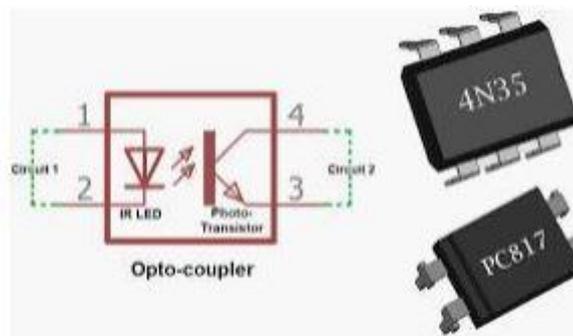


Figure I.3 : Symbole et exemple d'un photo-coupleur.

I.3.7 Les cellules photovoltaïques

Elles présentent une combinaison de plusieurs photodiodes et formant ainsi un panneau solaire (voir Figure I.4) [8].



Figure I.4 : Cellule photovoltaïque [8].

I.4 Lumière ambiante et bruit sur le canal VLC [9]

Les sources de lumière naturelle, et artificielle, superposées produisent une lumière ambiante, qui est détectée sous forme de bruit dans un détecteur VLC.

Un niveau d'intensité de la lumière du soleil peut être très élevé dans une large gamme dynamique, car la nature de la lumière solaire est constante, la lumière ne contient pas de fréquences d'interférence au VLC.

La lumière solaire ne produit que du bruit de tir stationnaire au détecteur, et elle est observée comme une tension continue et constante CC stable dans un récepteur. Ce type de bruit peut être facilement filtré loin du signal détecté. Le seul vrai problème de la lumière du soleil, est sa capacité à saturer le photo-détecteur, et donc les exigences accrues de la gamme dynamique des détecteurs dans différentes conditions d'éclairage. Les lumières artificielles les plus courantes utilisées de nos jours dans l'éclairage intérieur, sont les lampes fluorescentes et LED. Les spectres des sources de lumière sont montrés dans la Figure I.5.

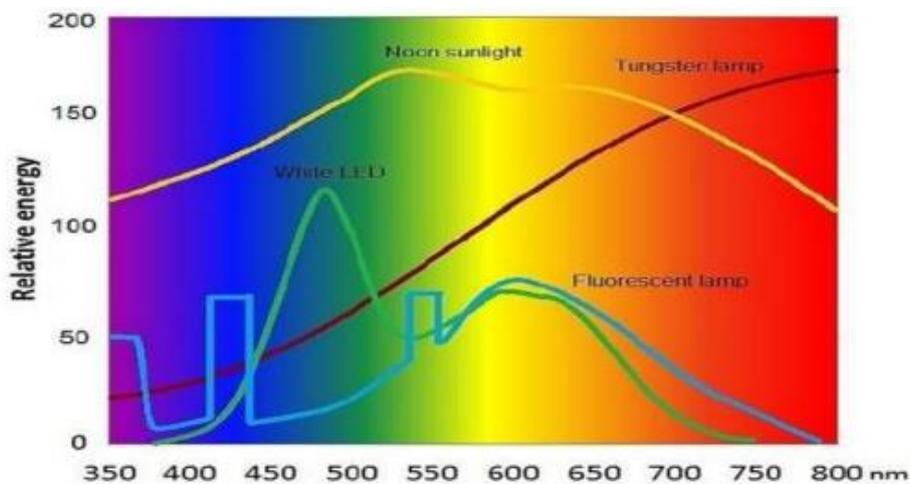


Figure I.5 : Les spectres des sources de lumière [9].

I.5 Types de LEDs utilisé en VLC

Il existe actuellement deux types de LED sur le marché : Les LEDs au phosphore et les LEDs RGB (Red-Green-Blue), qui sont utilisées comme sources lumineuses des LEDs blanches dans le système VLC.

I.5.1 PC-LED (phosphor-converted-LED)

La LED au phosphore est le type de LED la plus utilisée. Elle exploite la lumière bleue pour exciter le phosphore jaune et produire une lumière blanche. Cependant, sa bande passante de modulation est de quelques mégaoctets seulement rendant la vitesse de transmission du système limitée.

Lors de l'utilisation de la touche on-off-modulation sans retour à zéro (OOK-NRZ), le débit de transmission maximal peut atteindre 10 Mbit /s. Cela est dû à la faible vitesse de réponse du phosphore jaune [10].

1.5.1.1 Matériaux et caractéristiques spectrales du PC-LED

Le YAG : Ce³⁺ phosphore et le Y₃Al₅O₁₂ : Ce³⁺ phosphore sont couramment utilisés dans les PC-LED blanches commerciales en raison de son large spectre d'émission jaune. Une fois que le phosphore absorbe la lumière émise par la puce bleue, il émet une lumière de la bande verte à la bande rouge, qui représente la majeure partie du jaune [10].

La Figure I.6 présente une schématisation d'une PC-LED et son spectre de lumière blanche.

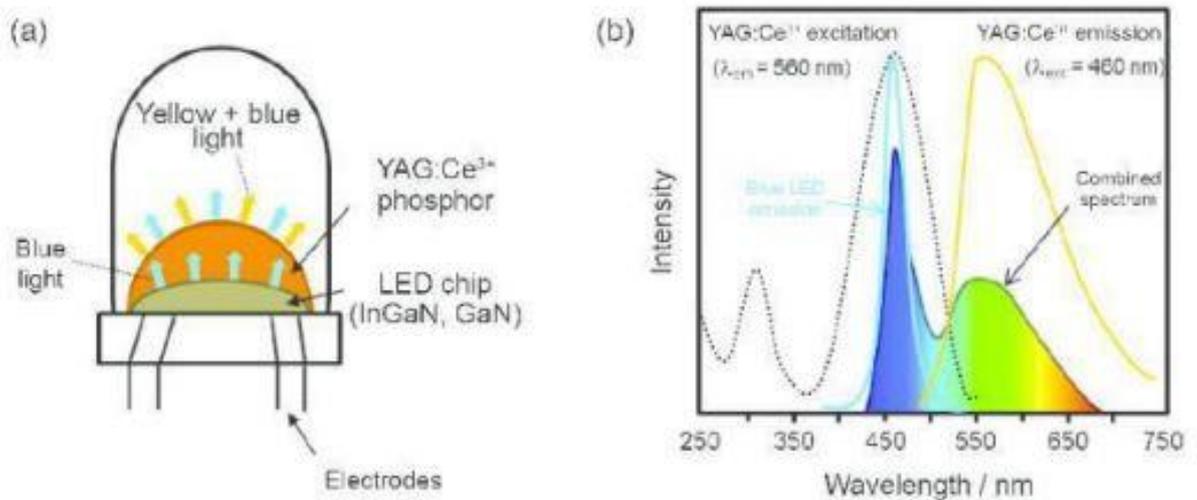


Figure I.6 : (a) Schématisation simplifiée d'une ampoule LED
 (b) Combinaison du spectre LED bleu avec les émissions YAG : Ce³⁺ pour générer un spectre de lumière blanche dans les systèmes LED [11].

1.5.1.2 L'effet d'éclairage du PC-LED

Pour obtenir un indice de couleur élevée, la couleur de la lumière doit être proche au blanc, et l'effet de couleur devrait atteindre $R_a = 74.7$, $X = 0,3238$ et $y = 0,3264$ [9] (voir la Figure I-7).

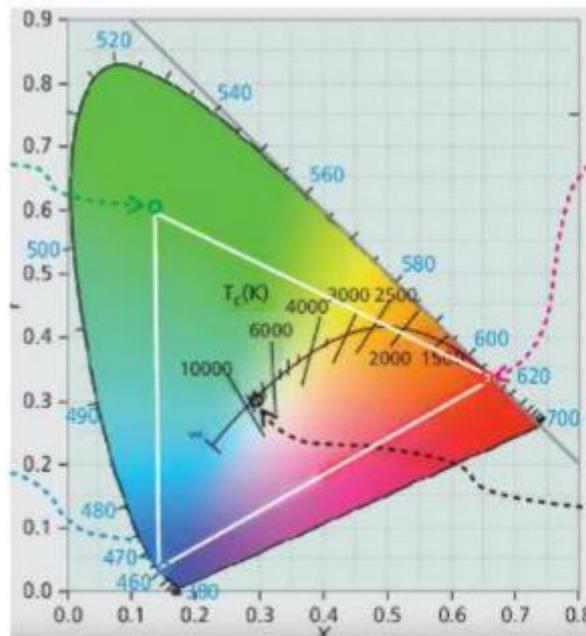


Figure I.7 : L'effet de couleur d'une PC-LED [12].

I.5.2 LED- RVB (Rouge-Vert-Bleu)

Un autre type courant de LED est la LED RGB. Le schéma d'un RGB-LED est illustré à son but est d'encapsuler les puces LED rouges, vertes et bleues et mélanger la lumière émise pour produire une lumière blanche (voir Figure I.8).

Le RGB-LED a une bande passante de modulation très élevée, ce qui est un bon signe du fait qu'il sera utilisé dans les futures transmissions de signaux à haute vitesse. Cependant, la complexité de modulation est relativement élevée, et certains problèmes, comme la façon de contrôler les trois puces pour éviter le scintillement et le maintien de la stabilité des couleurs mélangées [10].

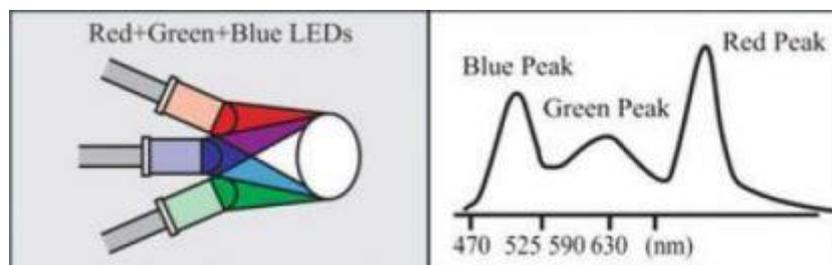


Figure I.8 : Schéma d'une LED-RGB [10].

Par la combinaison des trois LEDs monochromes, Pour obtenir indice de couleurs élevés, la couleur de la lumière doit être proche du blanc, l'effet de couleur devrait être supérieur à 80, les coordonnées de couleur sont proches de $x = 0.33$ et $y = 0.33$ (voir la Figure I.7). Les données sur

les rapports spécifiques sont présentées au Tableau I.1. Avec l'augmentation du nombre de LED monochromes, le rendement des couleurs de LEDs blanches s'améliore, tandis que l'efficacité de la lumière diminue. Le prix cher est l'un des facteurs limitant son développement, bien que la LED blanche tricolore à une efficacité lumineuse très élevée [13].

Tableau I.1 : Rapports d'une LED blanche tricolore RVB [13].

LED	Longueur d'onde (nm)	Densité spectrale	Efficacité du rayonnement	Energie	Flux
Rouge	614	20	311.6	1	3116
Bleu	546	30	640.9	1.2	769.1
Vert	465	30	54.5	1	54.5

I.5.2.1 Caractéristiques de RVB-LED

Les caractéristiques spectrales d'une LED-RVB comprennent la longueur d'onde d'émission, la largeur et la forme spectrale [14].

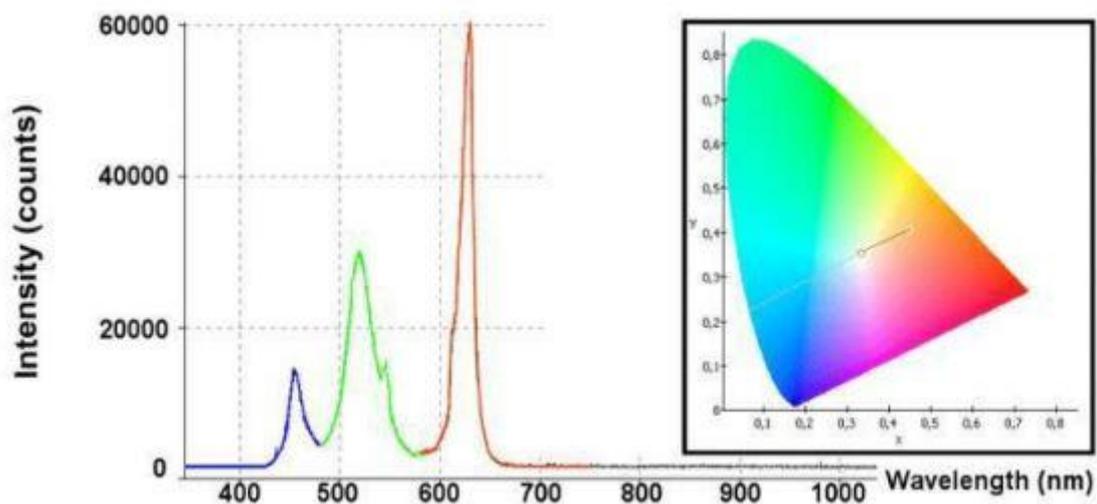


Figure I.9 : Variation de l'intensité lumineuse d'une RVB-LED en fonction de la longueur d'onde [10].

La répartition lumineuse d'une LED-RVB est illustrée à la Figure I-10.

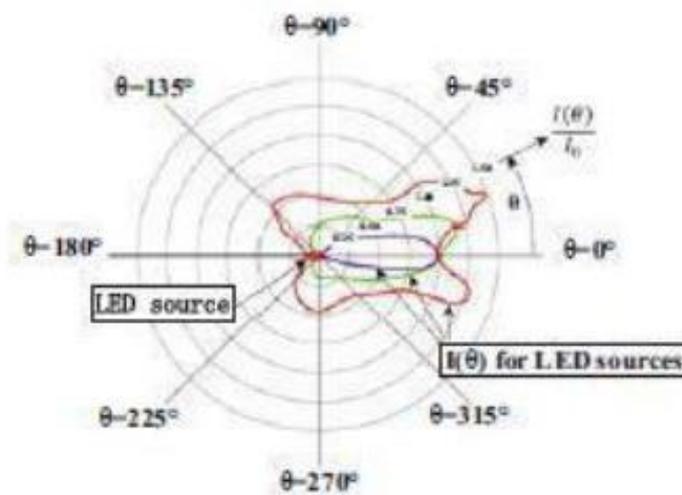


Figure I.10 : Répartition lumineuse d'une LED-RVB [10].

I.6 Architecture d'un système VLC

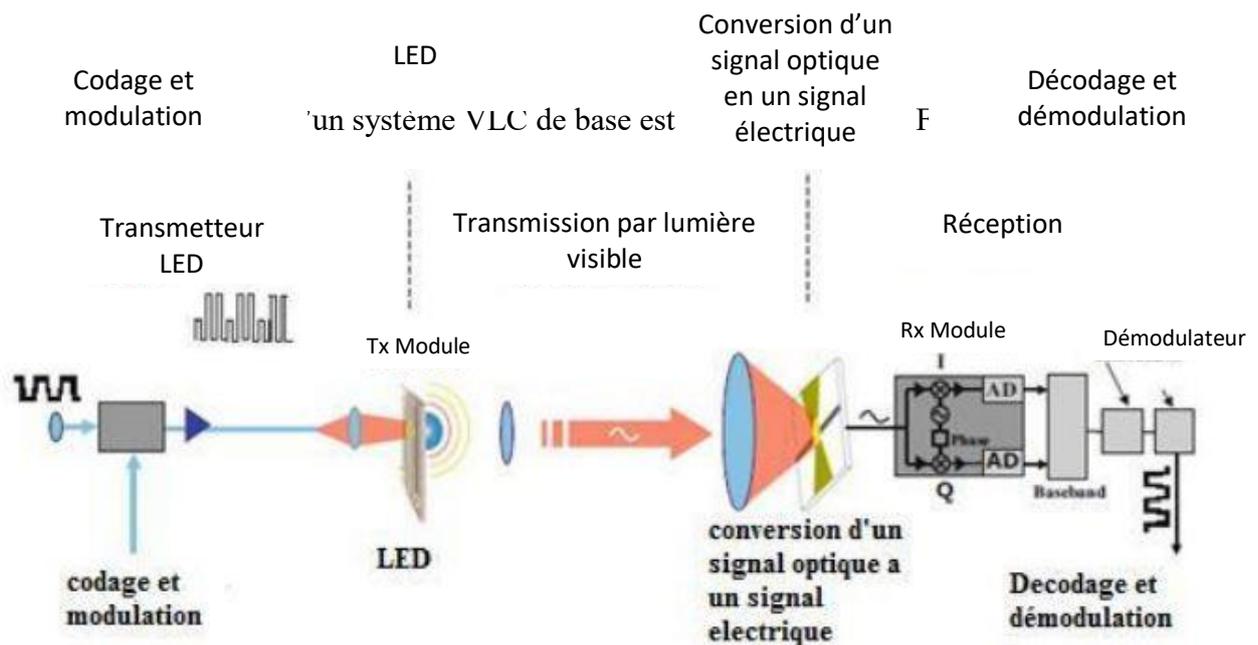


Figure I.11 : La composition d'un canal VLC [3].

I.6.1 Emetteur VLC

Un émetteur VLC est un dispositif transducteur électro-optique qui transmet des informations en utilisant des ondes lumineuses visibles sur un support de transmission sans fil. [15].

L'émetteur est constitué d'un convertisseur numérique-analogique (DAC, de la digitale à l'analogique convertisseur) qui prend en charge la modulation des bits de l'information et les convertit en un signal de courant analogique, d'un amplificateur à transconductance (TCA, Transconductance Amplifier), de filtre passe-bas (LPF, filtre passe bas) et de LED à haute vitesse [16].

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 [17].

I.6.2 Récepteur VLC

Au niveau du récepteur, la photodiode convertit la puissance optique reçue en un signal électrique, qui est ensuite amplifié, démodulé et décodé par un amplificateur Trans-impédance (TIA, Trans-impédance Amplifier), suivi d'un filtre passe-bas. Un convertisseur analogique/numérique (ADC, Analog to Digital Converter) est utilisé pour transformer le signal du courant analogique en un signal numérique afin de récupérer les bits du message de l'utilisateur [16].

1.7 Avantages et inconvénients du VLC

Le VLC est livré avec les avantages de la lumière visible à savoir : large bande passante gratuite avec un taux de données élevés, spectre sans licence, et la sécurité pour le corps humain et pour les équipements électroniques de haute précision. VLC est également considéré comme plus sûr que RF et la transmission de données est disponible, en plus de la fonction d'éclairage. Outre ces avantages, VLC est une technologie à faible coût et est facile à mettre en œuvre [18].

On note en particulier les points suivants :

- **Bande passante élevée**

Les communications RF viennent avec un spectre disponible de 300 Giga HZ, qui est utilisé pour différents types d'applications telles que : La radiodiffusion AM et FM, la radiodiffusion télévisuelle, les applications militaires, ou les communications par satellite. Dans ce cas, l'exploitation d'une certaine bande passante implique d'avoir une licence pour cela. Donc, il peut être déclaré que VLC vient avec une bande passante mondiale, sans licence et presque illimitée avec un taux de donnée multi Gb/s par rapport à RF, qui peut rarement fournir des taux de données supérieurs à 100 Mb/s [18].

- **Technologie sans restriction**

La communication RF peut causer des dysfonctionnements de l'équipement électronique de haute précision, comme celui trouvé dans les hôpitaux ou dans les avions contrairement au VLC en plus d'être sans risques pour le corps humain.

- **Sécurité**

Contrairement aux ondes RF, la lumière ne peut pas pénétrer à travers les murs, fournissant VLC avec sécurité contre l'écoute [18].

- **Mise en œuvre à faible coût**

Le tableau résume tous les avantages du VLC par rapport au RF et IR.

Tableau I.2 : Comparaison entre VLC, RF et IR [9].

	VLC	RF	IR
Bande passante	Sans licence 400 THZ	Réglementé limité <300 GHZ	400 THZ
Interférence Electromagnétique	NON	OUI	NON
Consommation d'énergie	Faible	Moyen	Faible
La mobilité	Limité	OUI	Limité
Les standards	802.15.7	Plusieurs	802.11
La couverture	Etroite	Large	Etroite
Risque pour la santé	BLH	Plusieurs	Thermique
Le cout D'implémentation	Bas	Bas-moyen	Moyen

L'inconvénient majeur est qu'il faut se trouver dans le rayonnement de la lumière ce qui signifie qu'en quittant une pièce branchée via LI-FI, on perd de connexion.

I-8 Applications du VLC

- **Localisation intérieure**

Le VLC peut fournir une localisation intérieure très efficace en se basant sur la détermination de l'intensité du signal reçu comme le montre Figure I.12.

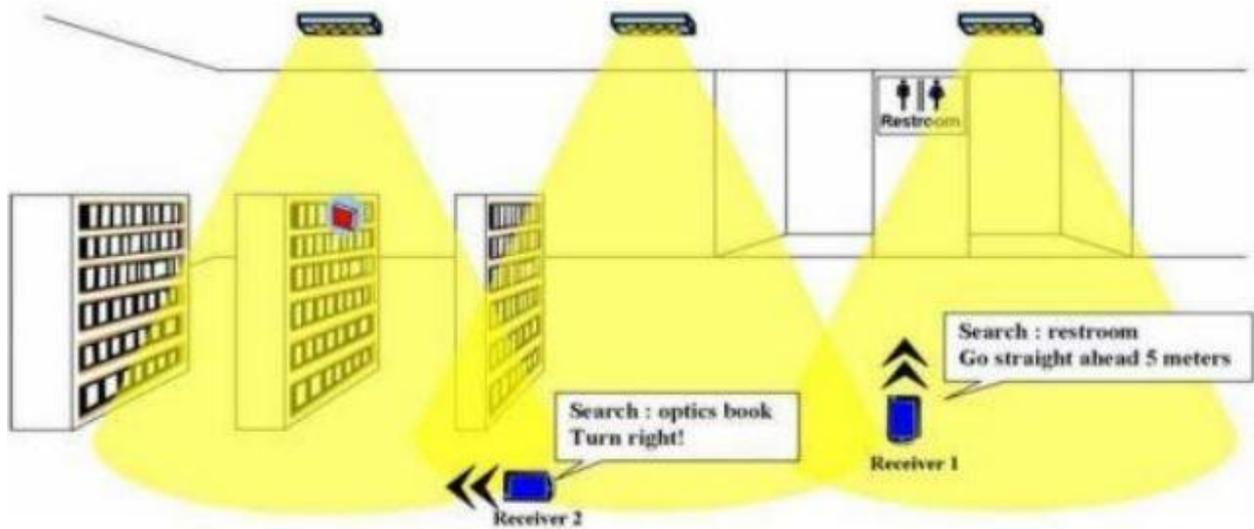


Figure I.12: Utilisation du VLC pour la localisation intérieure [19].

• Créer des lieux intelligents

Le VLC pourrait également être utilisé pour créer des endroits intelligents comme dans les musées, en fournissant des informations géo-localisées. De cette façon, l'information sur les expositions peut être fournie en utilisant la lumière intérieure. L'utilisation du VLC dans un musée est illustrée à la Figure I.13 [20].



Figure I.13: Utilisation du VLC dans un musée [18].

• Internet des objets

a. Définition des objets connectés à Internet

Selon l'Union internationale des télécommunications, l'Internet des objets (IDO) ou IOT pour « Internet Of Things » est une « infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer des services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution ». D'un point de vue technique, l'IDO consiste en l'identification numérique directe et normalisée (adresse IP, protocoles SMTP, http...) d'un objet physique grâce à un système de communication sans fil qui peut être une puce RFID, Bluetooth ou Wi-Fi ou LI-FI [21].

b. Applications prometteuses

• Ville Intelligente

Grace à l'internet des objets (IOT), les projets de villes intelligentes sont de plus en plus nombreux dans le monde. Désormais les grands projets urbains intègrent la notion de smart-city comme montré sur la Figure I.14 [17].

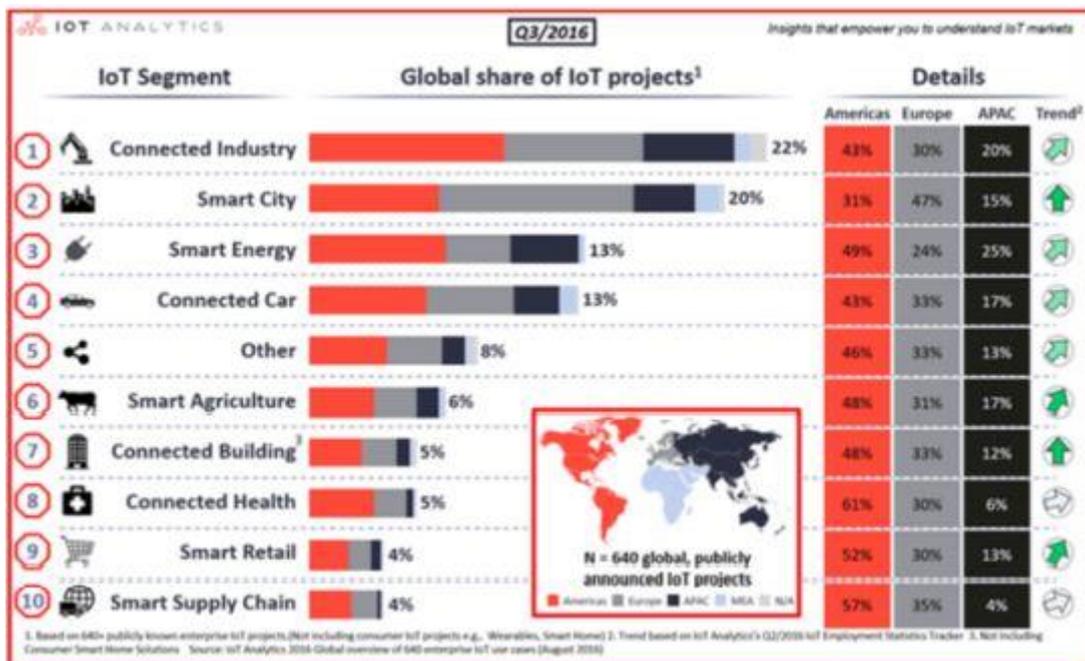


Figure I.14: Projet Smart City se classent au deuxième rang dans la liste des segments IoT pour les projets Internet des objets existants [22].

- **Grille intelligente :**

La grille intelligente est un réseau de distribution d'électricité qui favorise la circulation d'information entre les fournisseurs et les consommateurs afin d'ajuster le flux d'électricité en temps réel [23] (voir Figure I.15).

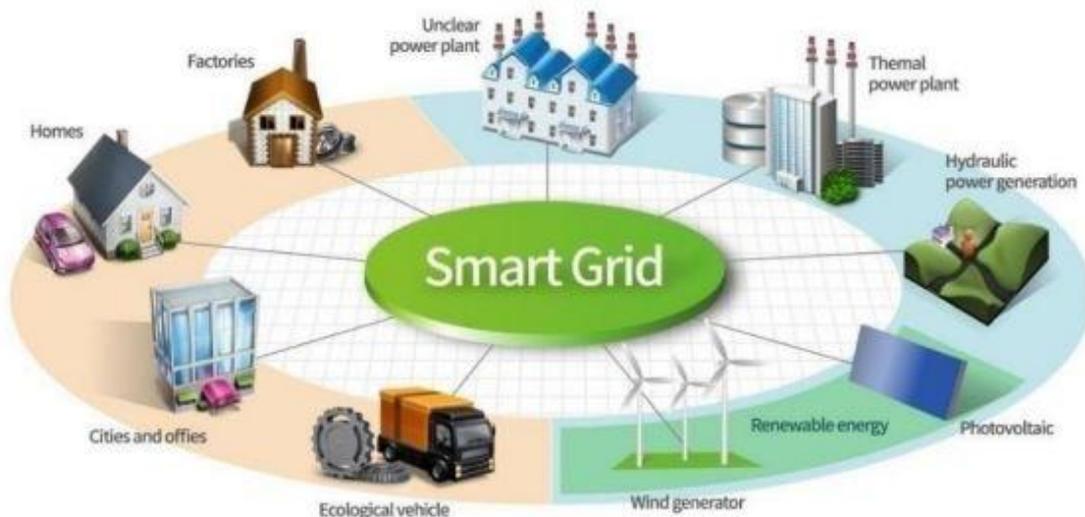


Figure I.15: Exemple d'une grille intelligente [24].

- **Transports intelligents**

Les systèmes de transport intelligents (STI) sont les applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication au domaine des transports. L'objectif principal est d'améliorer la performance opérationnelle, en surveillant de manière proactive les infrastructures critiques et créer des processus plus efficaces, pour réduire les coûts d'exploitation [24].

- **Internet des objets pour les soins de santé**

L'application complète de l'IOT dans le domaine des soins de santé est un espoir mutuel car elle permet aux centres médicaux de fonctionner de manière plus compétente et aux patients (voir Figure I.16).



Figure I.16: Objets médicaux connecté à internet [25]

Avec l'utilisation de cette méthode de soins de santé basée sur la technologie, il y a des avantages inégalés qui pourraient améliorer la qualité et l'efficacité des traitements et en conséquence améliorer la santé des patients [25].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé de la technologie (VLC) tout en citant ses avantages et ses domaines d'utilisation y compris l'IOT et ses applications très prometteuses. Nous avons bien appris les éléments constituant un système VLC qui a l'avantage majeur de permettre de bonnes performances techniques et énergétiques, de bandes passantes très larges et tout cela à un coût de déploiement plus bas.

C

HAPITRE II

**Etude des systèmes VLC et de
leurs applications pratiques**

II.1 Introduction

La communication par lumière visible (VLC) est une technologie qui repose sur l'utilisation des diodes électroluminescentes (LEDs) permettant d'établir des liaisons de communication optique sans fil (OWC).

Dans les VLC, les informations sont transmises en modulant le spectre de la lumière visible (380–750 nm) qui est utilisé pour l'éclairage et l'intensité de la lumière de la LED de telle sorte qu'elle est indétectable aux yeux humains. 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 en phase de développement afin d'arriver à un standard ou une norme Li-Fi.

Dans ce chapitre, nous fournissons un aperçu sur le VLC ainsi que comment et où cela peut être appliqué dans notre monde aujourd'hui et à l'avenir.

II.2. Description d'un system de communication bidirectionnelle par lumière visible

La Figure II.1 montre le schéma synoptique de base d'un système VLC bidirectionnel.

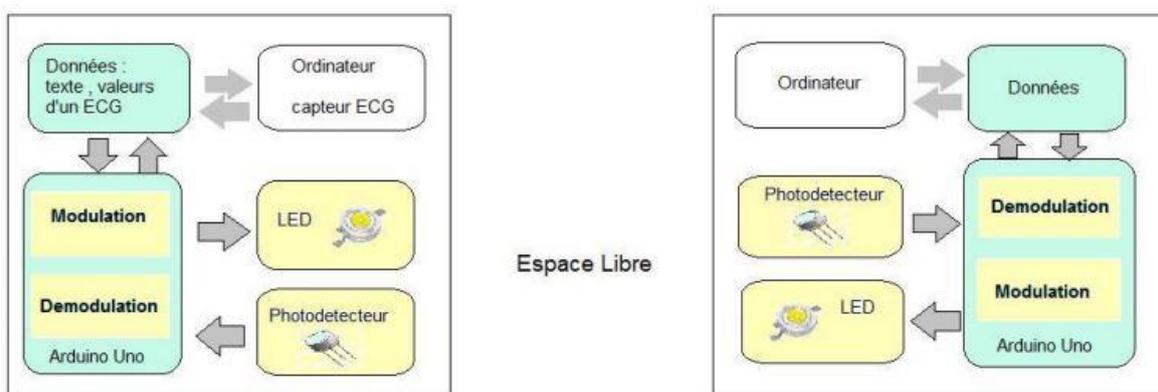


Figure II.1: Schéma synoptique d'un système VLC bidirectionnel [26].

Du côté d'émetteur, nous utilisons une LED éclairée qui garantit l'échange des informations avec un photo-détecteur RX également situé au centre du module pour recevoir le signal envoyé par la partie communicante à l'autre bout. Il s'agit alors de deux modules TX/RX dont le canal de propagation est bien évidemment l'espace libre. Les données (texte, images, son, vidéo, valeurs d'un capteur ECG médicale,) sont d'abord converties en binaire, codées et modulées puis envoyées par une source de lumière « LED » qui est contrôlée par un microcontrôleur ou un

ARDUINO UNO ou l'une de ses variantes. Après cela, la LED à éclairage élevé clignote à grande vitesse et transmet les données sous forme d'impulsions optiques par le canal sans fil.

Du côté récepteur, nous utilisons de même une seule LED comme émetteur pour le signal ascendant et un photo-détecteur pour recevoir le signal optique descendant. Les données binaires reçues seront d'abord démodulées puis décodées à la réception. En outre, nous ajoutons également des lentilles devant chaque TX et RX pour une meilleure focalisation de la lumière [27].

II .2.1 Communication entre la LED de faible puissance et la photodiode

La plus grande partie de la recherche sur la communication LED-à-photodiode vise à atteindre des hautes vitesses. Toutefois, il existe des cas d'utilisation où le débit de données n'est pas nécessaire. Cela est particulièrement vrai dans le contexte des objets connectés à internet. En fait, l'interaction avec des objets intelligents ou des capteurs de collecte ne nécessite que quelques bits [27].

II.3 Liaison optique dans un canal VLC

II.3.1 Liaison LOS directionnelle

L'émission est focalisée sur le trajet direct. Elle simplifie également l'utilisation des concentrateurs sur le récepteur grâce à la minimisation de la dépendance à l'angle de réception, et réduit le niveau de puissance du bruit optique reçu. Ce type de liaison ne souffre pas de la dispersion due aux multi-trajets car les contributions. Néanmoins, une liaison LOS (Line of Sight) directionnelle nécessite un alignement parfait entre l'émetteur et le récepteur. Cela représente un frein pour les applications avec des terminaux mobiles [28].

II.3.2 Liaison LOS non-directionnelle

C'est la raison pour laquelle l'établissement de la liaison ne requière pas un alignement parfait de l'émetteur avec le récepteur, permettant une utilisation dans des applications à terminaux mobiles ou dans des systèmes de diffusion point à multipoints. Cependant, une telle couverture est obtenue au détriment d'une efficacité énergétique réduite, et d'une sensibilité aux multi-trajets et aux bruits optiques du Canal Optique Sans Fil [28].

II.4 Définition et principe de fonctionnement

II.4.1 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. 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 [29].

II.4.2 Principe de fonctionnement

Parce que les LEDs sont des semi-conducteurs, elles ont la capacité de s'éteindre et de s'allumer avec des temps de l'ordre de 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.2).

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 [29].



Figure II .2 : Principe de fonctionnement des LEDs en tant qu'émettrices d'un signal binaire.

II.5 Architecture d'un système 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,

- 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 (Démodulation).

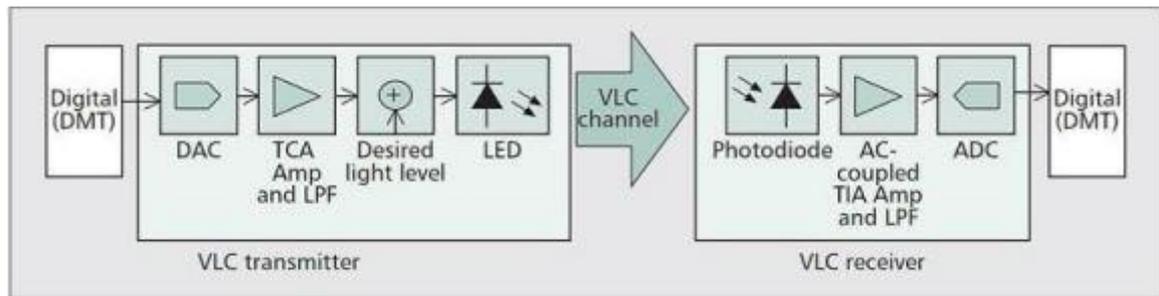


Figure II.3 : Schéma fonctionnel d'un système VLC [31].

II.5.1 L'émetteur VLC

Les paramètres de l'émetteur VLC sont principalement limités par les caractéristiques des LEDs. 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 [30]. 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 155 Mbps [31].

II.5.2 Le récepteur VLC

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 [29].

II.5.3 Les modulations associées aux communications VLC

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

II.5.3.1 La Modulation 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.

II.5.3.2 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 la Figure II.3). 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 [32] (voir Figure II.4).

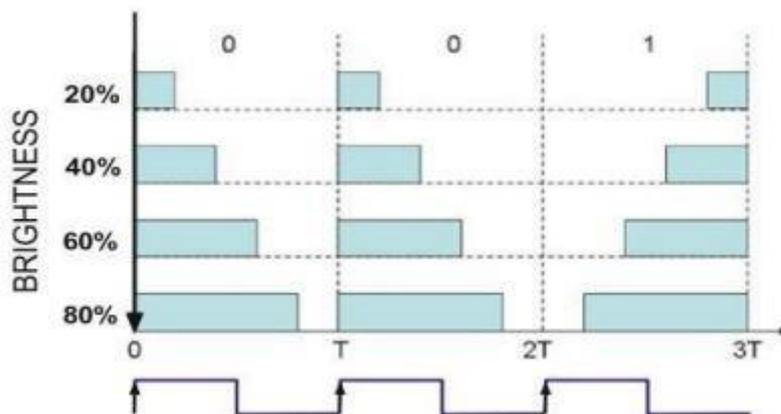


Figure II.4: Modulation VPPM [32].

II.5.3.3 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 [32].

II.5.3.4 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 (voir Figure II.5).

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. La Figure II.4 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 [31].

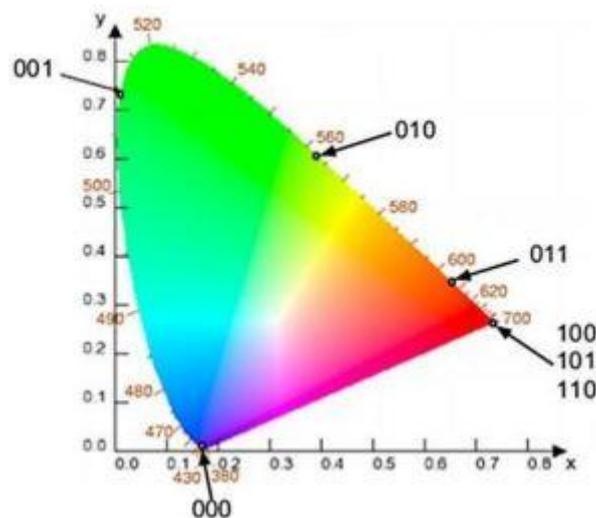


Figure II.5 :Modulation CSK [31].

Tableau II.1: Modulation CSK [31].

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)

II.6 Types de codage

II.6.1 Formats NRZ (Non-Return-to-Zéro)

La donnée binaire « 1 » est associée à une impulsion optique de durée sensiblement égale au temps symbole (inverse du débit), la donnée « 0 » à l'absence de signal.

En pratique on n'a pas une absence totale de signal puisque le taux d'extinction n'est jamais infini. Le codage NRZ (Figure II.6) est utilisé pour des débits inférieurs à 10 Gbits/s, utilisé dans beaucoup de systèmes WDM à 2,5 Gbit/s et exige un modulateur externe [33].

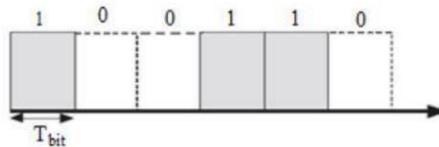


Figure II.6 : Format NRZ [33].

II.6.2 Format Manchester

Le codage Manchester, également appelé codage biphasé, introduit une transition au milieu de chaque intervalle, ce qui veut dire que la donnée « 1 » sera codé par un front Montant au milieu de La période d'horloge et la donnée « 0 » par un front descendant au Milieu de la période d'horloge.

En effet, il consiste à faire un « OU » exclusif (XOR) entre le Signal (la donnée) et le signal d'horloge. L'utilisation de ce codage supprime la composante Continue.

La Figure II.7 représente le codage d'une donnée (1 0 0 1 1 0) en format Manchester.[33]

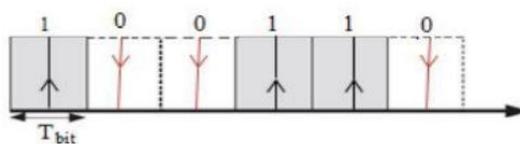


Figure II.7: Format Manchester [33].

II.7 Domaines d'applications

II.7.1 Environnements indoor

II.7.1.1 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, trilatération, 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 [34].

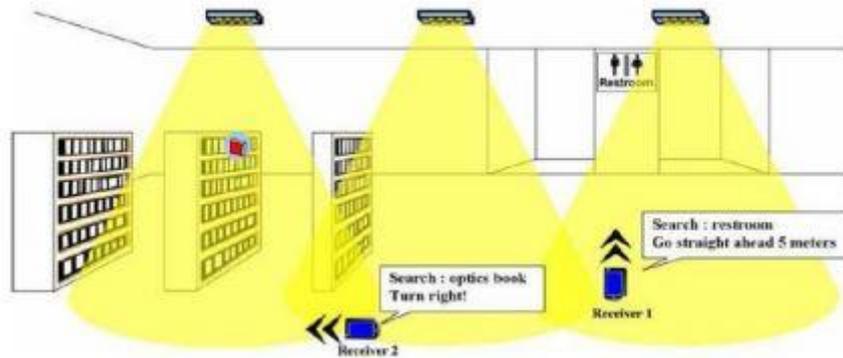


Figure II.8 : Utilisation de la VLC pour localisation indoor [34].

II.7.1.2 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 (Figure II.9). De plus, cela réduira les coûts de construction de l'avion et son poids [35].

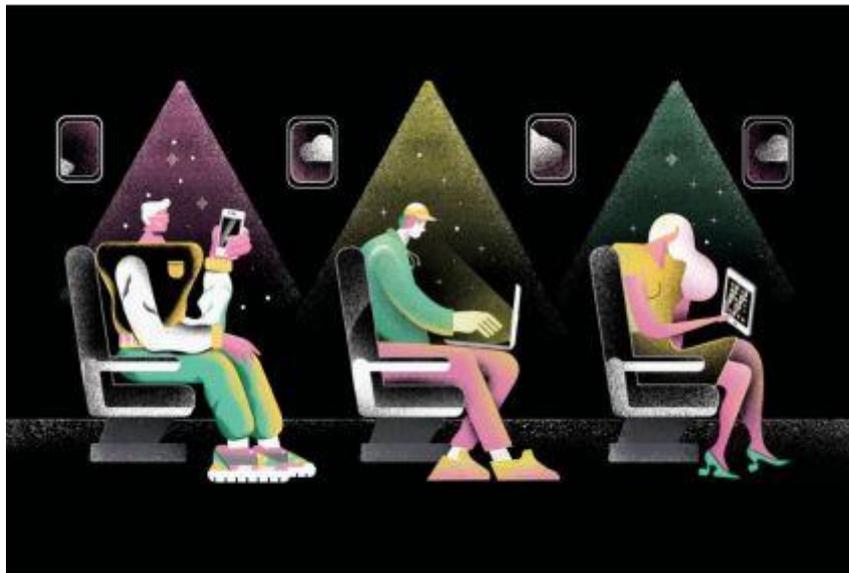


Figure II.9: Utilisation de la VLC dans l'avion [35].

II.7.1.3 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).



Figure II.10: Illustration des systèmes VLC appliqués au domaine médical [35].

II.7.1.4 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. La 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 [35].

II.7.2 Environnements 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.7.2.1 Communications sous-marines

La VLC peut prendre en charge des débits de données élevés sous l'eau (Figure II.11), là où d'autres technologies sans fil comme les RF ne fonctionnent pas. Ainsi, les communications entre les plongeurs ou les véhicules télécommandés sont possible [36].

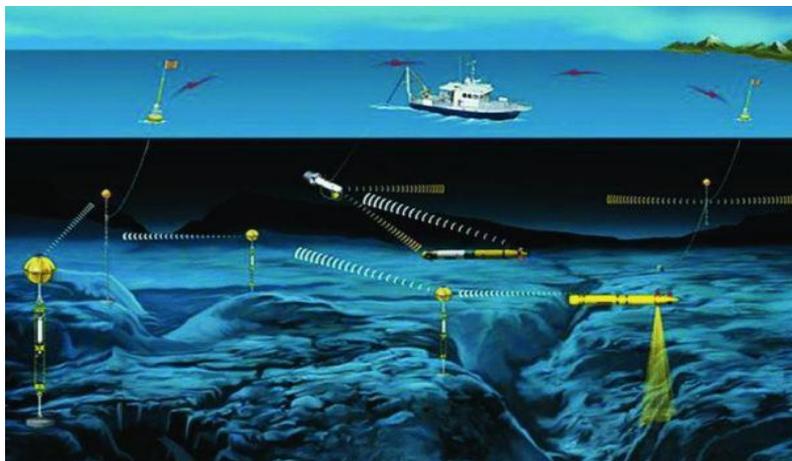


Figure II.11: Utilisation de VLC dans la communication sous-marine [36].

II.7.2.2 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. La Figure II.12 en montre un exemple [36].

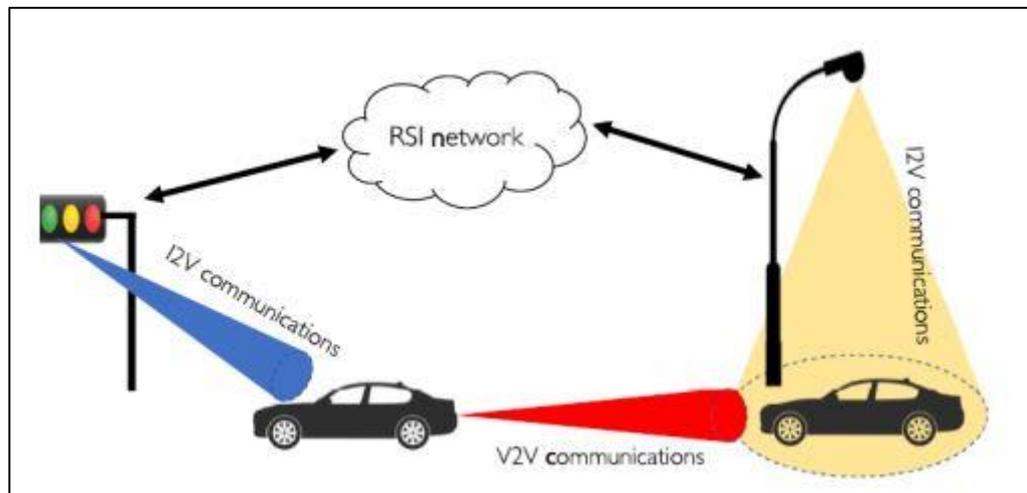


Figure II.12: Communication V2V ET I2V [36].

II.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté le principe de fonctionnement du VLC, ainsi que les caractéristiques d'un tel système de communication offrant une communication mobile, que ce soit en semi-duplex ou bidirectionnelle.

Le VLC pourrait se démarquer car il possède une double utilité, à savoir l'éclairage et la communication des données, deux secteurs porteurs, particulièrement celui des LEDs pour l'éclairage.

C

HAPITRE III

**Analyse structurelle et
algorithmique du système VLC
réalisé**

III.1 Introduction

Après avoir abordé les caractéristiques d'une communication Li-Fi au cours du chapitre précédent, la conception d'un tel système va être étudiée durant ce chapitre. Le but de ce projet est de créer un dispositif de communication pour permettre l'échange de données efficacement entre deux appareils. La communication sera donc en mode semi-duplex, une même personne pourra ainsi émettre et recevoir des données sans rien changer à la conception de son système

Actuellement, la portée de la communication sans fil dans le domaine médical est en augmentation. Il existe de nombreux dispositifs qui fonctionnent sur le Wi-Fi tels que les pompes à perfusion, ventilateurs pulmonaires, et machine d'anesthésie. Lorsqu'un médecin est censé utiliser des scanners d'imagerie par résonance magnétique ainsi que des pompes à perfusion, qui fonctionnent sur le Wi-Fi, il en résulte un problème de fréquence. Avec l'arrivée de nouveaux appareils médicaux sans fil, l'utilisation du spectre des radiofréquences (RF) augmente ce qui entraîne une interférence électromagnétique (EMI) qui entraîne à son tour des événements potentiellement dangereux liés aux opérations de l'équipement médical [3].

Une autre limitation du Wi-Fi dans le système hospitalier est que les renseignements sur les patients doivent être privés et sécurisés, mais demeurent accessibles aux personnes autorisées. Les hôpitaux sont des endroits où la sensibilité aux EMI et la sécurité des détails médicaux sont des problèmes avec les utilisations du Wi-Fi. Pour lutter contre ces limitations, le VLC est un remède à utiliser.

Le but de ce projet est de créer un dispositif de communication pour permettre l'échange de données en instantané, efficacement entre un appareil médical ; en occurrence l'ECG, et un autre appareil (smartphone ou un PC). La finalité est de surveiller et contrôler la santé d'un patient dans un hôpital. La communication sera donc en bidirectionnelle via lumière visible une même personne pourra ainsi émettre et recevoir des données sans rien changer à la conception de son système. Cependant, nous avons limité notre présente conception à des communications semi-duplex avec la possibilité de poursuivre le développement de ce projet afin de réaliser des transmissions bidirectionnelles.

Ainsi, on présente dans ce chapitre l'analyse structurelle et algorithmique du système VLC réalisé en présentant les résultats et les discussions associées.

III.2 Analyse structurelle du projet réalisé

Les systèmes de transmission numériques véhiculent l'information entre l'émetteur et le récepteur via un support tel que les câbles, la fibre optique, les ondes électromagnétiques...etc. Pour une communication VLC, le support de transmission est la lumière. Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique de base est représenté à la Figure III.1. L'émetteur est constitué d'une source qui génère le message à transmettre qui est ensuite codé et modulé pour permettre sa transmission dans le canal optique. Au niveau de la réception, ce signal sera démodulé et décodé par le destinataire comme on a déjà vu dans le Chapitre II. Il en est de même pour une communication bidirectionnelle. Pour mener à bien ce projet, le système présenté par la Figure III.1 a été mis en place. La LED servira à envoyer le signal qui sera réceptionnée par un photo-détecteur. Le contrôle du processus émission/réception se fait par deux microcontrôleurs Arduino UNO placés de part et d'autre du canal optique.

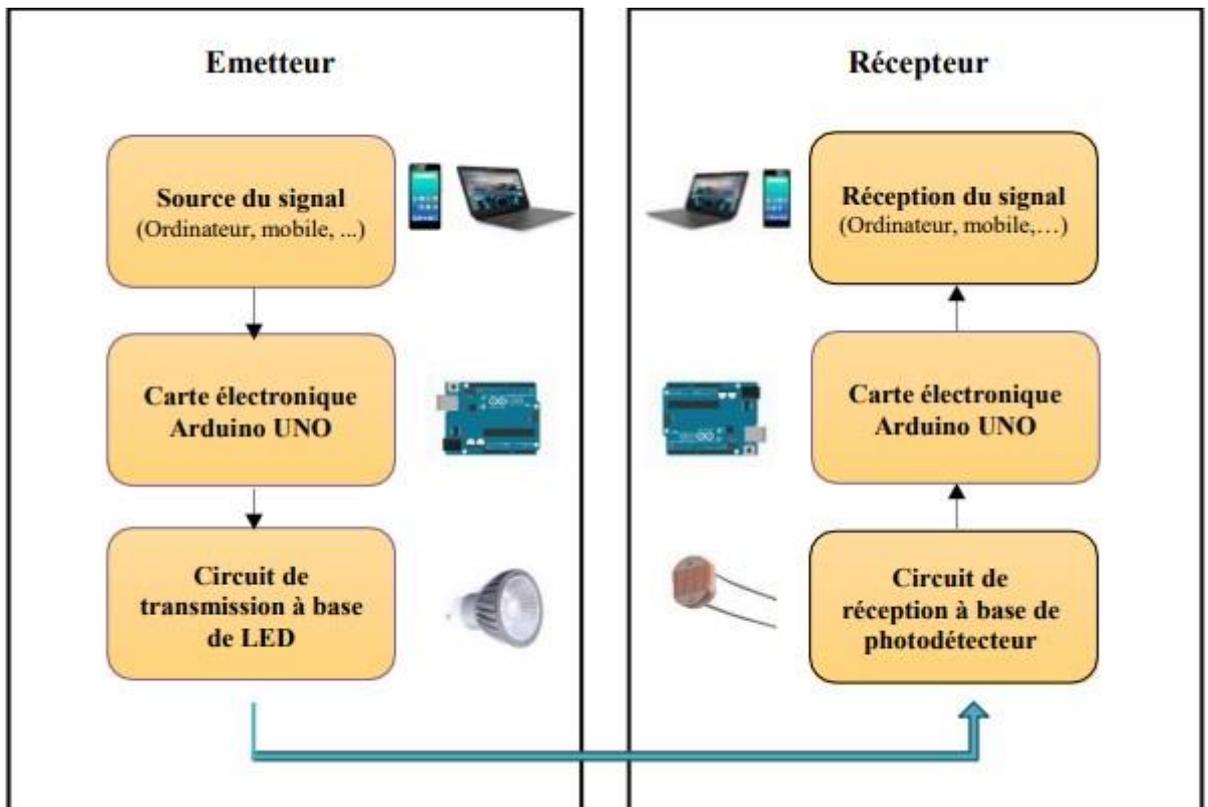


Figure III.1. Schéma synoptique du système de communication semi-duplex via lumière visible réalisé[37].

III.3 Présentation de l'environnement de travail

Le travail a été effectué à l'aide d'un ensemble de composants indispensables au bon fonctionnement du système de communication via lumière visible réalisé.

III.3.1 Arduino UNO :

L'Arduino est une plateforme de prototypage électronique open-source, basée d'une part sur du matériel et d'autre part sur un ensemble de logiciel facile d'utilisation. Les cartes Arduino peuvent lire des entrées (lumière sur un capteur, doigt sur un bouton...etc.) et en faire une sortie : Allumer une LED, commander un moteur à distance...etc. La caractéristique première d'une carte Arduino est le type de MCU (Microcontrôleur Unit) dont elle est équipée. Actuellement, et probablement pour encore longtemps, deux familles de microcontrôleurs sont employées : Des AVR 8 bits de la société ATMEL et des ARM 32 bits de la série Cortex-M, conçus par la société Advanced RISC Machines et fabriqués par différents fondeurs, ATMEL pour les cartes officielles mais aussi Freescale ou ST Micro pour des cartes compatibles gravitant autour de la galaxie Arduino. Il existe plusieurs cartes Arduino dont les caractéristiques sont plus ou moins riches. La carte la plus utilisée est l'Arduino Uno. Il s'agit d'une carte équipée d'un microcontrôleur de la famille AVR 8 bits : l'ATMega328 [37] (voir Figure III.2).. Le Tableau III.1 résume les principales caractéristiques de cette carte .

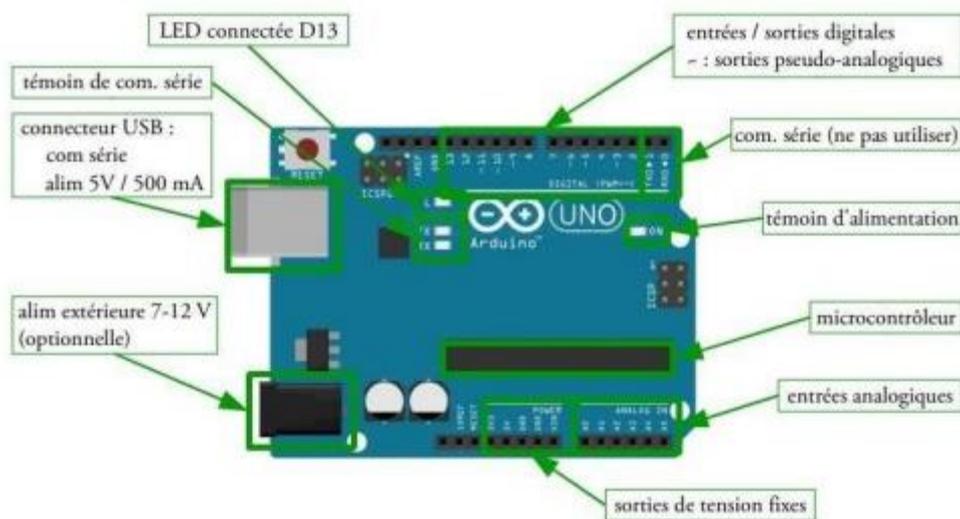


Figure III.2 : Anatomie d'une carte Arduino UNO [38].

La façon dont le microcontrôleur gère ses entrées/sorties est fixée par un programme contenu dans le microcontrôleur. Ce programme doit être écrit par l'utilisateur. En pratique, l'utilisateur écrit le programme en langage C, en utilisant un environnement de développement spécialisé appelé IDE (Integrated Développement Environnement) installé sur un ordinateur comme le montre son page d'accueil représentée sur la Figure III.3. Ce programme est ensuite compilé et téléversé dans le microcontrôleur par liaison série (USB). Le modèle de la carte Arduino ainsi que

le port série sur lequel elle est branchée doivent être déclarés dans le menu de l'IDE Outils/type de carte et Outils/port série. Une fois téléversé dans le microcontrôleur, le programme s'exécute. La fonction « setup » s'exécute une seule fois, la fonction « loop » s'exécute en boucle [38].

Tableau III.1 : Caractéristiques d'une carte Arduino UNO [39].

Microcontrôleur	ATmega328
Tension de fonctionnement	5v
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12v
Tension d'alimentation(limité)	6-20v
Broches E/S numérique	14(dont 6 disposent d'une sortie PWM)
Broches d'entrées analogiques	6(utilisables en broches E/S numérique)
Intensité maxi disponible par broche E/S(5v)	40mA (200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité maxi disponibilité pour la sortie 3.3v	50 Ma
Intensité maxi disponible pour la sortie 5v	Fonction de l'alimentation utilisée -500mA 600mA si port utilisé seul
Mémoire programme Flash	32 KB(ATmega328) dont 0.5KBsont utilisé par bootloader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	2KB(ATmega328)
Mémoire EEPROM (memoire non volatile)	1KB(ATmega328)
Vitesse d'horloge	16MHZ

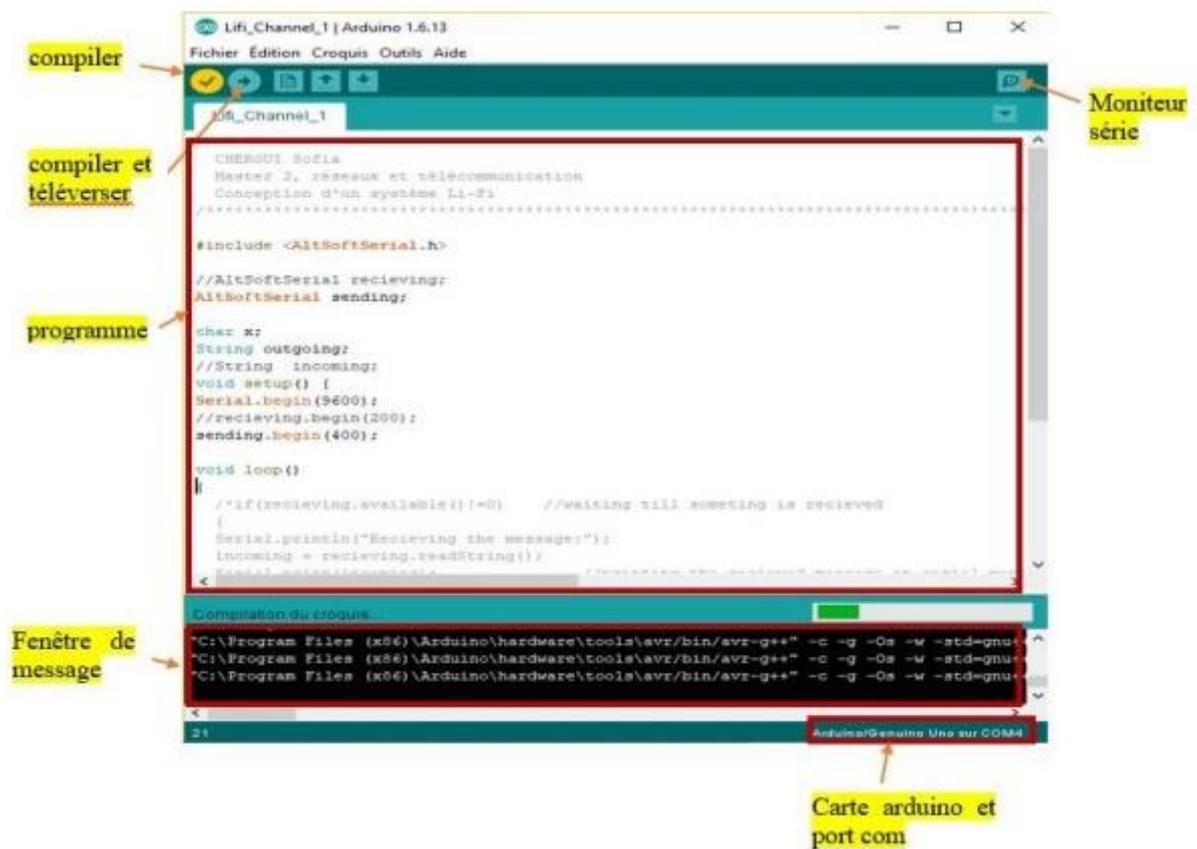


Figure III.3 : Présentation du logiciel Arduino IDE.

III.3.2 Module LED 3W

On a utilisé un Module LED 3W haute puissance pour l'émission (Figure III.4).



Figure III.4: Module LED 3W utilisé à l'émission.

Les caractéristiques du module LED 3W utilisé sont [40] :

- Température de couleur : blanc chaud 3000-3200K / blanc 6000-6500K
- Courant prévisionnel : 700MA
- Flux lumineux : Blanc 180-200LM (lumens)
- Rouge 90-100LM (lumens)
- Vert 80-90LM (lumens)
- Tension avant : 3,3 - 3,6 V
- Tension inverse : 5V - Puissance : 3W
- Angle de vision : 180°
- Température de travail : -20° à 60°
- Température de stockage : 20° à 60°

III.3.3 Photorésistance

Une photorésistance (Figure III.5) est un composant dont la valeur en ohms dépend de la lumière à laquelle elle est exposée. On la désigne aussi par LDR (Light Dependent Resistor). La principale utilisation de la photorésistance est la mesure de l'intensité lumineuse (appareil photo, systèmes de détection, de comptage et d'alarme...). Les matériaux utilisés dans les photorésistances sont généralement du sulfure ou du sélénure de cadmium qui se comporte comme des semi-conducteurs [40].



Figure III.5: La photorésistance LDR utilisée à la réception.

Il existe des modules LDR compatibles avec l'Arduino. Le module capteur LDR de la Figure III.6 génère une sortie 5V dans l'obscurité et 0V en pleine lumière. La sensibilité de la LDR peut être ajustée via un potentiomètre ajustable placé sur le module.

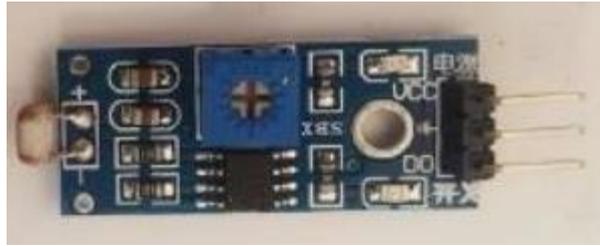


Figure III.6: Module LDR compatible avec Arduino.

III.3.4 Photodiode BPW34

La BPW34 est une photodiode PIN à grande vitesse et haute sensibilité radiante en miniature, plat, vue de dessus, plastique transparent. Elle est sensible au rayonnement visible et proche de l'infrarouge [41](voir Figure III.7).



Figure III.7: Photodiode BPW34 [41].

Les principales caractéristiques de la BPW34 sont [41]:

- Dimensions (L. x l. x H. en mm) : 5,4 x 4,3 x 3,2
- Zone sensible radiante (en mm²) : 7,5
- Grande sensibilité à la photo
- Grande sensibilité au rayonnement
- Convient au rayonnement visible et proche infrarouge
- Temps de réponse rapides
- Angle de demi-sensibilité : $\phi = 65^\circ$

III.4 Le capteur ECG (Electrocardiogramme)

III.4 .1 Qu'est-ce qu'un ECG ?

Un ECG est un enregistrement papier ou numérique des signaux électriques du cœur. Il est aussi appelé un électrocardiogramme. Il est utilisé pour déterminer la fréquence cardiaque, le rythme cardiaque et d'autres informations concernant l'état du cœur. Les ECG sont utilisés pour aider à diagnostiquer les arythmies cardiaques, les crises cardiaques, la fonction du stimulateur cardiaque et l'insuffisance cardiaque.



Figure III.8: La forme générale du graphe PQRST [542].

L'ECG peut être analysé en étudiant les composants de la forme d'onde. Ces composants de forme d'onde indiquent une activité électrique cardiaque. La première ascension du tracé ECG est l'onde P. Elle indique une contraction auriculaire [42].

Le complexe QRS commence par Q, une petite déviation vers le bas, suivie d'une plus grande déviation vers le haut, un pic (R) ; puis une onde S vers le bas (voir Figure III.8). Ce complexe QRS indique une dépolarisation et une contraction ventriculaires et pour finir l'onde T, qui est normalement une forme d'onde ascendante plus petite, représentant une polarisation ventriculaire [42]. Les Figures III.9-III.10 montrent les résultats graphiques des ondes PQRST mesurées par le capteur ECG AD8232 en indiquant l'effet de la diminution de la vitesse de transmission série par moitié sur la qualité des tracés.

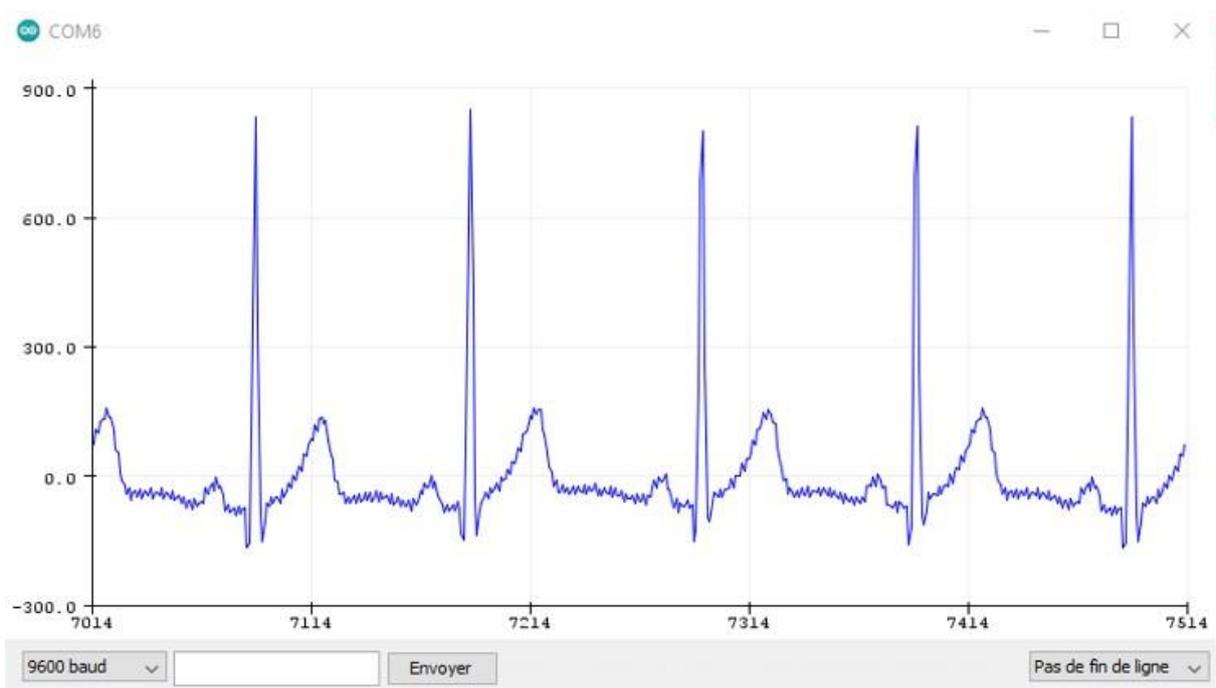


Figure III.9 : Le tracé PQRST mesuré par le capteur ECG AD8232 (vitesse de transmission série=9600 baud).

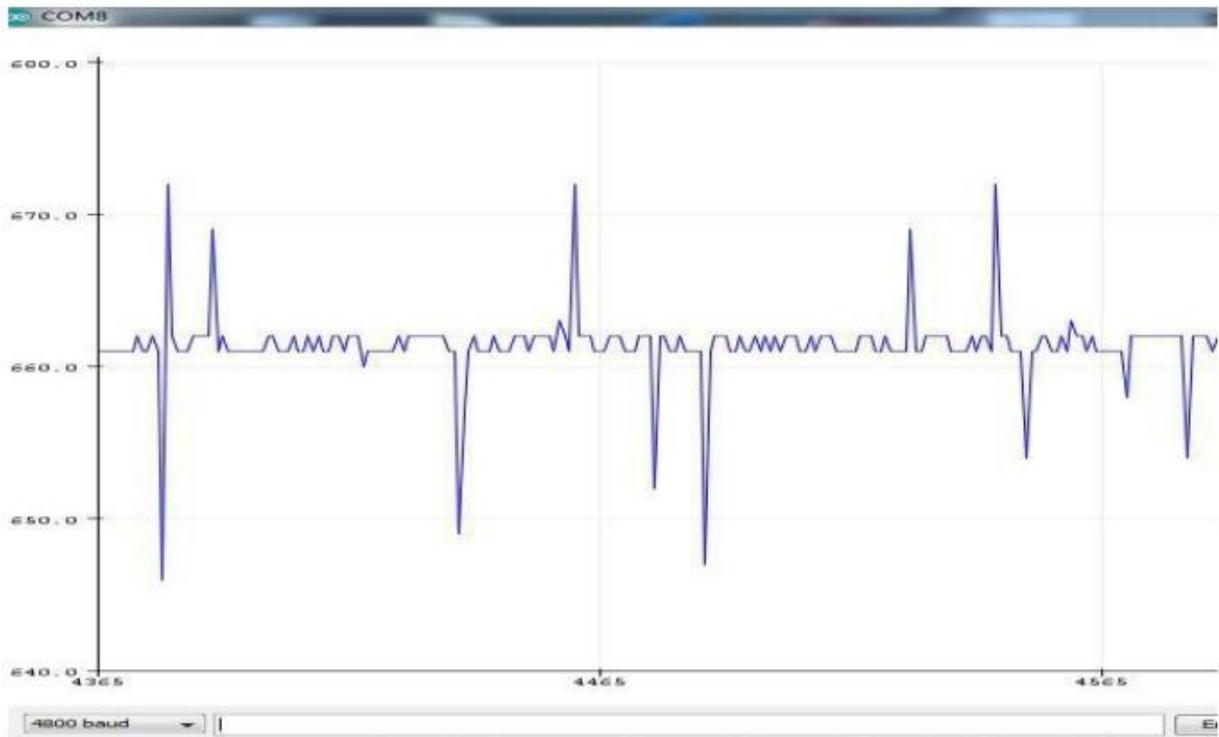


Figure III.10 : Le tracé PQRST mesuré par le capteur ECG AD8232 (vitesse de transmission série=4800 baud).

III.4 .2 Capteur ECG AD8232

Ce capteur est une carte économique utilisée pour mesurer l'activité électrique du cœur. Cette activité électrique peut être représentée sous forme d'électrocardiogramme à la sortie sous forme de lecture analogique (Figure III.11) . Les ECG peuvent être extrêmement bruyants, le moniteur de fréquence cardiaque à une seule sonde AD8232 agit comme un amplificateur opérationnel pour aider à obtenir facilement un signal clair des intervalles PR et QT (Annexe A) [42].

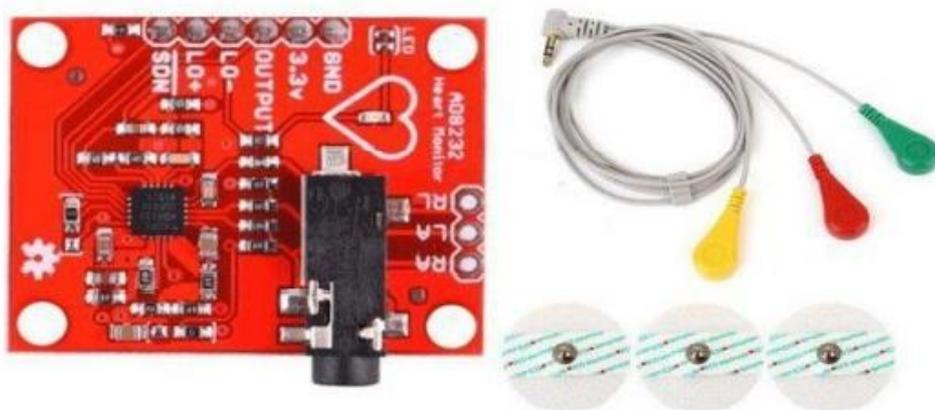


Figure III.11: Le capteur ECG AD8232 [42].

III.4 .3 Emplacement du capteur ECG AD8232 sur le corps

Il est recommandé d'enclencher les coussinets des capteurs sur les fils avant l'application sur le corps (Figure III.12). Plus les électrodes ne sont proches du cœur, la mesure est meilleure. Les câbles sont codés par couleur pour aider à identifier le placement approprié [42].

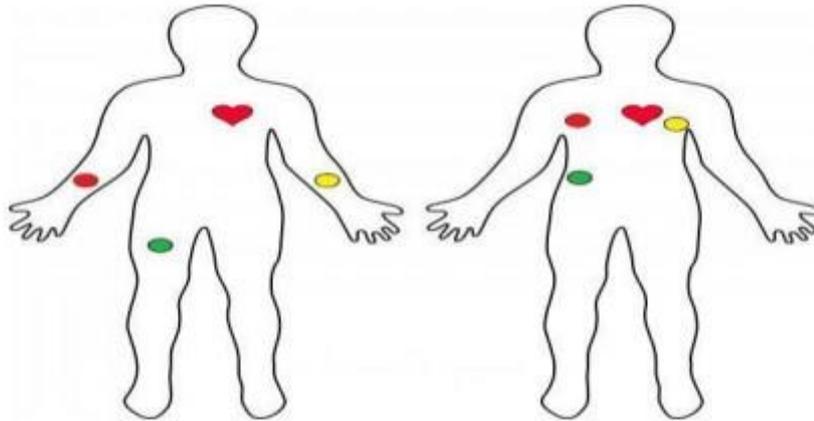


Figure III.12: Présente l'emplacement des électrodes d'un ECG sur le corps humain [42]

Rouge : RA (bras droit)

Jaune : LA (bras gauche)

Vert : RL (jambe droite)

Une fois que les électrodes d'ECG sont bien placées sur le corps humain, l'AD8232 doit être relié avec la carte Arduino comme indiqué sur la Figure III.14.



Figure III.13 : Connexion de l'Arduino avec le capteur ECG AD8232.

III.5 Implémentation

Les réseaux VLC peuvent être utilisés comme système entièrement automatisé. Normalement, les médecins et les infirmières devraient surveiller périodiquement l'état de santé du patient en mesurant la fréquence cardiaque. Dans cette méthode proposée, les mesures sont effectuées sans intervention humaine et diverses statistiques de patients sont également enregistrées (système de surveillance de la santé en temps réel).

Chaque patient est muni d'une étiquette pour l'identification et l'étude de ses médicaments antérieurs, ce qui peut être utile s'il est transféré dans un autre hôpital ou médicamenté par d'autres techniciens. Sur la base de l'architecture proposée dans le chapitre précédent, un modèle prototype est construit pour tester le concept de VLC dans le domaine médical.

III.5.1 Section de l'émetteur

La tâche de l'émetteur est de convertir les données numériques en lumière visible. Un composant approprié en raison de sa relation relativement linéaire entre le courant et l'intensité lumineuse, l'idée générale est de moduler l'intensité lumineuse de la LED c.-à-d. que l'intensité de la lumière correspond au symbole transmis. La section de l'émetteur contient une alimentation en courant continu (CC) pour alimenter 5V CC. Le capteur ECG est connecté à la carte Arduino. Le signal est transmis par l'émetteur VLC, et la source de transmission est la LED. La fréquence de commutation de la LED doit être assez élevée pour éviter tout clignotement qui pourrait compromettre la sécurité des yeux humains.

D'autre part, le capteur médicale ECG, envoie les données mesurées a la plateforme « ThingSpeak » ; qui elle, nous permet de connecté nos appareils à l'internet c'est ainsi que l'ECG affiche le graphe de l'état cardiaque du patient en temps réel.

Pour arriver à connectée le capteur ECG a ce site, un module node MCU « ESP8266 » (Annexe B) doit être relié avec la carte Arduino connecté avec le capteur ECG, dont le but d'afficher les données du client sur une page web. (Figure III.14) (L'information est disponible sur la référence [43].)

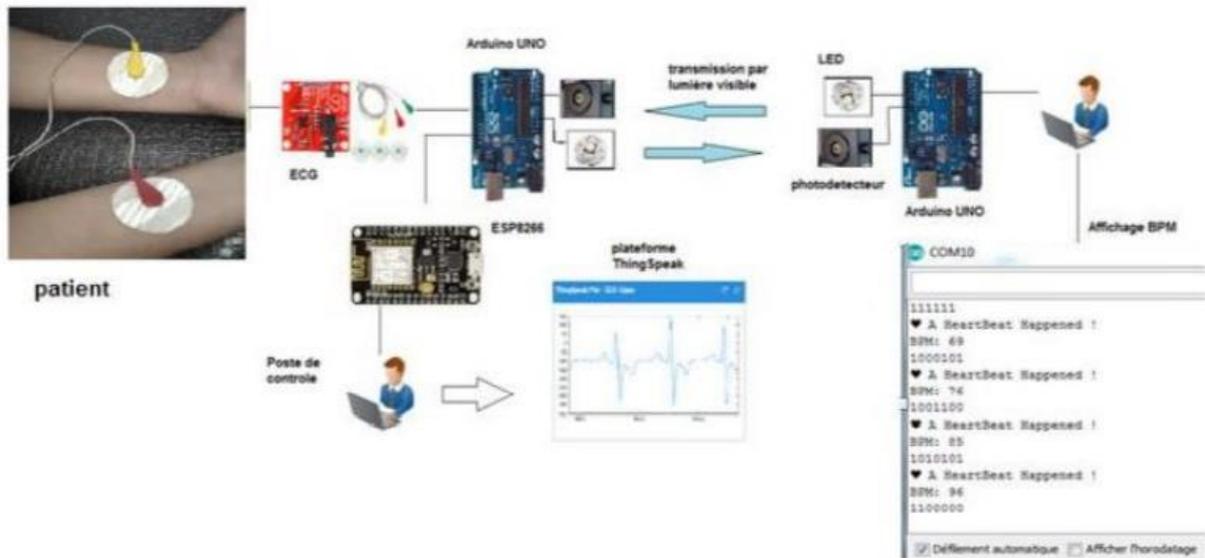


Figure III.14 : Schéma synoptique d'une communication VLC avec un ECG connecté à internet

La Figure III.15 ci-dessous présente la section de l'émetteur.

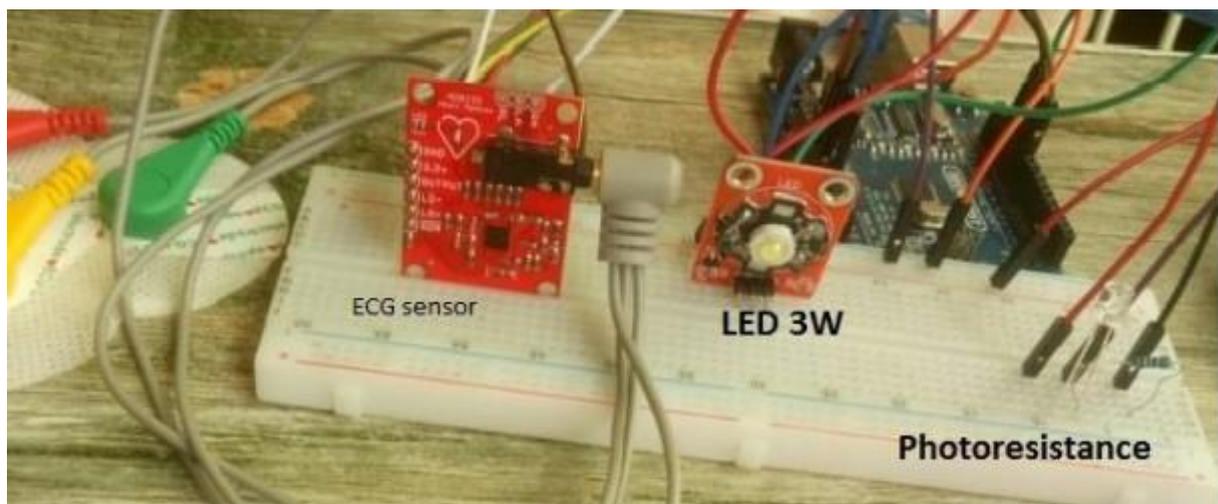


Figure III.15 : Représentation de la section de l'émetteur

III.5 .2 Section du récepteur

Les informations reçues peuvent être représentées sous forme de valeurs BPM (battements par minutes), pour diagnostiquer la santé du patient en connectant l'extrémité du récepteur à l'ordinateur. Le rapport de santé du patient peut être envoyé automatiquement à la personne concernée sans aucune intervention humaine via Internet. La Figure III.16 présente la section du récepteur tandis que la Figure III.17 présente une vue d'ensemble du système VLC semi-duplex réalisé pour des applications biomédicales.

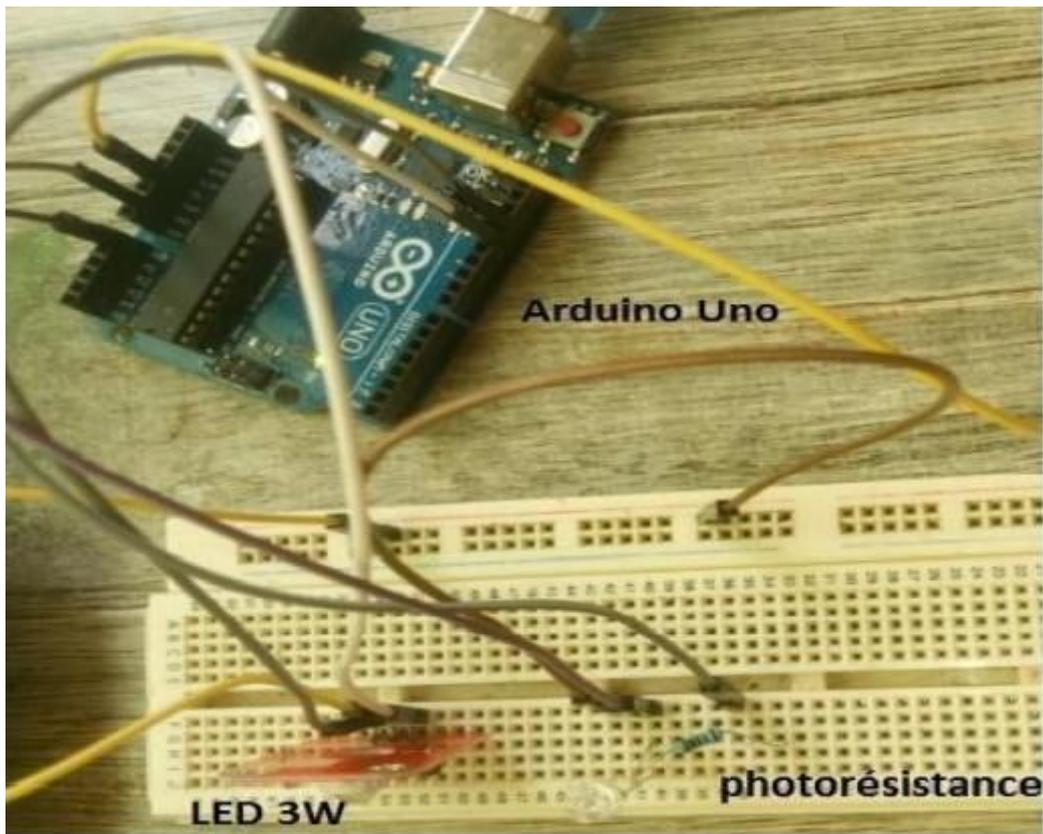


Figure III.16: Représentation de la section du récepteur.

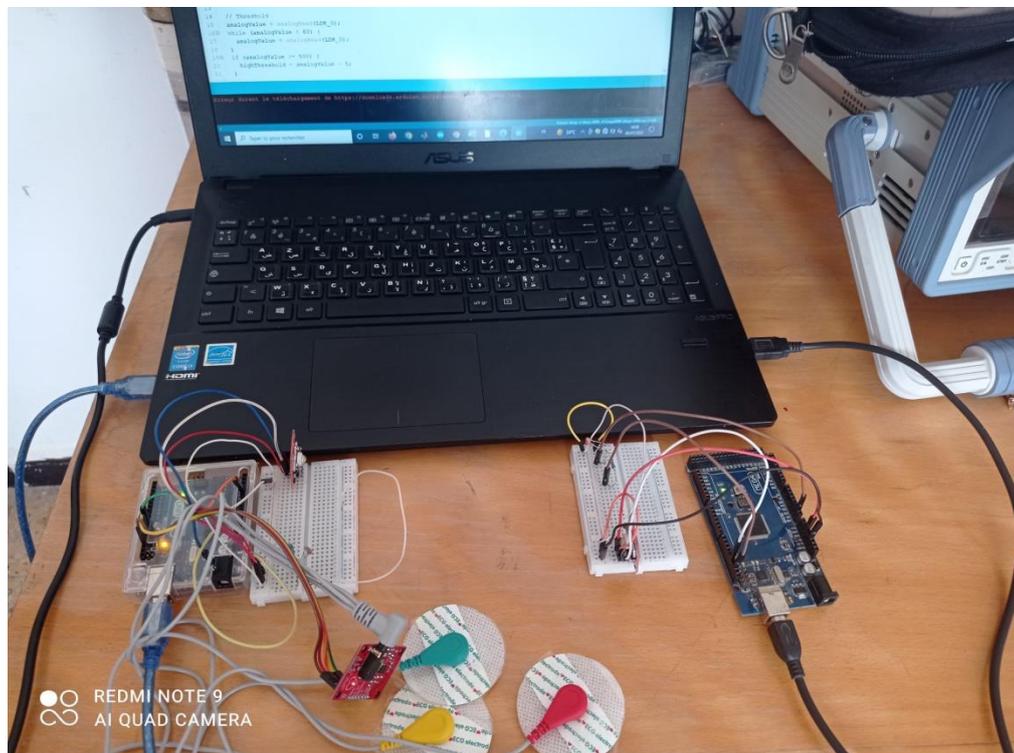
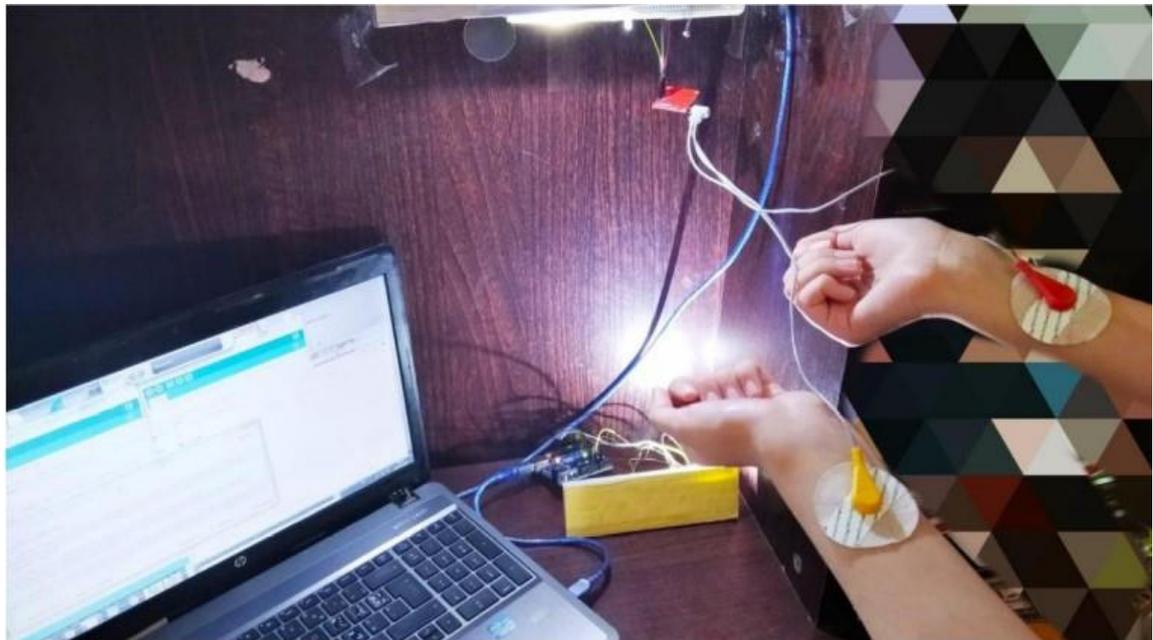


Figure III.17 : Vue d'ensemble du système VLC semi-duplex réalisé contenant un Arduino, un émetteur module LED 3W, et un récepteur de type photorésistance LDR de part et d'autre des deux entités communicantes.

La Figure III.18 présente quelques tests pratiques effectués sur le système VLC conçu.



(a)



(b)

Figure III.18 : Communication entre la section de l'émetteur contenant le capteur ECG AD8232 et la section de récepteur. (a) Installation des composants du système et (b) Le test final

III.5.3 Analyse algorithmique du système VLC réalisé : L'organigramme (Figure III.19)

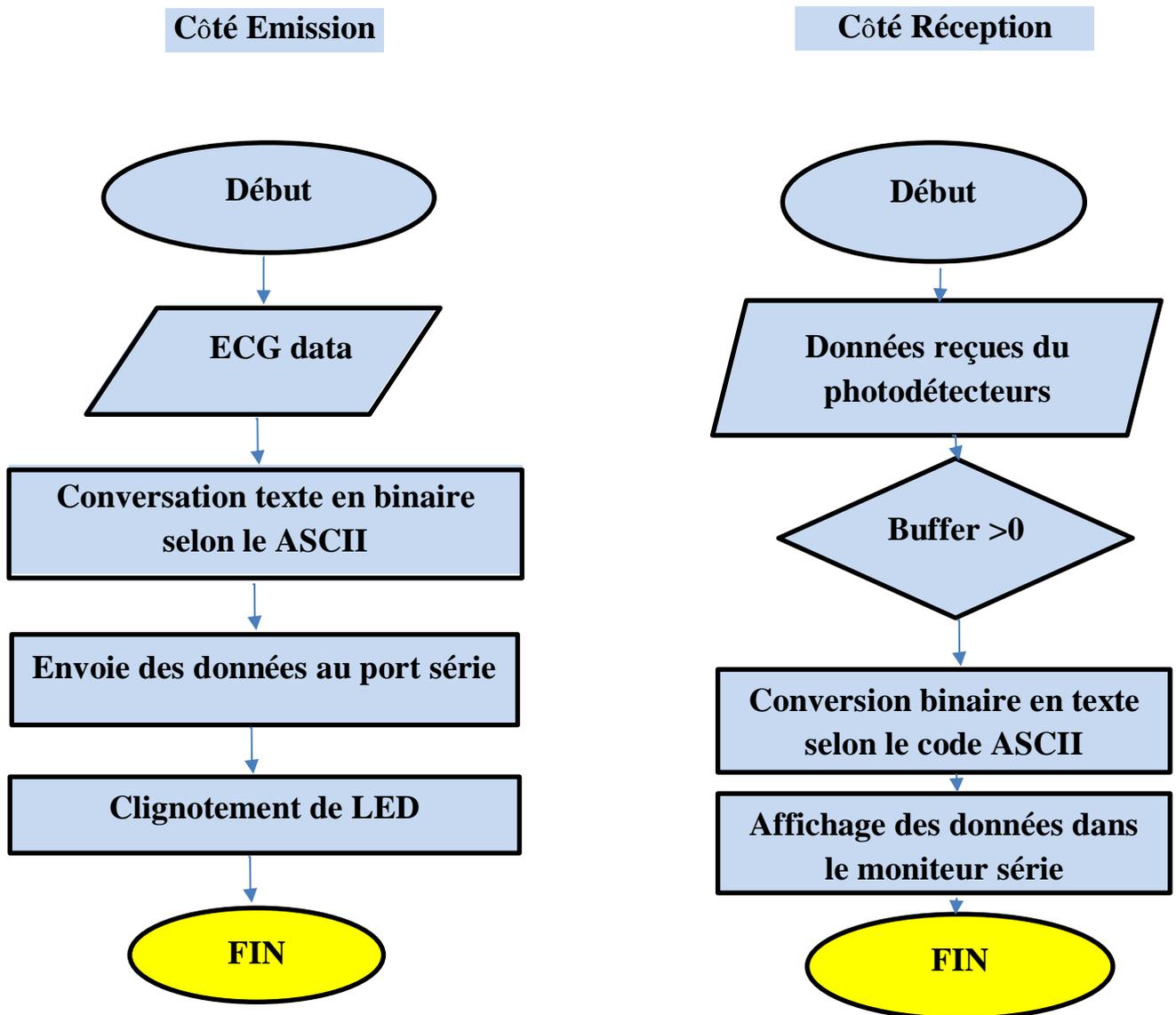


Figure III.19 : L'organigramme expliquant les étapes de l'émission et de la réception d'un point de vue algorithmique comme implémentées sur les deux Arduinos.

Ce programme permet d'envoyer des données entre deux PC via une communication VLC à l'aide de deux cartes Arduino Uno. Chaque carte Arduino est connectée à un PC via les ports COM. Du côté de l'émetteur, une fois le programme compilé et chargé sur la carte, les valeurs captées par l'ECG sont affichées sur le moniteur série d'Arduino. Ces données sont traitées dans le microprocesseur ATMEGA 328, présent dans la carte Arduino Uno. Les données traitées

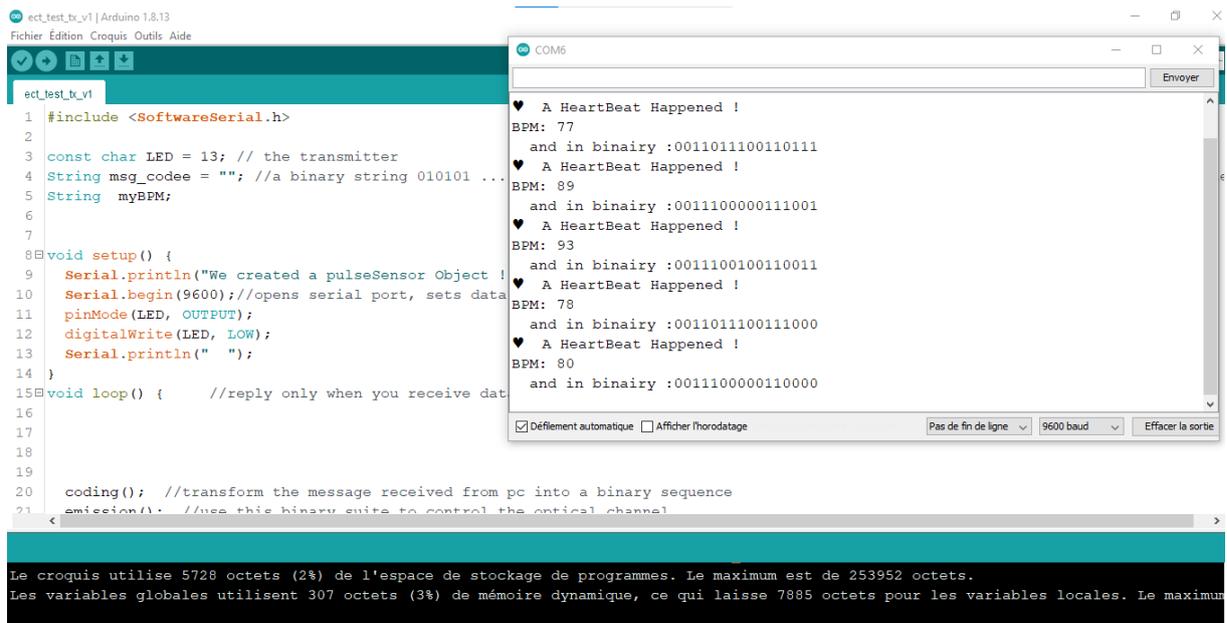


Figure III.21 : Emission des données BPC d’un ECG par le VLC.

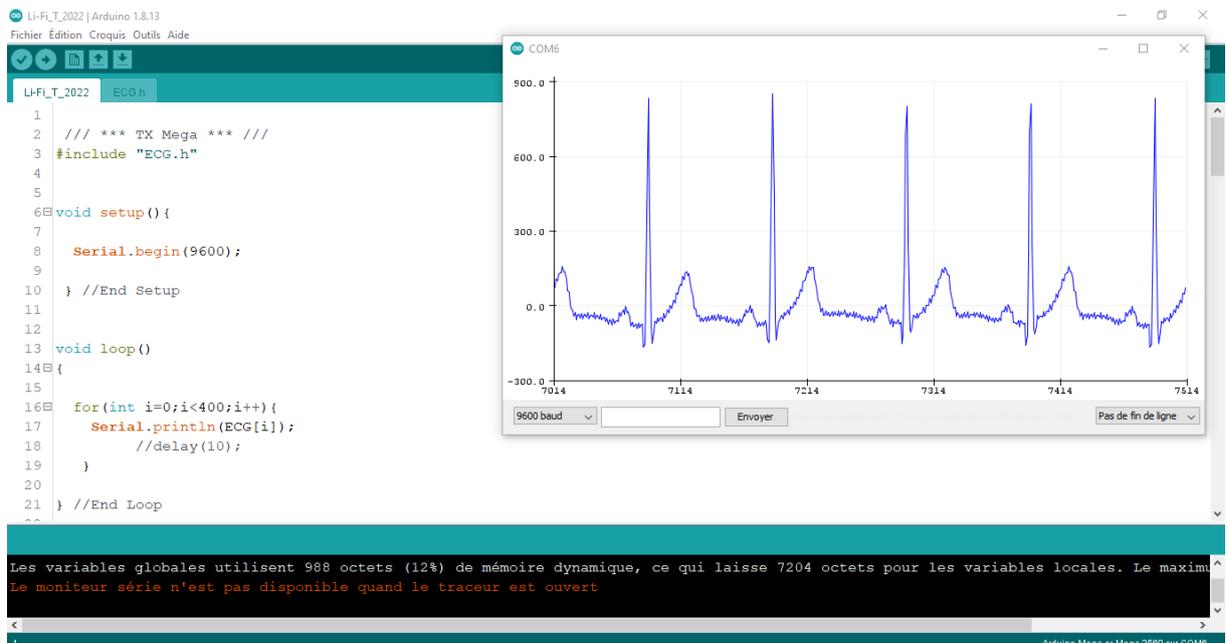


Figure III.22: Emission des données d’un ECG par le VLC (le signal PQRSTU).

Les valeurs d’ECG sont bien transmises de l’émetteur vers le récepteur avec un délai de retard dû à la limitation et la qualité du matériel utilisé.

III.6.2 Codage

Le code ASCII, pour « American Standard Code for Information Interchange » est l'un des plus anciens codes utilisés pour représenter du texte en informatique. Il se base sur un tableau contenant les caractères les plus utilisés en langue anglaise. Il définit 128 caractères numérotés de 0 à 127 et codés en binaire sur 7 bits de 0000000 à 1111111. Le tableau ASCII étendu comprend

d'autres caractères en dehors des lettres tels que les symboles et les caractères spéciaux (Annexe C).

III.6.3 Modulation

La modulation On-Off Keying (OOK), est la méthode la plus simple pour représenter des données. La valeur logique « 0 » correspond à LOW et la valeur logique « 1 » à HIGH. Dans le cas VLC, cela signifie que la LED est éteinte pour transmettre un zéro et allumée pour transmettre un.

III.7 Résultats pratiques

III.7.1 Résultats de transmission avec différents photo-détecteurs

Pour tester la fiabilité du système, différents tests ont été effectués en modifiant la distance et le débit de transmission. Ces tests ont été réalisés avec différents photo-détecteurs pour percevoir quel composant électronique a une plus grande sensibilité et un meilleur temps de réponse et le plus adapté à ce projet.

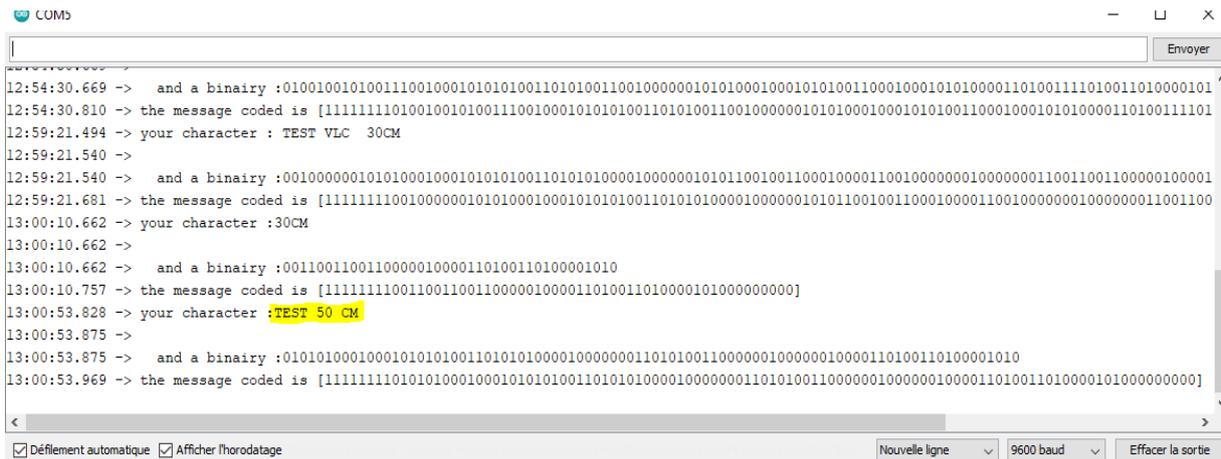
III.7.1.1 Variation de la distance

a) LDR

Lors de la réception avec la photorésistance (LDR), la communication est limitée à une distance de **30cm** (Figures III.23-III.24). Au-delà de cette distance, le taux d'erreur de transmission augmente considérablement. Le composant LDR n'est pas efficace pour de longues distances. Il en résulte que la sensibilité de ce type de photo-détecteurs n'est pas adaptée à ce type de communication. Par contre au phototransistor qui peut nous garantir une portée de **50cm** pour des transmissions sûres.



Figure III.23 : Effet de variation de la distance de communication par LDR.



```

12:54:30.669 -> and a binary :0100100101001110010000101010100110101001100100000010101000100010101001100010001010100001101001111010011010000101
12:54:30.810 -> the message coded is [11111111010010010100111001000010101010011010100110010000001010100010001010100110001000101010000110100111101
12:59:21.494 -> your character : TEST VLC 30CM
12:59:21.540 ->
12:59:21.540 -> and a binary :001000000101010001000101010100110101010000100000010101100100110001000011001000000010000000110011001100000100001
12:59:21.681 -> the message coded is [111111110010000001010100010001010101001101010100001000000101011001001100010000110010000001000000011001100
13:00:10.662 -> your character :30CM
13:00:10.662 ->
13:00:10.662 -> and a binary :0011001100110000010000110100110100001010
13:00:10.757 -> the message coded is [11111111001100110011000001000011010011010000101000000000]
13:00:53.828 -> your character :TEST 50 CM
13:00:53.875 ->
13:00:53.875 -> and a binary :0101010001000101010100110101010000100000001101010011000000100000010000110100110100001010
13:00:53.969 -> the message coded is [111111110101010001000101010100110101010000100000001101010011000000100000110010011010000101000000000]

```

Figure III.24 : Affichage de mesure des distances de communication par LDR.

b) Photodiode

Avec ce type de photo-détecteurs, on a transmis un message avec une distance de **50 cm** et un angle de réception de 60° avec succès (Figure III.25).

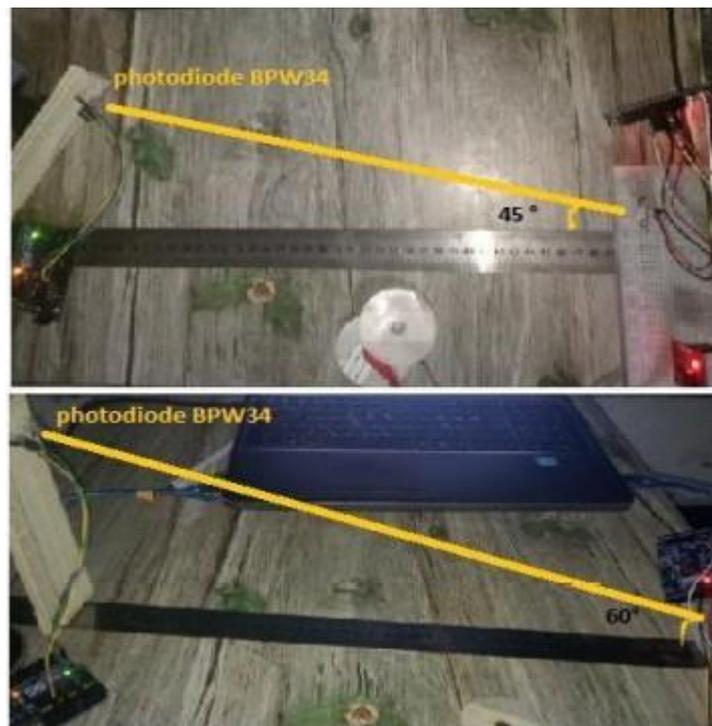


Figure III.25: Mesure de distance et d'angle réceptrice d'une photodiode.

c) Phototransistor

Les différents tests effectués avec ce photo-détecteur sont satisfaisants. La distance maximale sans erreur de transmission est au-delà de 1 mètre. On peut déduire que le phototransistor se caractérise par une sensibilité plus élevée. Le Tableau III.1 ci-dessous compare

entre les différents photo-détecteurs en termes de sensibilité temps de réponse, et distance maximale pour des transmissions sans erreurs.

Tableau III.1 : Comparaison entre différents photo-détecteurs.

Photo-détecteur	Sensibilité	Temps de réponse	Distance max
Photorésistance	Faible	Lent	5-10 cm
Phototransistor	Élevé	Modéré	1 mètre
Photodiode	Modéré	Rapide	50 cm
LDR	Élevé	Modéré	30 cm

III.7.1.2 Variation du débit

Le système conçu a par la suite été testé sous différents débits de transmission série.

a) Photorésistance

Ce composant fonctionne efficacement pour de faibles débits. Plus le débit est élevé, plus le taux d'erreur augmente. Comme aperçu via le moniteur série, lorsque le débit est élevé et la rapidité de transmission est de 9600 bauds, la transmission est incorrecte. Dans notre cas le débit maximal est de 10 bits/s.

On déduit que le temps de réponse de ce photo-détecteur, n'est pas adapté aux communications à débit élevé.

b) Photodiode

Le temps de réponse d'une photodiode est court, c'est-à-dire qu'elle est caractérisée par une vitesse de réponse très élevée. En modifiant les distances et les débits de transmission, il en est déduit qu'il y a une relation inverse entre ces deux paramètres. Plus le débit augmente, plus la distance doit être diminuée. On peut parler de débit ou de vitesse de transmission car l'augmentation de l'un fait augmenter l'autre.

III.7.2 BER et RSB de modulation OOK

Afin de valider ou non une analyse, c'est le taux d'erreur sur les bits (BER) qui servira de seuil de décision. C'est un paramètre d'analyse de la performance privilégié puisqu'il permet de quantifier le nombre de bits erronés reçus par rapport au nombre de bits total reçus, pendant un certain intervalle de temps. L'objectif est donc d'obtenir le plus petit taux d'erreur possible.

On a testé sous MATLAB la simulation Monte Carlo (Annexe D) dont le but d'étudier le taux d'erreurs lors de transmission des données en fonction du rapport signal sur bruit (RSB ou SNR en anglais pour signal-to-noise ratio) avec la modulation OOK (Figure III.26).

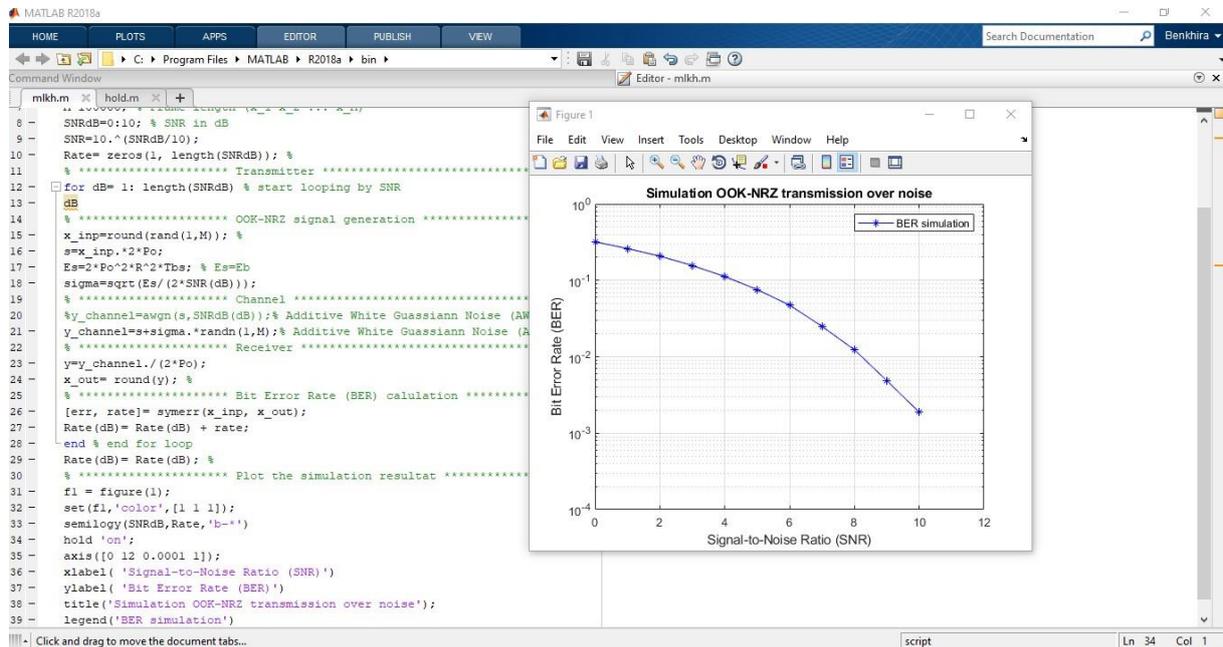


Figure III.26: BER en fonction du rapport signal sur bruit d'une modulation OOK

La quantité d'erreurs commises (taux d'erreur binaire, TEB ou BER) est une fonction décroissante du S/B. Pour évaluer notre système de communication, nous devons calculer les bits erronés en réception. Pour ce faire, nous avons émis plusieurs lettres et mots connus à priori et nous avons évalué la performance de notre système (Tableau III.3).

Tableau III.3: Exemple des codes ASCII émises et reçus avec l'évaluation du BER.

L'alphabet	Code d'émission	Code de réception	BER
A	10000110	10000110	0
B	1000110	1000110	0
C	11000110	11000110	0
D	100110	11000110	0
E	10100110	10100110	0
F	1100110	1100110	0
G	11100110	11100110	0
H	10110	10110	0
I	10010110	10010110	0
J	1010110	1010110	0

K	11010110	11010110	0
L	110110	110110	0
M	10110110	10110110	0
N	1110110	1110110	0
O	11110110	11110110	0
P	00001110	00001110	0
Q	10001110	10001110	0
R	10011100	10011100	0
S	11001110	11001110	0
T	10111000	10111000	0
U	10101110	10101110	0
V	1101110	1101110	0
W	11101110	11101110	0
X	11110000	11110000	0
Y	10011110	10011110	0
Z	1011110	1011110	0
OK	1111011011010110	1111011011010110	0
BONJOUR	010001101111011001110110010 101101111011010101110010011 10	0100011011110110011 1011011010111111101101 010111001001110	0.0018
MASTER	1011011010000 11011011100010111 01010011001001110	101101101000011011011100010111 01010011001001110	0
NON	011101101111011001110110	01110100110101100111010	0.04
UNIV MOSTA	101011101110 1101001011011011101 011011110110110011101011100 010000110	101011101110110100101101 1011101 011011110110110011101011100010 000110	0

III.8 Conclusion

Le VLC est en train de devenir un réseau plus approprié pour les services de soins de santé de prochaines générations à l'hôpital. Dans le présent document, l'application du VLC est démontrée à l'aide d'un modèle prototype. Nous avons démontré que le réseau VLC peut être utilisé avec succès comme une communication de données à haute vitesse, sécurisée et sûre pour le corps humain afin de fournir une surveillance en temps réel des battements cardiaques. L'utilisation de cette technologie dans le domaine médical rend le diagnostic plus rapide. Le système proposé est entièrement automatisé et pourrait être un jalon dans le domaine médical s'il est mis en œuvre avec succès. Le système que nous avons réalisé fonctionne correctement. Il reste à améliorer plusieurs paramètres pour aboutir aux objectifs fixés au préalable :

- Au niveau matériel, il faut trouver des photo-détecteurs avec un temps de réponse assez rapide
- . - Au niveau protocoles, il sera plus judicieux de programmer de protocoles de communication standard et de comparer les performances de transmission.
- Au niveau logiciel, il faut intégrer d'autres techniques de codages numériques et d'autres techniques de modulation.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Dans notre monde, la communication et ses moyens de transmission se développent jour après jour. Cependant, les différentes technologies existantes ont quelques défauts. Par exemple, le Wi-Fi est souvent limité en débit et peut poser des problèmes de sécurité et d'interférences.

Ce qui offre la technologie VLC qui est en voie de développement, est la possibilité d'interconnecter avec des débits très élevés simplement grâce à des LEDs et des photo-détecteurs sans ondes potentiellement néfastes au corps humain. D'autre part, cette technologie offre, en plus des communications à faible consommation énergétique, l'éclairage à cout largement réduit. L'importance du sujet entamé dans ce projet de fin d'études provient de ces caractéristiques très spécifiques des communications par la lumière visible.

En fait, cette technologie repose sur l'échange de données via la modulation d'amplitude des sources de lumière, imperceptible à l'œil. C'est une technologie sûre et qui présente de nombreux avantages, comme nous l'avons montré dans de ce document.

De nombreuses applications sont possibles : De la communication entre ordinateurs à la géo-localisation en passant par la communication entre voitures ainsi que les interconnexions dans les places publiques, les magasins, les musées et les hôpitaux.

A titre d'application pratique, la communication et la transmission des données dans le domaine médical étaient considérées dans notre présent projet en exploitant le capteur ECG AD8232. Ce dernier permet de transmettre les données à travers l'espace libre dans un environnement composé de deux Arduinos Uno placés de part et d'autre des deux terminaux communiquant entre eux grâce à un émetteur optique le moule LED 3W et un photo-détecteur de type photorésistance LDR ou bien photodiode BPW34. Cette application qui était limitée par manque de temps à des transmissions semi-duplex à faibles portées (inférieures ou égales à 1 m), est extrêmement intéressante pour préserver la santé publique en limitant les contaminations qui risquent de se développer lors du contact direct avec les patients comme on l'a tristement vécu durant la pandémie mortelle le COVID-19. Avec le système proposé qui reste à développer, le prélèvement des données biologiques du patient ainsi que leur diagnostic se font à distance par lumière visible en évitant tout contact entre le consultant et le patient.

Conclusion générale

Cependant, la technologie VLC semble pour l'instant être mieux adaptée à un usage professionnel dû au manque de matériel grand public compatible. Pour cette raison, elle ne sera sans doute pas dans tous les foyers demain, mais elle a certainement un avenir très prometteur.

Les problèmes rencontrés sont multiples. Entre-autres nous citons ce qui suit :

- Puissance de la carte Arduino très faible puisqu'elle ne dispose pas d'une capacité de stockage élevée pour permettre l'envoi de données plus volumineuses tels que les images, les vidéos et les multimédia,
- Non-disponibilité des Arduinos et leurs modules spécifiques tels que l'ESP8266 au laboratoire et la difficulté rencontrée aussi de les avoir de l'extérieure,
- Retard consistant de plusieurs mois dans la fourniture du capteur ECG AD8232 commandé de la chine,
- Manque de ressources traitant l'aspect purement pratique, surtout logicielle, de cette technologie qui est encore nouvelle et peu traitée.

En ce qui concerne les perspectives, nous recommandons ce qui suit pour les travaux futurs :

- Conception d'un système VLC bidirectionnelle à l'aide d'un microcontrôleur ou un microprocesseur plus puissant tel que le Raspberry et le FPGA,
- Développer le système conçu pour permettre l'envoi d'images, de vidéos et de documents multimédia,
- Développer le système conçu en ajoutant d'autres appareils médicaux connectés à internet,
- Sécuriser les transmissions optiques en utilisant les techniques de l'étalement de spectre et de la cryptographie,
- Création d'une application Android pour permettre la communication VLC entre différents types de terminaux ce qui serait très intéressant pour le développement des systèmes IoTs exploitant le Li-Fi. Ceci peut créer de nouvelles opportunités et permettra de bonnes performances techniques et énergétiques ainsi qu'un coût de déploiement très réduit.

Bibliographie

- [1] Jorge GARCIA-MARQUEZ¹, Suat TOPSU. « LES COMMUNICATIONS par lumière visible : le Li-Fi ». INDUSTRIE DES OBJETS CONNECTES, 7010 page 22.
- [2] 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.
- [3] Carlos Medin ,MayteeZambrano Nuñez et Kiara Navarro , septembre2015,LED BASED VISIBLE LIGHT COMMUNICATION: TECHNOLOGY, APPLICATIONS AND CHALLENGES – A SURVEY. Vol. 8, Issue 4, pp. 482-495 disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/281408421>,consulté le : 14 avril 2020.
- [4] Redoutey Joël, Introduction aux dispositifs optoélectroniques utilisés en électronique de puissance. Marseille, France : Centrale Marseille, avril 2020.
- [5] « Les communication en satellites en pleine évolution ». ITU News MAGAZINE No. 2, 2019, 52 pages.
- [6] René WALLSTEIN. EncyclopædiaUniversalis« TÉLÉCOMMUNICATIONS La communication sans fil ». Disponible sur : < <https://www.universalis.fr/encyclopedie/telecommunications-la-communicationsans-fil/>>. (06/09/2020).
- [7] « LES RAYONS INFRAROUGES ». Disponible sur : < <http://www.utlmorlaix.org/wp-content/uploads/2017/06/UTL-7-LES-INFARROUGES.pdf>>, (06/09/2020).
- [8] Zeman Miro, "Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells:MoLEDing, Materials andDeviceTechnology (Electronic Materials: Science &Technology)," in Solar Cells., 1998, ch.9, consultèle :17/05/2020.
- [9]PekkaKamsula, Marcos Katz, Juha-PekkaMäkelä, DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A BI-DIRECTIONAL VISIBLE LIGHT COMMUNICATION TESTBED,2015, University of Oulu, Department of Electrical and Information Engineering. Master'sThesis, pp. 14,15, Consulté le :02/05/2020.
- [10] Nan Chi*. LED-Based Visible Light Communications, 2018. [signals and communication technology]. N°2018936636, The Composition of the Visible Light Communication System, pp .7,8, consulté le: 25/05/2020.
- [11]FromLighting to Photo protection: Fundamentals and Applications of Rare Earth Materials - Scientific Figure on ResearchGate. [enligne], Disponible sur: <https://www.researchgate.net/figure/a-Simplified-schematization-of-a-LED-bulb-and-bcombination-of-the-blue-LED-spectrum>
- [12] Impact of LightingRequirements on VLC Systems - Scientific Figure on ResearchGate. [en ligne],Disponible sur: https://www.researchgate.net/figure/The-power-distribution-as-afunction-of-wavelength-for-phosphor-converted-PC-white-LED_fig1_264595462, Consulté le: 04/07/2020.

- [13] Nan Chi*. LED-Based Visible Light Communications,2018. [signals and communication technology]. N° 2018936636, The Transmitter of the Visible Light Communication System. pp. 24,29, (consulté le: 25/05/2020).
- [14] source LED, Aout 2012, [en ligne], disponible sur :<https://energiepluslesite.be/techniques/eclairage10/sources-lumineuses/sources-led/>, consulté le 30/07/2020
- [15] N. Kumar, « Visible Light Communication Based Traffic Information Broadcasting
- [16] J. VERNEZ, 2003 « Adaptation de la couche MAC du standard IEEE 802.15.4 à une couche physique Ultra Wide Band », La Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains, Suisse, consulté le : 30/06/2020.
- [17] J. Albà, 2014, « Development of embedded transmitter for visible light communication system for indoor environment », Master en science de l'ingénieur et gestion des télécommunications, Université polytechnique de Catalogne, consulté le 15/04/2020.
- [18] Alin-Mihai CĂILEAN, 2014 Study implementation and optimization of a visible light communications system. Application to automotive field. UNIVERSITÉ DE VERSAILLES SAINT-QUENTIN EN YVELINES ECOLE DOCTORALE STV, pp.10,14, consulté le : 20/05/2020.
- [19] Hyun-Seung Kim; Deok-Rae Kim; Se-Hoon Yang; Yong-Hwan Son; Sang-Kook Han, Jan.1, 2013,"An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique," Light wave Technology, Journal of, vol.31, no.1, pp.134,144, Jan.1, consulté le : 20/05/2020.
- [20] R. U.-R. SM,2018 « Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande »,Union Internationale des Télécommunications, consulté le 18/07/2020. [A. Cailean,2014 « Etude et réalisation d'un système de communications par lumière visible(VLC/LiFi). Application au domaine automobile », Thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, France. consulté le 17/07/2020.
- [21] internet des objets,[en ligne] disponible sur : <https://www.futurasciences.com/tech/definitions/internet-internet-objets-15158/> consulté le : 29/07/2020.
- [22]JaninaBartje,The top 10 IoT application areas – based on real IoT projects,2016. [en ligne,],URL: <https://iot-analytics.com/top-10-iot-project-application-areas-q3-2016/> , consulté le : 01/06/2020
- [23] extrait via site web <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=ntic-internet-objets> consulté le : 21/06/2020
- [24] extrait via site web [en ligne], https://www.ecologiquesolidaire.gouv.fr/sites/default/files/14085_Transport-intelligent_Web_planches_FR.pdf, consulté le: 20/06/2020

- [25] Patel Nasrallah, Internet of things :applications,benefits and challenges [en ligne], disponible sur:<https://www.peerbits.com/blog/internet-of-things-healthcareapplications-benefits-and-challenges.html> ,consulté le : 30/07
- [26] Oussama, AFFOUNE, and NADIA Abderaouf. "Visible light communication." (2020).
- [27] Abdeslam BEHLOULI, 07 d´décembre 2016. Simulation du Canal Optique Sans Fil. Applications aux Communications Optiques Sans Fil. Thèse de doctorat : Électronique des hautes fréquences, photonique et systèmes, L'UNIVERSITÉ DE POITIERS, pp18-21. Consulté le :30/06/2020.
- [28] M. LAKHDARIF, POLYCOPIE DES TRAVAUX PRATIQUES: Introduction à la simulation et routage des circuits avec le logiciel PROTEUS V7 et V8,UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN. consulté le : 18/06/2020
- [29] L. U. Khan, « Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges », Digital Communications and Networks, vol. 3, no 2, p. 78-88, Consulté le: 06/05/2020.
- [30] MEUNIER, J.-P. ; 2003 – Télécoms Optique : Composants à fibres systèmes de transmission. Ed. Hermès. Paris. pp.134, 208, 210 et 227].consulté le 04/06/2020.
- [31] 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 RenewableEnergeticSystems, 2018, Springer, DOI:10.1007/978-3-319-73192-6_5, ISBN-13: 978-3319731919
- [32] 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.
- [33] P. Goswami et M. K. Shukla, « Design of a Li-Fi Transceiver », Wireless Engineering and Technology, vol. 08, no 04, p. 71-86, 2017.
- [34] 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.
- [35] R. U.-R. Sm, « Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande », Union Internationale des Télécommunications, 2018.
- [36] N. Barbot, S. Sahuguede, A. Julien-Vergonjanne, and J.-P. Cances, “LDPC and Fountain Code Performances over Mobile Wireless Optical Channel,” Transactions On EmergingTelecommunications Technologies, Article sou- mis le 30/08/2013.
- [37] 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.

[38] « An IEEE Standard for Visible Light Communications | Visible Light Communications ». [En ligne]. Disponible sur : <http://visiblelightcomm.com/anieee-standard-for-visible-light-communication>

[39] Smart Projects. (2015, Décembre) Arduino.[en ligne]. Disponible sur http://arduino.cc/en/uploads/Main/Arduino_Uno_Rev3-schematic.pdf. avril 2020

[40] Module LED 3W High Power Module Pour Arduino [en ligne]. Disponible sur : <https://www.amazon.fr/Module-High-Power-Pour-Arduino/dp/B00Q6WWPCM>.Juin, 2020.

[41] «La photorésistance ou LDR ». [En ligne]. Disponible sur : <https://f5zv.pagespersoorange.fr/RADIO/RM/RM24/RM24B/RM24B10.html>] juin,2020.

[42] Photodiode BPW34, Document Numéro : 91000 [en ligne], disponible sur : www.vishay.com consulté le 29/06/2020.

[43] ECG Graph Monitoring with AD8232 ECG Sensor&Arduino, [enligne]. Disponible sur :<https://how2electronics.com/ecg-monitoring-with-ad8232-ecg-sensor-arduino/>.consulté le :27/06/2020.

Annexe A : AD8232 ECG



FEATURES

- Fully integrated single-lead ECG front end
- Low supply current: 170 μ A (typical)
- Common-mode rejection ratio: 80 dB (dc to 60 Hz)
- Two or three electrode configurations
- High signal gain ($G = 100$) with dc blocking capabilities
- 2-pole adjustable high-pass filter
- Accepts up to ± 300 mV of half cell potential
- Fast restore feature improves filter settling
- Uncommitted op amp
- 3-pole adjustable low-pass filter with adjustable gain
- Leads off detection: ac or dc options
- Integrated right leg drive (RLD) amplifier
- Single-supply operation: 2.0 V to 3.5 V
- Integrated reference buffer generates virtual ground
- Rail-to-rail output
- Internal RFI filter
- 8 kV HBM ESD rating
- Shutdown pin
- 20-lead 4 mm \times 4 mm LFCSP package

APPLICATIONS

- Fitness and activity heart rate monitors
- Portable ECG
- Remote health monitors
- Gaming peripherals
- Biopotential signal acquisition

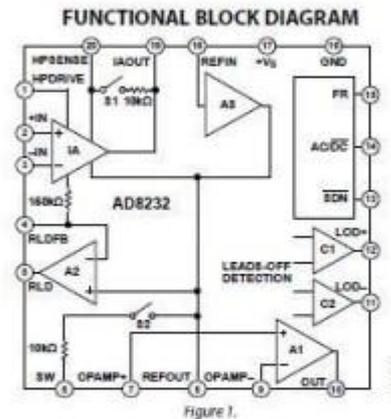


Figure 1.

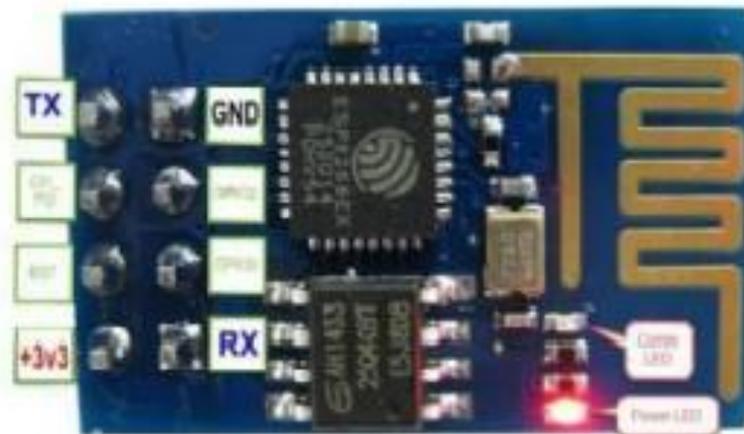
Annexe B : ESP8266

ESP8266 PINOUTESP8266 offre une solution de réseau Wi-Fi complète et autonome, lui permettant d'héberger l'application ou de décharger toutes les fonctions de réseau Wi-Fi d'un autre processeur d'application.

Lorsque ESP8266 héberge l'application, et lorsqu'il s'agit du seul processeur d'application de l'appareil, il peut démarrer directement à partir d'un flash externe.

Il a intégré le cache pour améliorer les performances du système dans de telles applications, et de minimiser les besoins en mémoire.

Alternativement, servant d'adaptateur Wi-Fi, l'accès Internet sans fil peut être ajouté à n'importe quelle conception basée sur microcontrôleur avec une connectivité simple par l'interface UART ou l'interface CPU AHB bridge



Caractéristiques de l'ESP8266 :

- Protocole 802.11 b/g/n
- Wi-Fi Direct (P2P), soft-AP
- Pile de protocoles TCP/IP intégrés
- Commutateur TR intégré, balun, LNA, amplificateur de puissance et réseau
- Correspondant PLL intégré, régulateurs et unités de gestion de puissance
- Puissance de sortie +19,5 dBm en mode
- 802.11b Capteur de température intégré
- Prend en charge la diversité des antennes
- Mise hors tension du courant de fuite de 10uA
- Le processeur 32 bits intégré de faible puissance pourrait être utilisé comme processeur d'application
- SDIO 2.0, SPI, UART
- STBC, 1 1 MIMO, 2 1 MIMO
- Agrégation A-MPDU et A-MSDU et intervalle de garde de 0,4 μ s
- Réveil et transmission des paquets en 2ms
- Consommation électrique de secours de 1,0 mW (DTIM3)

Annexe C :

ASCII Table (ASCII =American Standard Code for Information Interchange)

Dec	Char	Dec	Char	Dec	Char	Dec	Char
0	NUL (null)	32	SPACE	64	@	96	`
1	SOH (start of heading)	33	!	65	A	97	a
2	STX (start of text)	34	"	66	B	98	b
3	ETX (end of text)	35	#	67	C	99	c
4	EOT (end of transmission)	36	\$	68	D	100	d
5	ENQ (enquiry)	37	%	69	E	101	e
6	ACK (acknowledge)	38	&	70	F	102	f
7	BEL (bell)	39	'	71	G	103	g
8	BS (backspace)	40	(	72	H	104	h
9	TAB (horizontal tab)	41	)	73	I	105	i
10	LF (NL line feed, new line)	42	*	74	J	106	j
11	VT (vertical tab)	43	+	75	K	107	k
12	FF (NP form feed, new page)	44	,	76	L	108	l
13	CR (carriage return)	45	-	77	M	109	m
14	SO (shift out)	46	.	78	N	110	n
15	SI (shift in)	47	/	79	O	111	o
16	DLE (data link escape)	48	0	80	P	112	p
17	DC1 (device control 1)	49	1	81	Q	113	q
18	DC2 (device control 2)	50	2	82	R	114	r
19	DC3 (device control 3)	51	3	83	S	115	s
20	DC4 (device control 4)	52	4	84	T	116	t
21	NAK (negative acknowledge)	53	5	85	U	117	u
22	SYN (synchronous idle)	54	6	86	V	118	v
23	ETB (end of trans. block)	55	7	87	W	119	w
24	CAN (cancel)	56	8	88	X	120	x
25	EM (end of medium)	57	9	89	Y	121	y
26	SUB (substitute)	58	:	90	Z	122	z
27	ESC (escape)	59	;	91	[	123	{
28	FS (file separator)	60	<	92	\	124	|
29	GS (group separator)	61	=	93	]	125	}
30	RS (record separator)	62	>	94	^	126	~
31	US (unit separator)	63	?	95	_	127	DEL

Annexe D : simulation sous MATLAB

```

clc;
clear all;
%close all;
Po=1;
R=1;
Tbs=1;
M=100000; % Frame length (x_1 x_2 ... x_M)
SNRdB=0:10; % SNR in dB
SNR=10.^(SNRdB/10);
Rate= zeros(1, length(SNRdB)); %
% ***** Transmitter *****%
for dB= 1: length(SNRdB) % start looping by SNR
dB
% ***** OOK-NRZ signal generation *****%
x_inp=round(rand(1,M)); %
s=x_inp.*2*Po;
Es=2*Po^2*R^2*Tbs; % Es=Eb
sigma=sqrt(Es/(2*SNR(dB)));
% ***** Channel *****%
%y_channel=awgn(s,SNRdB(dB));% Additive White Guassinn Noise (AWGN)
y_channel=s+sigma.*randn(1,M);% Additive White Guassinn Noise (AWGN)
% ***** Receiver *****%
y=y_channel./(2*Po);
x_out= round(y); %

```

```

% ***** Bit Error Rate (BER) calculation *****%
[err, rate]= symerr(x_inp, x_out);
Rate(dB)= Rate(dB) + rate;
end % end for loop
Rate(dB)= Rate(dB); %
% ***** Plot the simulation resultat *****%
f1 = figure(1);
set(f1,'color',[1 1 1]);
semilogy(SNRdB,Rate,'b-*')
hold 'on';
axis([0 12 0.0001 1]);
xlabel( 'Signal-to-Noise Ratio (SNR)')
ylabel( 'Bit Error Rate (BER)')
title('Simulation OOK-NRZ transmission over noise');
legend('BER simulation')
grid on;

```