

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TABLES DES MATIERES	ii
LISTE DES ABREVIATIONS	vii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 GENERALITES D'UNE TRANSMISSION	3
1.1 Classification des réseaux sans fils	3
1.2 Présentation de la Transmission	4
1.2.1 L 'information	4
1.2.2 Chaîne de transmission	5
1.2.3 Transducteur à l'émission	5
1.2.4 L'émetteur.....	6
1.2.5 Le canal de transmission	6
1.2.6 Le récepteur.....	7
1.2.7 Transducteur à la réception	8
1.2.8 Transmission en bande de base	8
1.3 Généralités sur la transmission sur onde visible	9
1.3.1 Les modulations numériques	11
1.3.1.1 Modulation OOK.....	11
1.3.2.2 Modulation ASK.....	13
1.3.2 Codage de Manchester	15
1.4 Spectre de la lumière visible	17
1.5 La propagation de la lumière	18
1.5.1 Définition de la lumière	18
1.5.2 La trajectoire de la lumière	18
1.5.3 La vitesse de la lumière dans le vide	18
1.5.4 Source de lumière.....	19
1.5.5 Les sources courantes	20
1.5.5.1 La fluorescence.....	20
1.5.5.2 La lumière incandescence	20
1.5.5.3 Les lampes halogènes	20

1.5.5.4 Les lampes fluo compactes (CFL)	20
1.5.5.5 Les lampes à LED	21
1.5.6 Caractéristiques d'une transmission de la lumière dans l'air.....	21
1.5.6.1 Signal et bruit	21
1.5.6.2 Atténuation de la lumière dans l'air	22
1.6 Facteurs considérés lors du choix d'une source de lumière.....	24
<i>1.6.1 L'efficacité.....</i>	<i>24</i>
<i>1.6.2 La performance de couleur.....</i>	<i>24</i>
<i>1.6.3 La contrôlabilité</i>	<i>25</i>
<i>1.6.4 La durée de vie et le coût.....</i>	<i>25</i>
1.7 Les détecteurs de lumière.....	25
<i>1.7.1 L'œil.....</i>	<i>25</i>
<i>1.7.2 Les détecteurs photochimiques</i>	<i>26</i>
<i>1.7.3 Les détecteurs photo électroniques</i>	<i>26</i>
<i>1.7.4 Les photodiodes</i>	<i>26</i>
<i>1.7.5 Les phototransistors</i>	<i>26</i>
<i>1.7.6 Les photo-Darlington</i>	<i>27</i>
<i>1.7.7 Les photo-Thyristor</i>	<i>27</i>
<i>1.7.8 Les photo coupleurs</i>	<i>27</i>
<i>1.7.9 Les cellules photovoltaïques.....</i>	<i>27</i>
1.8 Notions de base sur les photodiodes.....	28
<i>1.8.1 Définition</i>	<i>28</i>
<i>1.8.2 Propriété</i>	<i>28</i>
<i>1.8.3 Fonctionnement</i>	<i>29</i>
<i>1.8.4 Temps de réponse de la photodiode</i>	<i>30</i>
<i>1.8.5 Application.....</i>	<i>31</i>
<i>1.8.6 Exemple de Montage de la photodiode.....</i>	<i>31</i>
1.9 Énergie rayonnante et Grandeur radiatives.....	33
1.11 Conclusion	39

CHAPITRE 2 GENERALITES SUR LE LI-FI	40
2.1 Introduction	40
2.2 Présentation de la technologie Li-Fi.....	40
2.3 La technologie Li-Fi.....	41
2.4 Standardisation.....	44
2.5 Fonctionnement Li-Fi.....	45
2.5.1 <i>Les émetteurs</i>.....	45
2.5.2 <i>Les récepteurs</i>.....	46
2.5.3 <i>Performances</i>.....	47
2.5.4 <i>Améliorations</i>	48
2.5.5 <i>Les diodes LED</i>	48
2.6 Rapport qualité prix de le Li-Fi	52
2.6.1 <i>Différents coûts</i>	52
2.6.2 <i>Point de vue des industriels</i>.....	53
2.7 Utilisations possibles.....	53
2.7.1 <i>Utilisation du Li-Fi dans La 5ème Génération ou 5G</i>.....	53
2.7.3 <i>Utilisation dans l'Infrastructures sensibles</i>	54
2.7.3 <i>Utilisation dans l'automobile</i>.....	55
2.7.4 <i>Utilisation dans la communication aquatique</i>	55
2.7.5 <i>Utilisation du Li-Fi dans l'information ciblée</i>.....	56
2.7.6 <i>Utilisation dans la ville connectée</i>	56
2.8 Spectre visible du Li-Fi	57
2.9 L'internet par Li-Fi.....	57
2.9.1 <i>L'envoi des informations numériques dans le réseau Li-Fi</i>.....	58
2.9.2 <i>La conversion du signal électrique en un signal lumineux</i>.....	58
2.9.3 <i>La réception et traitement des signaux lumineux</i>	58
2.10 L'optoélectronique base du Li-Fi.....	58
2.10.1 <i>Présentation de l'optoélectronique</i>	58
2.10.2 <i>Principe</i>.....	59
2.10.3 <i>Utilisation des LED dans l'opto-électronique</i>	61
2.11 Conclusions.....	62
CHAPITRE 3 MISE EN ŒUVRE D'UNE LIAISON LI-FI.....	63
3.1 Introduction	63

3.2 Concept de transmission	63
3.2 Objectifs.....	64
3.3 Avantages et contraintes du projet	65
3.5 Choix du logiciel Matlab	65
3.6 Conception d'une application de simulation du Li-Fi.....	66
<i>3.6.1 Présentation de la démarche.....</i>	<i>66</i>
<i>3.6.2 Code des paramètres de base de la simulation sous Matlab.....</i>	<i>69</i>
<i>3.6.3 Présentation de la simulation sous Matlab</i>	<i>71</i>
3.7 Modélisation de la simulation	77
3.8 Démarche de calcul.....	78
3.9 Conclusion	79
CHAPITRE 4 ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS	80
4.1 Présentation des résultats	80
4.2 Présentation des résultats de la simulation sous Matlab.....	81
4.2 Analyse et interprétation des résultats	88
4.3 Analyse de la performance du système.....	91
<i>4.3.1 Analyse de la courbe de la puissance reçue</i>	<i>91</i>
<i>4.3.2 Analyse de la courbe du signal de sortie dans le domaine temporel</i>	<i>93</i>
<i>4.3.3 Analyse de la courbe de signal de sortie dans le domaine fréquentiel</i>	<i>94</i>
<i>4.3.4 Analyse de l'autocorrélation.....</i>	<i>95</i>
<i>4.3.5 Analyse de l'intercorrélation du signal avec du bruit.....</i>	<i>96</i>
4.3.5.1 Intercorrélation avec du bruit impulsif	97
4.3.5.2 Intercorrélation avec le bruit gaussien de forte amplitude (1,500)	98
4.3.5.3 Intercoréllation avec le bruit Gaussien de faible amplitude (1,10)	100
4.3.5.4 Intercorrélation avec le bruit déterministe	101
4.3.5.5 Résumé de l'impact du bruit sur le signal optique.....	101
4.4 But de la simulation	103
4.5 Avantages et faiblesses de la technologie selon notre simulation	104
4.6 Limites et Améliorations envisageables	104
CONCLUSION GENERALE	105
ANNEXE 1 : BASE DE L'OPTIQUE GEOMETRIQUE	107
ANNEXE 2 : CIRCUIT ELECTRONIQUE TX ET RX LIFI.....	111

ANNEXE 3 : MODELISATION DE LA MODULATION OOK.....	112
BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE.....	113
PAGE DE RENSEIGNEMENTS	128

LISTE DES ABREVIATIONS

3D	: Trois dimensions ou tridimensionnel
4G	: 4 ^{ème} Génération
5G	: 5 ^{ème} Génération
AC	: Alternating Current
AMOLED	: Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode
ASK	: Amplitude Shift Keying ASK
CDMA	: Code division multiple access
CFL	: Compact Fluorescent Light
CRI	: Colour Rendering Index
CPL	: Courants Porteurs en Ligne
DC	: Direct Current
E/S	: Entrée ET Sortie
FOLED	: Flexible organic light-emitting
Ghz	: Gigahertz
GPRS	: General Packet Radio Service
GSM	: Global System for Mobile communication
HIPERLAN	: High Performance Radio LAN
HIPERMAN	: High Performance Radio Metropolitan Area Network

IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	: Internet Protocol
IR	: Infrared
IrDA	: Infrared Data Association IrDA
LED	: Diode Electroluminescent
LSB	: Least Significant Bit
OLED	: Organic light-emitting diode
OOK	: On-off keying
Li-Fi	:: Light Fidelity
LED	: Light Emitting Diode
LOS	: Line of Sight
MAC	: Media Access Control
MDA	: Modulation par Déplacement d'Amplitude
MDP	: Modulation par Déplacement de Phase
MDPD	: Modulation par Déplacement de Phase Différentiel
MDF	: Modulation par Déplacement de Fréquence
MAQ	: Modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature
MIMO	: Multiple-Input Multiple-Output
NLOS	: Non-Line of Sight

OOK	: On Off Keying
OS	: Operating System
PC	: Personal Computer
PCB	: Printed Circuit Board
PDA	: Personal Digital Assistant
PSK	: Phase Shift Keying PSK
PHY	: Physical Layer
RVB	: Rouge Vert Bleu
RS-232	: Recommended Standard 232
RX	: Receiver
SCL	: Serial Clock Line
SD	: Secure Digital
SDA	: Serial Data Line
SEIA	: Socio-Economic Impact Assessment
TCP	Transport Control Protocol
TX	: Transmitter
UART	: Universal asynchronous receiver/transmitter
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications Service
USB	: Universal Serial Bus
Wi-Fi	: Wireless Fidelity

VLC	: Visible Light Communication
W	: Watts
WiGig	: Wireless Gigabit Alliance
WLAN	: Wireless Local Area Networks
WLAN	: Wireless Local Area Networks
WMAN	: Wireless Metropolitan Area Networks
WPAN	: Wireless Personal Area Networks
WWAN	: Wireless Wide Area Networks

INTRODUCTION

Ces dernières années, les technologies sans fil ont connu un essor considérable que ce soit au niveau commercial ou dans le domaine des recherches, ceci revient aux multiples avantages qu'elles offrent comme la mobilité, les faibles coûts. Mais, comparer aux interfaces filaires, peu nombreuses sont les interfaces sans fil qui offrent un débit rapide.

Les réseaux sans fil ont été créés pour permettre aux utilisateurs d'effectuer des communications de tel sorte à garder la connectivité des équipements, tout en ayant gain de mobilité et sans avoir recours aux fils utilisés dans les réseaux traditionnels et qui encombrent ces derniers.

Il existe plusieurs technologies pour les réseaux sans fil se distinguant d'une part par la fréquence d'émission utilisée et d'autre part par le débit et la portée des transmissions comme le Bluetooth, Wi-Fi (Wireless Fidelity), et le Li-Fi ou Light Fidelity et qui est l'objet de ce projet de recherche. Leur arrivée a soulevé un engouement nouveau pour les réseaux radio qui étaient auparavant le domaine exclusif des militaires. Le Li-Fi qui est la nouvelle technologie à venir qui est la base du concept de la ville intelligente qui est la future génération à venir.

La ressource la plus importante dans la télécommunication est la fréquence. De nos jours le spectre des fréquences radio allouées est restreint et devient une ressource rare. Le spectre des fréquences radio est de plus en plus saturé cause de la croissance exponentielle des transferts de données sans fil, l'objet du Li-Fi est toujours de transporter des données sans fil, mais sur le spectre optique. La lumière visible devient un réseau de communication. L'utilisation d'une nouvelle bande de fréquence devient indispensable, d'où la nécessité de l'adoption de la fréquence de la lumière visible devient indispensable.

D'autre part comme la transmission par le Wi-Fi représentait plusieurs inconvénients comme la menace pour la santé humaine, les faiblesses au niveau de la sécurisation, même avec toutes les sécurités d'un réseau Wi-Fi, le réseau représentait des failles au niveau de la sécurisation de l'accès.

Il est donc indispensable de trouver une nouvelle méthode de communication, pour éviter ces menaces d'où l'intégration d'une nouvelle technologie comme le réseau Li-Fi pourrait être une solution pour remédier à ce problème. Ainsi la mise en place d'un réseau se basant sur la technologie Li-Fi permet de remédier à tous ces problèmes que ce soit la sécurité, l'ergonomie, et l'utilisation d'une nouvelle bande de fréquence. Tous ces faits évoqués nous ont conduit à

mener cette étude qui s'intitule : « Modélisation et simulation d'un concept de transmission par onde visible ».

Notre projet de recherche s'est fixé comme objectif d'effectuer une étude technique de la communication sur la lumière visible connue sous le nom de Light Fidelity (Li-Fi).

Afin d'effectuer une étude détaillée sur la norme Li-Fi, notre étude sera structurée en quatre chapitres :

D'abord nous allons traiter dans le premier chapitre, les généralités sur une transmission.

Après nous allons étudier dans le second chapitre, les bases du Li-Fi et de la conception d'une ville intelligente.

Ensuite le troisième chapitre traitera les solutions pour la mise en œuvre d'un système de communication Li-Fi.

Et enfin dans le dernier chapitre, nous traiterons la simulation d'un concept de transmission Li-Fi pour analyser les faisabilités d'une liaison par onde visible.

CHAPITRE 1

GENERALITES D'UNE TRANSMISSION

1.1 Classification des réseaux sans fils

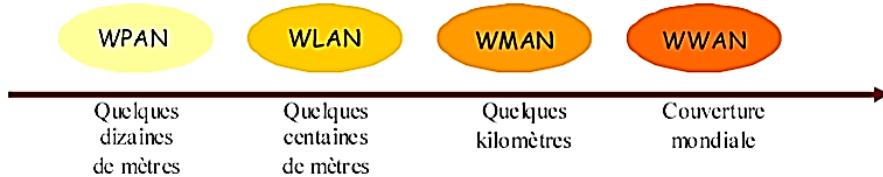


Figure 1.01 : Evolution du réseau sans fils

- **WPAN (Wireless Personal Area Networks)**

Dans cette catégorie, on trouve les réseaux sans fils à l'échelle humaine dont la portée maximale est limitée à quelques dizaines de mètres autour de l'usager (bureaux, salles de conférence...). On y trouve les standards tels que le Li-Fi, Bluetooth, l'Ultra Wide Band (UWB), ZIGBEE, RFID et HomeRF. [1]

- **WLAN (Wireless Local Area Networks)**

C'est la catégorie des réseaux locaux sans fils dont la portée va jusqu'à 500 m, pour les applications couvrant un campus, un bâtiment, un aéroport, un hôpital, etc. On y trouve les standards tels que le Wi-Fi (Wireless Fidelity), Li-Fi (Light Fidelity), et le HIPERLAN. [1]

- **WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks)**

Plus connus sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR), ce type de réseau utilise le même matériel que celui qui est nécessaire pour constituer un WLAN mais peut couvrir une plus grande zone de la taille d'une ville, avec une portée pouvant aller jusqu'à 50 km. C'est dans cette catégorie que l'on classe le WiMax et les HIPERMAN. [1]

- **WWAN (Wireless Wide Area Networks)**

C'est la catégorie de réseaux cellulaires mobiles dont la zone de couverture est très large, à l'échelle mondiale. Dans cette catégorie, on peut citer le GSM et ses évolutions (GPRS, EDGE), le CDMA et l'UMTS. [1][14]

La classification des réseaux sans fils peut être résumée par la Figure 1.01.

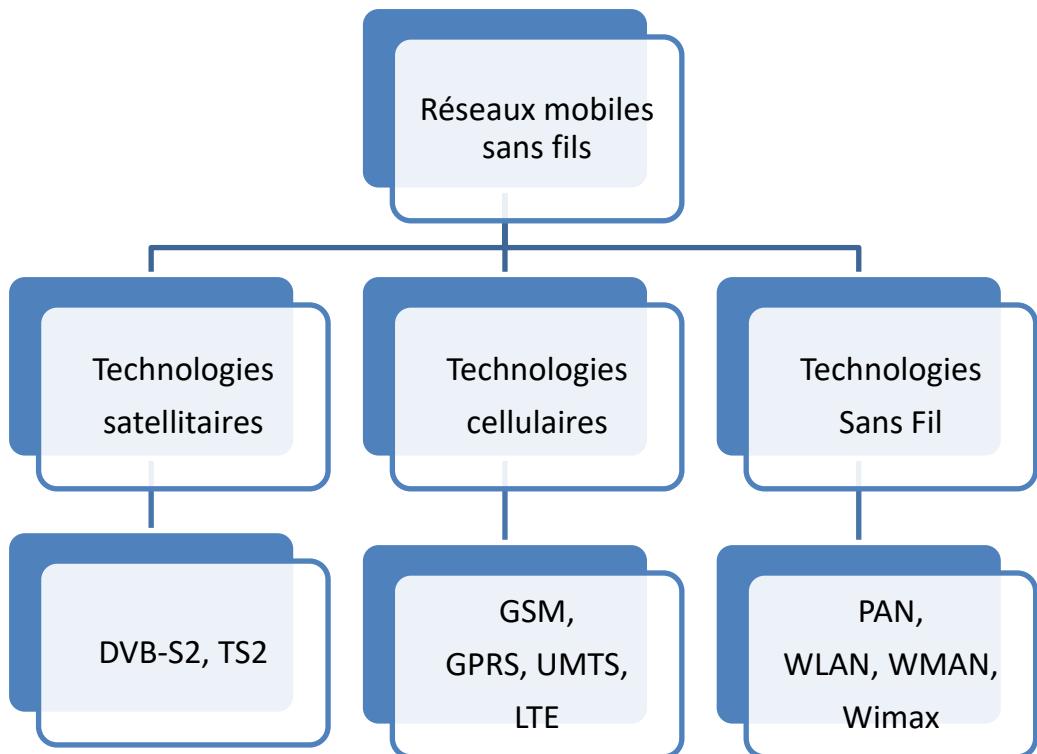


Figure 1.02 : Diagramme des réseaux sans fils

1.2 Présentation de la Transmission

1.2.1 L'information

L'information est au cœur de nos sociétés modernes : presse, téléphonie, données météorologiques, internet... De nombreux vecteurs concourent à nous transmettre les messages porteurs de ces informations. Les machines associées à des outils informatiques sont elles aussi soumises à un flux de données provenant de capteurs susceptibles d'améliorer leur performance et leur sécurité. Les flux d'information sont ainsi omniprésents dans notre quotidien.

Au-delà du traitement qui est fait de ces informations tant par l'humain que par la machine, il importe avant tout que celle-ci soit communiquée en toute fidélité à son destinataire. En d'autres termes, il faut impérativement que le message reçu soit l'exacte réplique du message émis.

Il ne s'agit pas dans cet article de réécrire la théorie de l'information pour laquelle de nombreux documents sont disponibles sur Internet mais de présenter succinctement les éléments liés à une chaîne de transmission de l'information. [1]

1.2.2 Chaîne de transmission

La chaîne de transmission de l'information, dans sa structure fonctionnelle la plus simple, est constituée :

- D'un émetteur ;
- D'un canal de transmission ;
- D'un récepteur.

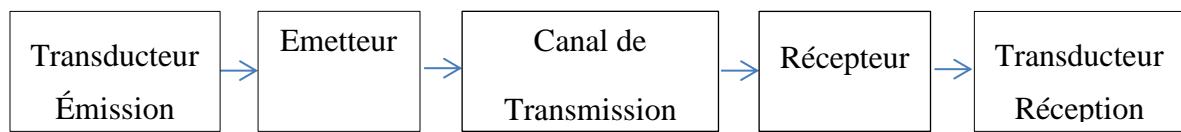


Figure 1.03 : Principe de la chaîne de transmission de l'information

Par analogie avec l'humain, l'émetteur « parle » au récepteur en utilisant le canal de transmission. Pour se comprendre, ils doivent aussi utiliser la même « langue ». [2] [16]

1.2.3 Transducteur à l'émission

Le transducteur à l'émission permet de convertir le signal original (voix, image...) en un signal électrique utile pour l'émetteur. Certains utilisent le terme « encodeur » (codec dans le jargon informatique), cela peut induire une confusion avec le convertisseur utilisé dans le canal de transmission qui réalise la conversion de la nature du signal (pour la voix : de pression en tension avec un microphone). [2]

Le tableau suivant montre des exemples de transducteur et de signal original associé. Le tableau suivant résume les types de transducteurs et les signaux de bases :

Transducteur	Signal original
Microphone	Voix humaine
Clavier	Touche pressée
Capteur CCD	Mouvement objet
Thermocouple	Mesure de température

Tableau 1.01 : Transducteur et signal associé

Son choix doit être compatible avec les caractéristiques (amplitude, spectre) du signal à convertir. [2] [15]

1.2.4 L'émetteur

L'émetteur a pour fonction d'adapter le signal issu du transducteur en vue de le transmettre au canal de transmission. Il peut simultanément remplir plusieurs fonctions :

- Coder le signal issu du transducteur (tension) en nombres, dans le cas d'une conversion analogique numérique ou/et de chiffrage ;
- Moduler ;
- Amplifier.

Cet émetteur peut être un émetteur analogique (exemple : émetteur radio FM) ou encore un modem ADSL utilisé pour Internet dans le cadre d'une information numérique.

1.2.5 Le canal de transmission

Le canal de transmission permet au récepteur de recevoir l'information émise par l'émetteur. De nombreux supports sont utilisés :

- Les supports avec guide physique (air, câbles, fibres, ...) ;

- Les supports sans guide physique (ondes radio, ondes lumineuses).

Ces différents supports sont choisis en prenant en compte :

- Le débit d'information à transmettre ;
- Les caractéristiques du signal (bande passante, codage...) ;
- La distance entre l'émetteur et le récepteur ;
- Les possibilités de mise en œuvre.

Pour donner une idée de la qualité des supports, disons que :

- Les câbles électriques à paires torsadées sont les moins fiables, suivis par les câbles coaxiaux ;
- Les fibres optiques offrent actuellement le meilleur compromis fiabilité/performance.

[11]

1.2.6 Le récepteur

Son rôle est à la fois de recevoir le signal émis ainsi que de le rendre compatible avec le transducteur (exemple : récepteur Li-Fi) servant à la réception. Les actions réalisées par le récepteur sont alors les suivantes :

- Filtrer le signal reçu (éliminer la partie inutile du signal reçu pour ne garder que l'information) ;
- Décoder :
 - Soit en réalisant une conversion numérique analogique ;
 - Soit un déchiffrage ;
- Démoduler ;
- Amplifier le signal pour le rendre utilisable par le transducteur de sortie.

Ce récepteur est par exemple un poste de radiophonie pour un signal analogique ou un modem ADSL pour les informations numériques. [3]

1.2.7 Transducteur à la réception

Son rôle est de fournir une information exploitable par le destinataire sous la forme d'un signal.

Transducteur	Information
Haut-parleur	Son
Ecran	Image
Signal de commande	Commande actionneur (vanne, pompe)

Tableau 1.02 : Transducteur à la réception

Il ne faut pas confondre le terme transducteur avec celui de décodeur, qui a pour but de déchiffrer un signal crypté en une information « claire ». [5] [17]

1.2.8 Transmission en bande de base

La transmission en bande de base consiste à transmettre directement le signal sur le support sans transposition de fréquence.

Cela peut se faire par exemple pour des signaux numériques en utilisant un modem dit à bande de base. Celui-ci utilise directement des supports physiques de types métallique (paires torsadées ou câble coaxiaux) ou fibre optique ou dans l'air comme le cas de la transmission sur l'onde visible.

Dans la plupart des cas, les harmoniques supérieures à un certain rang peuvent ne pas être transmises sans qu'on note une altération inacceptable du signal. Les harmoniques d'un signal transmis sur une ligne sont diversement atténusés, suivant leur fréquence, par la bande passante de la ligne. Si l'ensemble des harmoniques utiles du signal à transmettre se situent dans la bande passante de la ligne que l'on souhaite utiliser, on peut appliquer ce signal directement à l'entrée de la ligne. Il sera transmis sans atténuation notable à l'autre extrémité. [9] [18]

Les inconvénients majeurs de ce mode de transmission sont :

- Sensibilité aux parasites (bruits en $1/f$) ;
- Coût élevé pour la transmission sur fibre optique ou câble coaxial ;
- Impossibilité de partage direct d'un même canal par plusieurs sources.

1.3 Généralités sur la transmission sur onde visible

Les systèmes de transmission sur onde visible se basent sur une transmission numérique qui véhicule de l'information entre une source et un destinataire en utilisant le canal de transmission qui est l'air. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission sur onde visible est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible. [13]

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, l'air, la fibre optique ou encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique où l'on se limite aux fonctions de base : [13] [21]

- La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires ;
- Le codeur peut éventuellement supprimer des éléments binaires non significatifs.

(Compression de données ou codage de source), ou au contraire introduire de la redondance dans l'information en vue de la protéger contre le bruit et les perturbations présentes sur le canal de transmission (codage de canal). Le codage de canal n'est possible que si le débit de source est inférieur à la capacité du canal de transmission.

La probabilité d'erreur P_e tend dans ce cas vers 0 d'après les travaux de Hartley-Shannon.

- La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis.
- Enfin, du côté récepteur, les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur. [14]

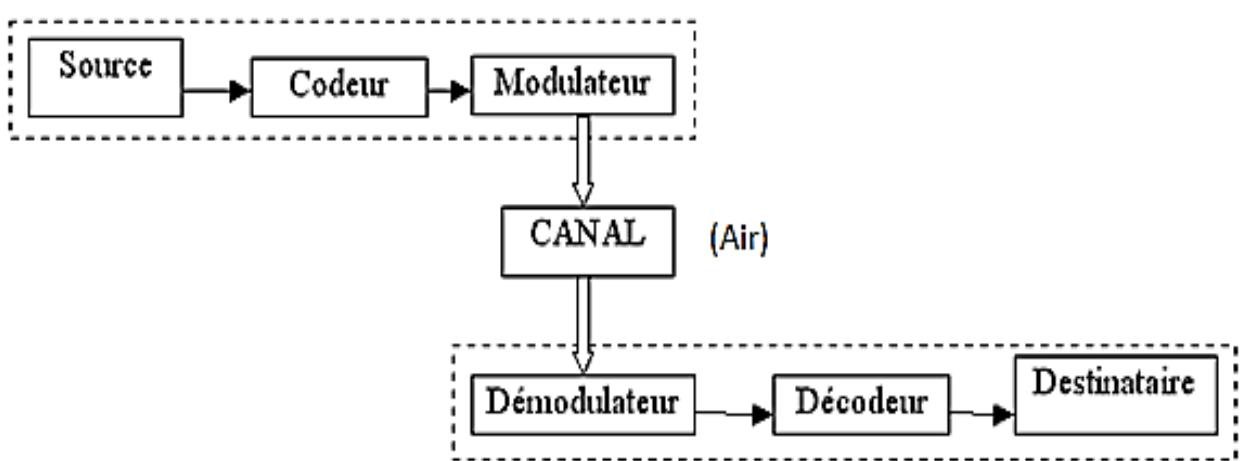


Figure 1.04 : Schéma bloc transmission sur onde visible

Le schéma synoptique d'une transmission sur onde visible d'un système de transmission numérique est donné à la figure ci-dessus où l'on se limite aux fonctions de base :

- La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires ;
- Le codeur peut éventuellement supprimer des éléments binaires non significatifs (compression de données ou *codage de source*), ou au contraire introduire de la redondance dans l'information en vue de la protéger contre le bruit et les perturbations présentes sur le canal de transmission (*codage de canal*) ;
- La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis ;
- Enfin, du côté récepteur, les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur.

1.3.1 Les modulations numériques

La modulation a pour objectif d'adapter le signal à émettre au canal de transmission. Cette opération consiste à modifier un ou plusieurs paramètres d'une onde porteuse. [4]

$$S(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.01)$$

$S(t)$ est centré sur la bande de fréquence du canal.

Les paramètres modifiables sont :

- L'amplitude : A
- La fréquence : $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$
- La phase : φ_0

Dans les procédés de modulation binaire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui ne prend que deux valeurs possibles.

Dans les procédés de modulation M-aire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui prend M valeurs. Ceci permet d'associer à un état de modulation un mot de " n " digits binaires. Le nombre d'états est donc $M = 2^n$. Ces " n " digits proviennent du découpage en paquets de " n " digits du train binaire issu du codeur. [22]

Les types de modulation les plus fréquemment rencontrés sont les suivants :

- Modulation par Déplacement d'Amplitude MDA ou Amplitude Shift Keying ASK.
- Modulation Amplitude OOK ou On Off Keying.
- Modulation par Déplacement de Phase MDP ou Phase Shift Keying PSK.
- Modulation par Déplacement de Phase Différentiel MDPD ou Differential Phase Shift Keying DPSK.
- Modulation d'Amplitude de deux porteuses en Quadrature MAQ ou Quadrature Amplitude modulation QAM.
- Modulation par Déplacement de Fréquence MDF ou Frequency Shift Keying FSK.

1.3.1.1 Modulation OOK

La modulation OOK est une modulation d'amplitude (binaire) par tout ou rien encore appelée par son abréviation anglaise : OOK pour "On Off Keying".

Dans ce cas, un seul bit est transmis par période T , et par conséquent $n=1$ et $M=2$.

Le symbole " a_k " prend sa valeur dans l'alphabet $(0, a_0)$. On observe donc sur un chronogramme des extinctions de porteuse quand $a_k = 0$. [22]

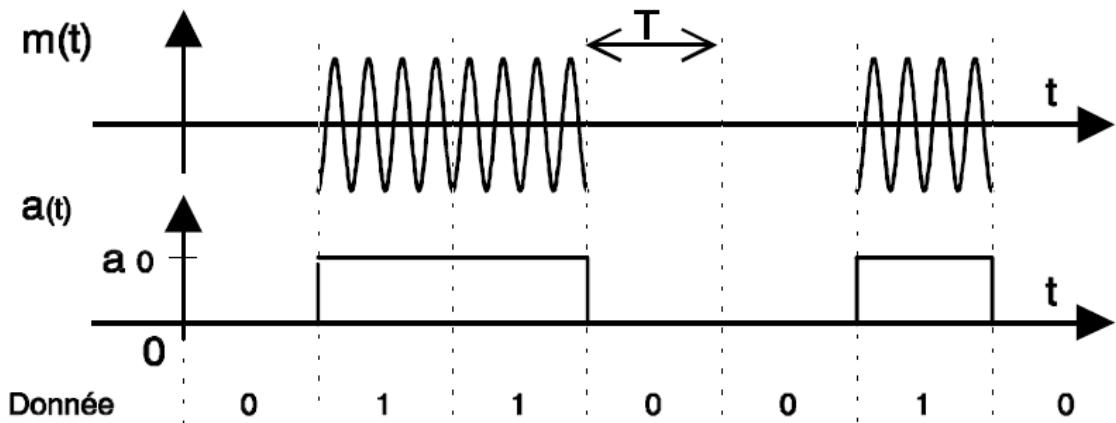


Figure 1.05 : Chronogramme de la modulation OOK

D'après le chronogramme de la modulation OOK on peut obtenir la constellation de la modulation telle que la figure 1.06 nous le montre. [6] [24]

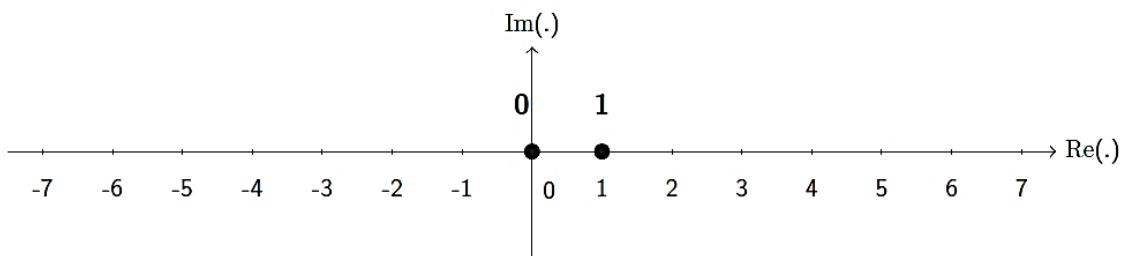


Figure 1.06 : Constellation de la modulation OOK

A la réception, cette modulation d'amplitude est souvent démodulée par une détection d'enveloppe. En l'absence de bruit, l'élévation au carré du signal $m(t)$ donne un terme à la fréquence $2f_0$ qui sera éliminé par filtrage et un terme en bande de base proportionnel à :

$$\sum_k a_k^2 \cdot g(t - kT) \quad (1.02)$$

C'est la porteuse de l'information puisqu'il contient a_k .

Le spectre du signal en bande de base est donné par :

$$y\alpha_m(f) = \frac{a_o^2 T}{4} = \left(\frac{\sin \pi f T}{\pi f t} \right)^2 + \frac{a_o^2}{4} \delta(f) \quad (1.03)$$

1.3.2.2 Modulation ASK

La modulation d'amplitude s'applique en faisant varier l'amplitude du signal en fonction des bits à coder. [5]

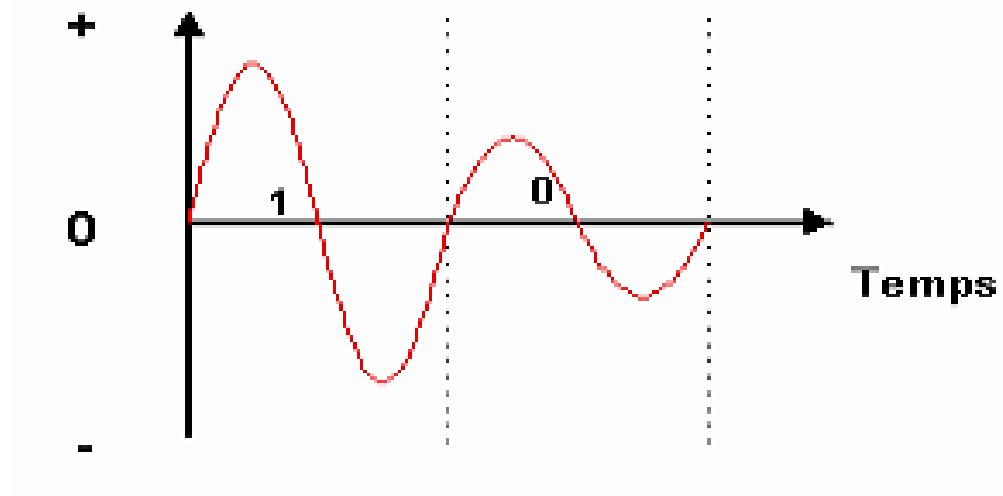


Figure 1.07 : Modélisation d'une modulation ASK

A noter que la modulation d'amplitude est la seule utilisable sur fibre optique et Li-Fi, car les équipements utilisés actuellement ne sont pas en mesure d'appliquer une autre modulation sur les ondes lumineuses. Dans ce cas, la modulation s'effectue par tout ou rien. [7]

Par contre, elle est peu employée sur d'autres supports, car elle provoque une détérioration du rapport signal sur bruit.

La technique est plus simple car la porteuse est juste multipliée par le signal numérique de débit binaire D.

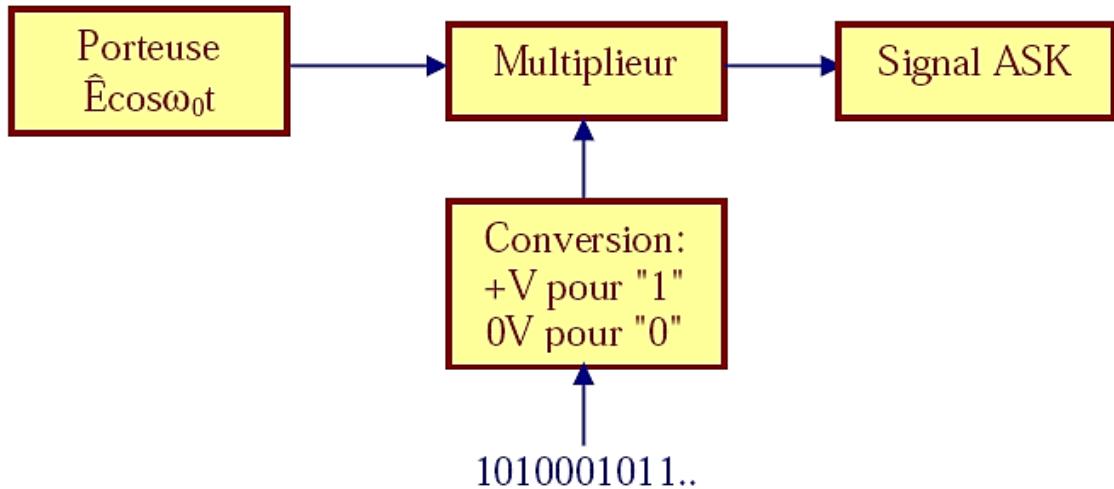


Figure 1.08 : Schéma synoptique d'une modulation ASK

En général, l'indice de modulation "m" est de 100% , on parle alors de modulation en tout ou rien ou OOK (On Off Keying). [7]

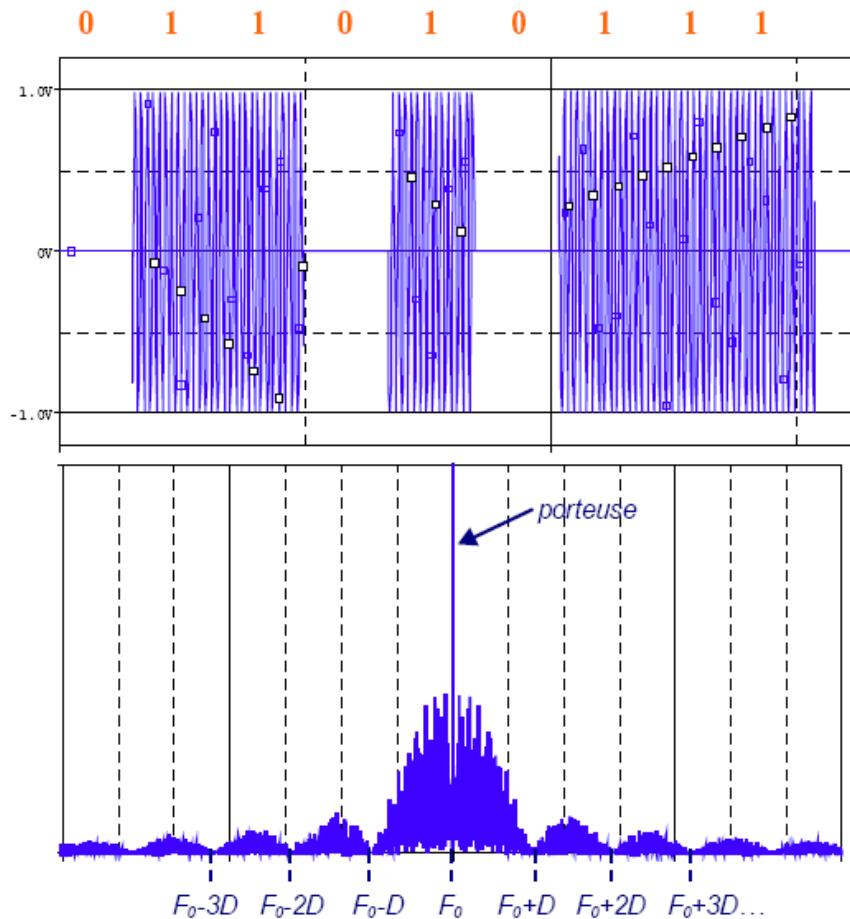


Figure 1.09 : Aspect temporel d'un signal modulé ASK

Le spectre d'un signal modulé ASK est un spectre de modulation d'amplitude classique : La porteuse est entourée de 2 bandes latérales qui correspondent au spectre des données. Le lobe

central est ainsi de largeur 2D, alors que les lobes secondaires sont de largeur moitié. Avec des données brutes (non filtrées), l'encombrement spectral est en théorie infini, ce qui est inacceptable

1.3.2 Codage de Manchester

Le codage Manchester est obtenu par le mélange (opération logique OU-exclusif) d'un signal horloge et d'un signal NRZ. De cette manière on peut, par exemple, matérialiser un "1" logique par une transition montante en milieu de période bit (T) et le "0" logique par une transition descendante. [8]

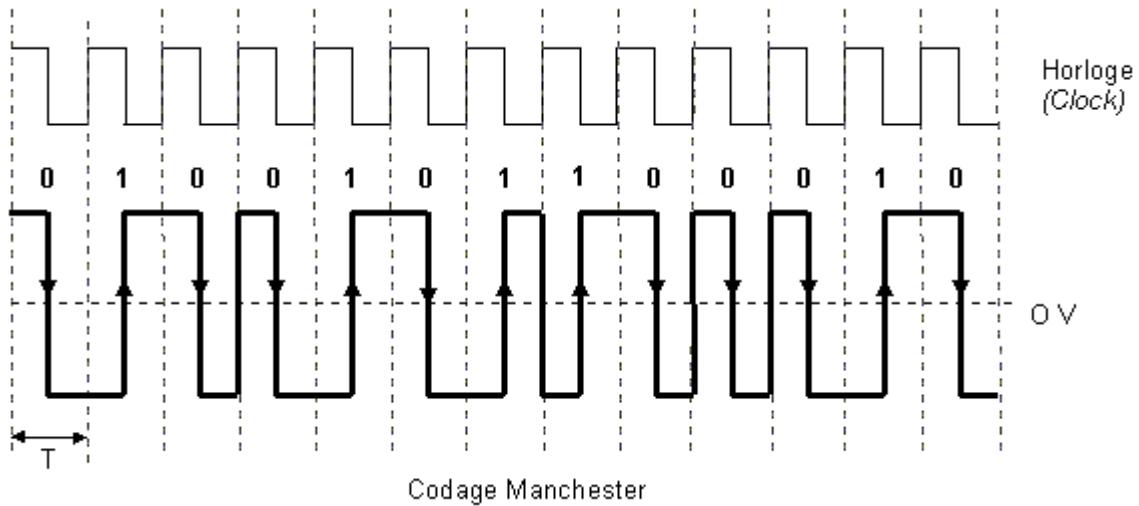


Figure 1.10 : Codage de Manchester

Principe : Dans le codage Manchester, l'idée de base est de provoquer une transition du signal pour chaque bit transmis. Un 1 est représenté par le passage de $+V$ à $-V$, un 0 est représenté par le passage de $-V$ à $+V$.

Tout comme pour le NRZ il faudra, pour des raisons évidentes, éviter les changements de polarités dans la chaîne de transmission. Le Manchester peut également être du type différentiel. Dans ce cas, on utilise la variation du sens des transitions par rapport au bit précédent. [8]

L'exemple de la figure suivante nous montre une inversion du sens des transitions du signal en milieu de période bit (durée = T) pour les valeurs "0" logiques. Par contre un "1" logique conserve le sens de la transition précédente.

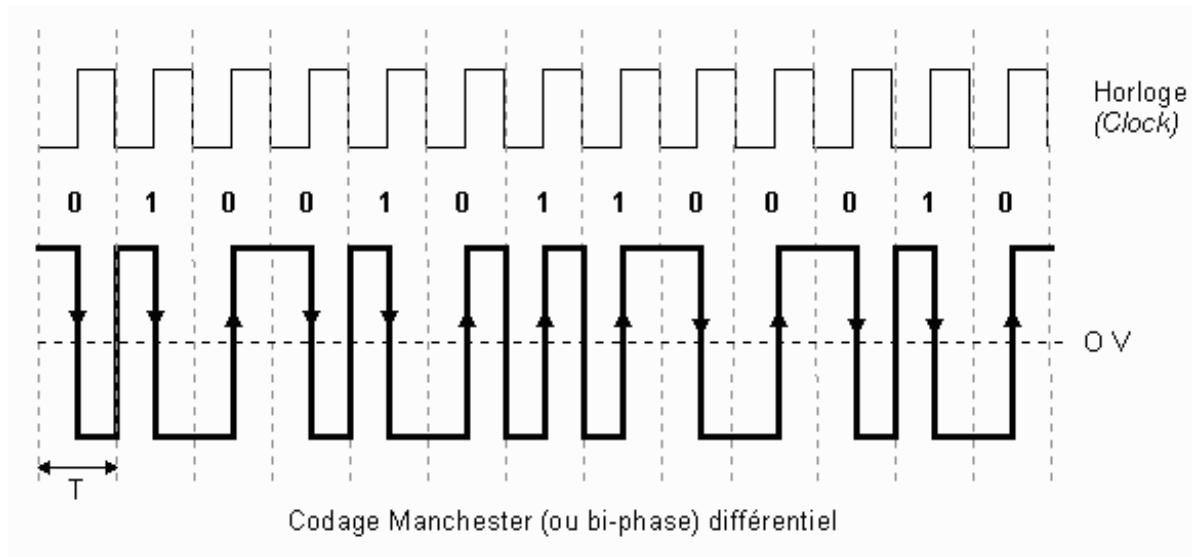


Figure 1.11 : Codage de Manchester différentiel

Les caractéristiques du code de Manchester sont les suivantes :

Le bit 0 est codé par un changement d'état en début d'horloge. Le bit 1 est codé par une conservation de l'état précédent en début d'horloge. [8]

- Il est insensible aux inversions de fils dans le câblage ;
- Pas de composante continue car la valeur moyenne est nulle : possibilité de transporter une tension d'alimentation ;
- Le spectre occupe une large bande.

Le codage Manchester n'utilise que la notion de "transitions milieu de bit" :

- La valeur binaire '0' est représentée par une transition milieu de bit montante ;
- La valeur binaire '1' est représentée par une transition milieu de bit descendante.

Le codage Manchester différentiel, quant à lui, utilise la notion de "transitions milieu de bit", mais aussi celle de "transitions fin de bit". Une transition fin de bit est une transition qui survient à la "fin" du bit. En se référant au schéma, le codage est Manchester est décrit comme suit :

- La valeur binaire '0' est représentée par une transition milieu de bit montante ;
- La valeur binaire '1' est représentée par une transition fin de bit.

Intéressons-nous maintenant plus particulièrement au code Manchester. Nous constatons qu'il existe plus de deux états possibles : transition milieu de bit descendante, transition milieu de bit montante, '0' sur la durée d'un bit, '1' sur la durée d'un bit. Seuls, les deux premiers états énumérés correspondent à des valeurs, comme nous l'avons décrit. Cela signifie que si l'émetteur reçoit un message avec des états non définis, elle sera en mesure de conclure que des erreurs se sont produites. Cette particularité est essentielle dans la gestion de collisions que nous étudierons plus tard.

1.4 Spectre de la lumière visible

La lumière visible fait partie d'un ensemble plus général des ondes électromagnétiques. Ces ondes résultent d'un champ électrique et magnétique. Elles peuvent se propager dans des milieux transparents, comme l'air ou le vide. Toutes les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide avec la même célérité, de valeur : [9]

$$C = 299\,792\,458 \text{ m/s} \pm 3.10^8 \text{ m/s}$$

On rencontre différents types d'ondes électromagnétiques, ayant des propriétés très différentes. On peut les trier selon leur fréquence f , mais dans la pratique on préfèrera manipuler leur longueur d'onde λ . Ces grandeurs sont liées par la relation :

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (1.04)$$

La longueur d'onde λ s'exprime en mètre, la célérité c en mètre par seconde, la période T en seconde, et la fréquence f en Hertz (s^{-1}).

Le spectre des ondes électromagnétiques se présente sous la forme :

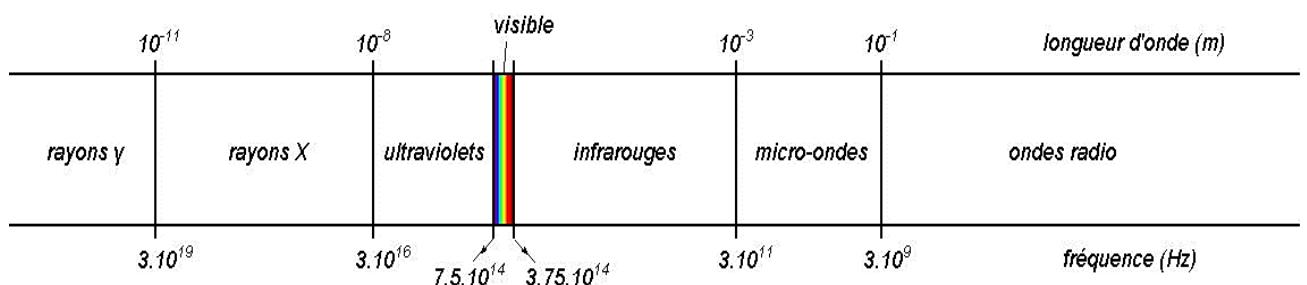


Figure 1.12 : Spectre des ondes électromagnétiques

Le visible ne constitue qu'une infime partie des radiations possibles. En se focalisant sur cette zone, on retrouve le spectre obtenu en décomposant la lumière blanche, avec un prisme, ou lors d'un arc en ciel : [9]

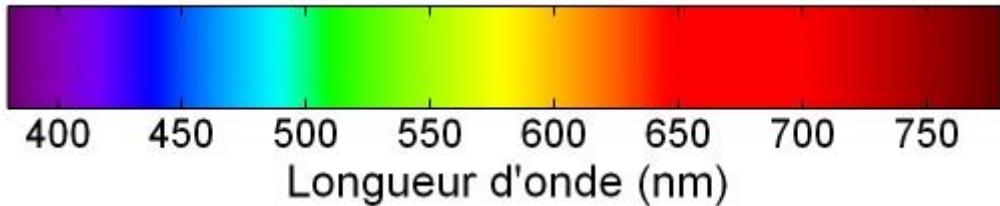


Figure 1.13 : Spectre de la lumière visible

On admet que le visible se situe entre 380 et 780 nm, soit environ 400-800 nm.

1.5 La propagation de la lumière

1.5.1 Définition de la lumière

La lumière est une onde électromagnétique caractérisée par une fréquence comprise entre $3,8 \times 10^{14}$ Hz et $7,8 \times 10^{14}$ Hz. Elle correspond donc à la propagation de champs électriques et magnétiques dans le vide et certains milieux matériels. [10]

1.5.2 La trajectoire de la lumière

Dans le vide la lumière se propage toujours de manière rectiligne en suivant une droite, c'est pourquoi on représente son trajet par un rayon lumineux en théorie, on la représente avec une droite comportant une flèche.

Dans un milieu matériel seul certains matériaux qualifiés de transparents laissent la lumière se propager. Dans un milieu transparent, la propagation de la lumière n'est alors rectiligne que si ce dernier est homogène. Un milieu est homogène s'il possède les mêmes caractéristiques en chacun de ses points comme la même composition chimique, même température et même pression.

1.5.3 La vitesse de la lumière dans le vide

Dans le vide, la lumière se propage à une vitesse constante de 300 000 km/s. Cette vitesse, aussi appelée célérité se note "c" et correspond aussi à la vitesse de propagation de toutes les autres

ondes électromagnétiques comme les ondes radios, micro-ondes, infrarouge etc
On a donc toujours comme valeur de la célérité $c = 300\ 000\ \text{km/s}$ [19]

La vitesse de la lumière est différente dans un milieu matériel transparent car dans un milieu transparent, la lumière peut se propager moins vite que dans le vide. La vitesse de propagation s'exprime alors à l'aide de la relation suivante :

$$v = \frac{c}{n} \quad (1.05)$$

Où

v : la vitesse de la lumière dans le milieu transparent (en mètre par seconde)

c : la célérité de la lumière dans le vide ($c = 300\ 000\ 000\ \text{m/s}$)

n : l'indice de réfraction (sans unité)

L'indice de réfraction est caractéristique de chaque type de milieu transparent. " n " est toujours supérieur ou égale à 1. Dans l'air $n=1$ ce qui signifie que la vitesse de propagation est la même que dans le vide.

Par contre dans l'eau $n=1,33$ et dans le verre $n=1,5$ donc dans ces milieux, la lumière se propage moins vite que dans le vide.

1.5.4 Source de lumière

Dans le monde, nous distinguons 2 types de sources de lumière :

- Les sources primaires : Le soleil, bougies, lampe à incandescence, tube fluorescent... Elles produisent la lumière qu'elles émettent. Les éclairages artificiels tendent à produire une lumière la plus voisine possible de celle du Soleil (lumière blanche) afin que notre perception des couleurs se rapproche le plus possible de celle de la lumière du jour.
- Les sources secondaires : La Lune, les planètes, l'écran d'un projecteur, etc...., absorbent la lumière produite par une source primaire et la diffusent.

La lune et les planètes du système solaire ne produisent aucune lumière. Elles renvoient en partie la lumière qu'elles reçoivent du Soleil. Ces différentes sources peuvent être des sources ponctuelles ou des sources étendues. [20]

1.5.5 Les sources courantes

L'œil voit les objets parce qu'ils nous envoient de la lumière. Il est nécessaire que cette dernière parte d'eux et arrive jusqu'à notre œil. Certains objets, comme une lampe, une bougie ou une étoile, produisent leur propre lumière. Nous allons maintenant voir les différents types d'ampoule.

1.5.5.1 La fluorescence

Pour le tube fluorescent, le courant génère une décharge par les atomes de mercure en vapeur qui émettent l'énergie ultraviolet invisible. Cette énergie est absorbée par le phosphore à l'intérieur du tube. Cela émet de la lumière visible.

1.5.5.2 La lumière incandescence

Après échauffement, certains corps émettent de la lumière, ce phénomène s'appelle l'incandescence. Pour les sources incandescentes, on doit fournir beaucoup d'énergies afin d'obtenir une lumière acceptable.

1.5.5.3 Les lampes halogènes

Ces sont également des lampes à incandescence mais l'ampoule contient des vapeurs de brome ou d'iode qui permet aux fragments de tungstène de se détaché du filament et de s'y redéposer. Le filament se dégrade moins vite et autorise un échauffement beaucoup plus important, produisant une lumière plus forte et plus blanche qu'une lampe ordinaire. En plus, l'ampoule ne noircit pas. La puissance varie entre 20 à 500Watts.

1.5.5.4 Les Lampes Fluo Compacts (CFL)

Ces lampes « basse énergie » sont une variante moins encombrante des tubes fluorescents. Le tube est disposé en cercle ou en U. Parfois, il est enveloppé en verre plus mince et plus court. Certains modèles possèdent un régulateur électrique de courant pour éviter le clignotement à l'allumage.

1.5.5.5 Les lampes à LED

C'est souvent un ensemble de LED (Light-Emitting Diode). Elle constitue un dispositif semi-conducteur au silicium qui est traversé par un courant très faible (quelques milliampères) et une tension à partir 3,5V. Les LED (Light-Emitting Diode) fournissent une lumière très forte. Les diodes utilisées dans l'éclairage, le dispositif émetteur, diffuse de la lumière selon un angle de 120°.

1.5.6 Caractéristiques d'une transmission de la lumière dans l'air

La transmission de données sur un support physique se fait par propagation d'un phénomène vibratoire. Il en résulte un signal ondulatoire dépendant de la grandeur physique que l'on fait varier :

- Dans le cas de la lumière, il s'agit d'une onde lumineuse ;
- Dans le cas du son, il s'agit d'une onde acoustique ;
- Dans le cas de la tension ou de l'intensité d'un courant électrique, il s'agit d'une onde électrique.

1.5.6.1 Signal et bruit

Toute transmission implique la superposition au signal transmis de perturbations non désirées, appelées « bruits » ou « parasites ». [21]

Le rapport signal sur bruit est le quotient sans dimension de la puissance du signal P_S sur celle du bruit P_B :

$$r_{SB} = \frac{P_S}{P_B} \quad (1.06)$$

Avec

P_S : Puissance du signal (W)

P_B : Puissance du bruit (W)

On peut aussi exprimer ce rapport en décibels :

$$r_{SB} = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_B} \right) \quad (1.07)$$

P_s : Puissance du signal (W)

P_B : Puissance du bruit (W)

r_{SB} : Rapport signal bruit (dB)

1.5.6.2 Atténuation de la lumière dans l'air

L'atténuation est la perte d'énergie que subit le signal pendant sa propagation. L'atténuation en décibel est définie par :

$$A = -10 \log \left(\frac{P_s (\text{reçu})}{P_s (\text{émis})} \right) \quad (1.08)$$

Notons que :

$$A = \alpha \cdot d \quad (1.09)$$

Avec :

A : Atténuation du signal (dB)

α : Coefficient d'atténuation linéaire ($\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$)

d : Distance parcourue par le signal (m)

Au fur et à mesure que la lumière s'éloigne de sa source, son amplitude diminue. Cette décroissance est due à la dispersion spatiale. Comme nous le constatons le même phénomène avec les phares de nos voitures. [23]

D'où on peut tirer la conclusion qu'il faut concentrer au maximum le faisceau au départ pour augmenter la portée. Parallèlement plus on concentre, plus on est directif.

Sur le schéma ci-contre, on mesure que plus on s'éloigne, plus la surface interceptée augmente donc la densité de puissance diminue.

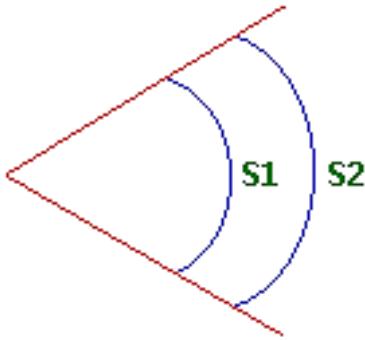


Figure 1.14 : Grandeur de rayonnement en fonction de l'angle

On peut quantifier cela facilement :

$$E = \frac{P}{4 \cdot \Pi \cdot d^2} \quad (1.10)$$

E = Densité de puissance du flux en W.m^{-2}

P = Puissance en W

d = distance en m

On pourra définir un nouveau terme appelé » Atténuation de parcours en espace libre" par :

Path loss (perte de parcours) en dB.

$$Ploss = 10 \log \left(\frac{4 \cdot \Pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 \quad (1.11)$$

Avec :

d = distance en m

Ploss = Atténuation de parcours en espace libre en dB

λ = longueur d'onde en mètre

L'affaiblissement de propagation, aussi connu comme affaiblissement de parcours ou par son nom anglais de Path loss, caractérise l'affaiblissement que subit la lumière lorsqu'elle parcourt une distance. Cet affaiblissement est dû à la dispersion de la puissance, mais également aux obstacles rencontrés sur le chemin : précipitations et autres bloquant, dispersant, réfléchissant ou réfractant le signal

1.6 Facteurs considérés lors du choix d'une source de lumière

Selon Ian Rowbottom, il y a certains facteurs très importants qu'on doit considérer afin de sélectionner une source de lumière pour une application donnée. [25]

1.6.1 L'efficacité

C'est la mesure de la conversion de l'énergie électrique (Watts) en une lumière (Lumens). Les LED offrent une très haute efficacité suivie par les Lampes Fluo Compacts. Tandis que les lampes d'incandescence et de l'halogène ont une efficacité plus basse.

Théoriquement, l'efficacité maximale pour un LED est de 683 lumens/watt mais en pratique, elle est voisine de 60 lumens/watt.

1.6.2 La performance de couleur

Le CRI est une mesure quantifiant la capacité de la source lumineuse à reproduire les couleurs d'un objet comparé à celles données par la lumière des jours.

Le tableau suivant donne quelques indications de la valeur du CRI en fonction du type de source choisi.

Source de la lumière	CRI
Le soleil	100
Incandescence	100
Halogène	100
CFL	82
LED	80

Tableau 1.03 : Les valeurs CRI pour les différentes sources de la lumière

1.6.3 La contrôlabilité

Elle peut être considérée comme étant la capacité d'allumer et d'éteindre suivant un temporisateur ou un capteur. En comparant avec tous les autres types, les lampes à LED sont les plus stables vis-à-vis de ce facteur.

1.6.4 La durée de vie et le coût

Le tableau ci-dessous nous montre le prix, la puissance ainsi que la durée de vie de différentes sources de lumière pour 10 ans, utilisées 3 heures pendant 365 jours par année cela pour étudier le rapport qualité prix de chaque lampe.

Lampe	Prix (en Ar)	La puissance utile (W)	Durée de vie (h)
Incandescence	3.500	60	1000
Halogène	10.000	40	3000
CFL	20.000	15	12000
LED	30.000	15	25000

Tableau 1.04 : Le coût et la durée de vie des lampes pour la décennie

1.7 Les détecteurs de lumière

Les détecteurs de lumière sont les corps qui réagissent à la lumière.

1.7.1 L'œil

Il reçoit les 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 comme les cônes et bâtonnets transmettent au cerveau un influx nerveux.

1.7.2 Les détecteurs photochimiques

Ce sont des substances chimiques qui réagissent sous l'action de la lumière

Ex : les sels d'argent des pellicules photographiques qui noircissent sous l'effet de la lumière.

1.7.3 Les détecteurs photo électroniques

Ce sont des composants électroniques qui ont un comportement qui dépend de la lumière reçue ainsi que de la température de la cellule. Les appareils photographiques et les caméscopes par exemple utilisent ces composants.

1.7.4 Les photodiodes

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 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 qui est souvent intégré à la même puce. Les caractéristiques du composant ainsi formé deviennent alors celles de l'ensemble photodiode plus celui de l'amplificateur.

1.7.5 Les phototransistors

Le phototransistor est la combinaison la plus simple d'une photodiode et de son amplificateur. En dirigeant la lumière sur la jonction collecteur-base (qui est polarisée en inverse), on génère un courant de base d'origine photonique qui est amplifié par le gain en courant β du transistor. Si la base est accessible de l'extérieur, une polarisation du transistor est possible.

On a :

$$IE = (Ip + IB)(\beta + 1) \quad (1.12)$$

Avec

Ip : courant base d'origine photonique

IB : courant de base extérieur

IE : courant émetteur

β : Gain en courant du transistor

On remarque que la sensibilité et la réponse du phototransistor varient avec le gain du transistor. La vitesse de réponse du phototransistor est très inférieure à celle d'un transistor équivalent.

1.7.6 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.

1.7.7 Les photo-Thyristor

Le schéma équivalent du thyristor à l'aide de deux transistors NPN et PNP permet de mieux saisir le mécanisme d'amorçage. Le courant d'origine photonique généré dans la jonction collecteur-base du transistor NPN provoque la conduction de celui-ci entraînant l'amorçage du thyristor de manière identique à un courant injecté dans la gâchette.

1.7.8 Les photo-coupleurs

Les photo-coupleurs ou coupleurs optoélectroniques sont des composants intégrant dans le même boîtier une diode émettrice infrarouge et une photo détectrice (phototransistor par exemple). Ces deux éléments sont couplés optiquement mais sont électriquement isolés.

1.7.9 Les cellules photovoltaïques

Elles présentent une combinaison de plusieurs photodiodes et formant ainsi un panneau solaire, appelé aussi module photovoltaïque (module PV).



Figure 1.15 : Cellules photovoltaïques

1.8 Notions de base sur les photodiodes

1.8.1 Définition

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique.

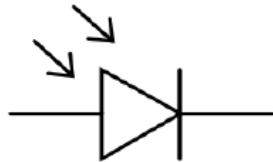


Figure 1.16 : Symbole de la photodiode

1.8.2 Propriété

Le matériau de base pour la fabrication des photodiodes sensibles dans le domaine visible ou le proche infrarouge, est le silicium. La structure PIN est la plus répandue. Elle consiste à intercaler entre la zone N et la zone P, d'une jonction PN classique, une zone intrinsèque "I" ou très faiblement dopée. [25]

L'intérêt d'une telle structure réside, pour les fabricants, dans le fait qu'il est possible de résoudre au mieux le compromis sensibilité-rapidité en jouant sur les caractéristiques de cette zone I.

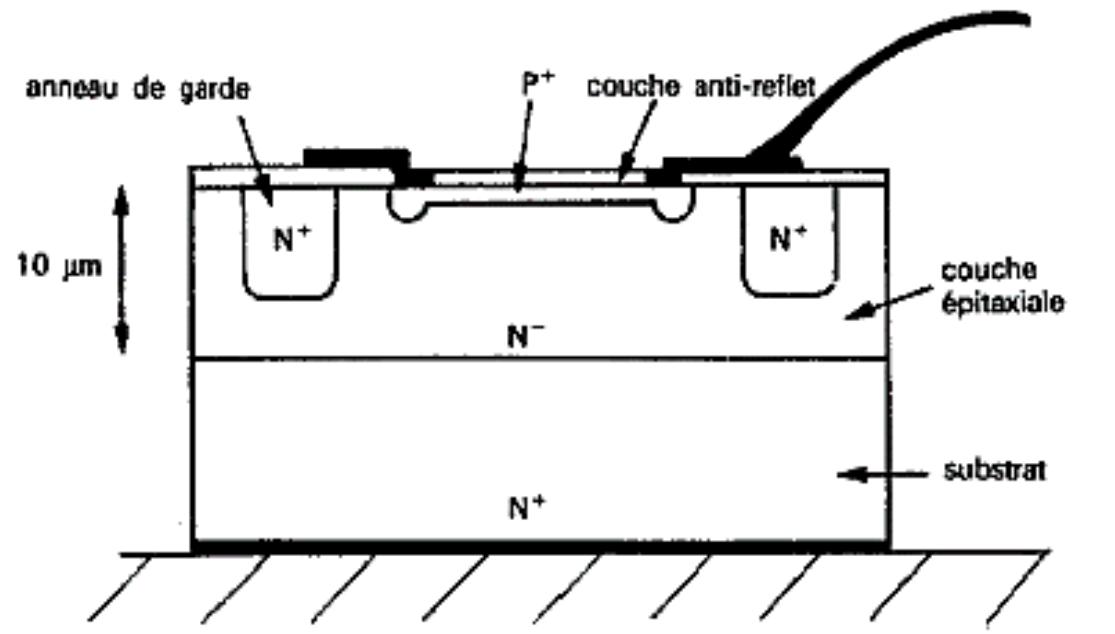


Figure 1.17 : Coupe d'une photodiode

Comme nous nous le voyons sur la coupe d'une photodiode PIN au silicium, obtenue par épitaxie d'une couche résistive (N^-) et diffusion localisée d'une mince zone fortement dopée (P^+), qui après les opérations de métallisation, est recouverte d'une couche anti-reflet.

1.8.3 Fonctionnement

En l'absence d'éclairement, le courant qui traverse la jonction est uniquement d'origine thermoïonique. Il est appelé courant d'obscurité ID (dark current). Sous l'éclairement, le bombardement photonique provoque la génération de paires électrons trou au voisinage de la jonction, qui conduisent à l'accroissement du courant inverse ($IR = ID + IP$), et ce proportionnellement à l'intensité du flux incident. De tels dispositifs peuvent donc être utilisés pour la mesure quantitative de la lumière.

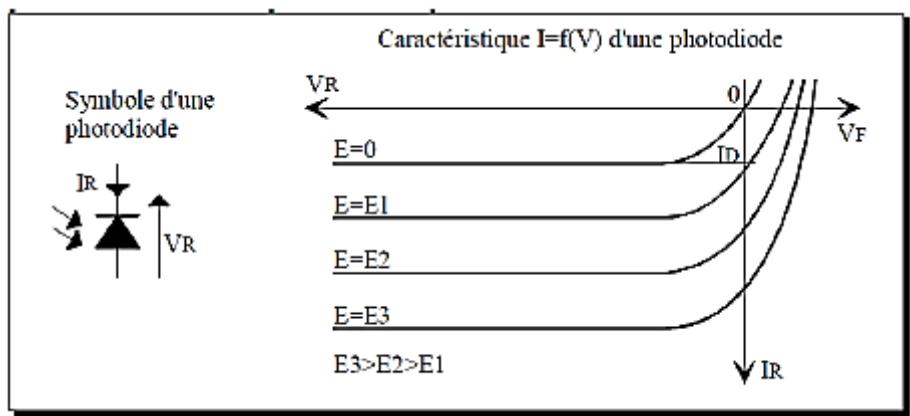


Figure 1.18 : Caractéristique d'une photodiode

Les photodiodes se présentent sous des boîtiers variés (rond D=5mm), qui permettent bien sûr la traversée au flux incident vers la jonction. Certains de ces boîtiers sont équipés de filtres optiques, essentiellement des filtres infrarouges. Ces filtres infrarouges augmentent la sélectivité spectrale des photodiodes dédiées aux applications utilisant des diodes électroluminescentes infrarouges. [2] [26]

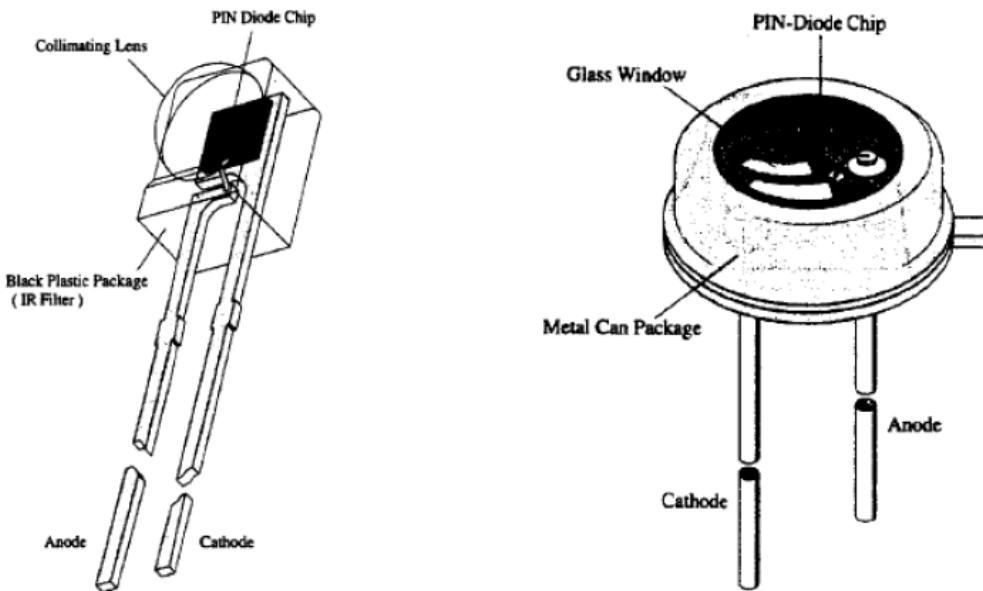


Figure 1.19 : Architecture d'une photodiode

Une photodiode possède plusieurs modes de fonctionnement, suivant la structure du circuit, dans lequel elle est placée. La photodiode est polarisée en inverse. Le courant inverse IR est alors proportionnel au flux incident E, au courant d'obscurité ID près. Les avantages de cette polarisation sont l'obtention d'une bonne linéarité, des temps de réponse courts et une bande passante étendue. [2] [26]

1.8.4 Temps de réponse de la photodiode

La photodiode est un composant rapide, ce qui impose l'emploi d'une source lumineuse rapide pour tester son temps de réponse. Dans cette expérience quantitative, on ne pourra qu'établir une limite supérieure sur le temps de réponse. Une diode électroluminescente à forte luminosité convient à cette expérience. Choisir impérativement une DEL rouge de haute luminosité.

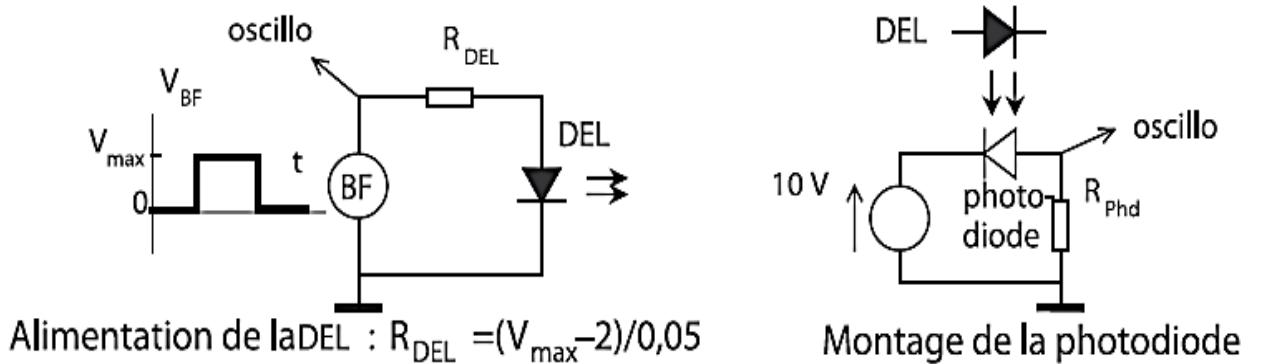


Figure 1.20 : Montage de la photodiode

La figure de gauche indique comment alimenter la diode électroluminescente (DEL) :

- La photodiode ne supporte pas les tensions négatives : utiliser des signaux carrés avec décalage ;
- La photodiode supporte des courants de 50 mA au maximum et la tension à ses bornes lorsqu'elle éclaire vaut approximativement 2 V. Donc pour contrôler le courant qui la traverse il faut choisir $V-MAX>>2V$ et prendre R_{DEL} en conséquence (on réalise ainsi un générateur de courant).

Enfin, vérifier que le temps de montée des signaux carrés données par le générateur BF ne dépasse pas 0,1 μ s, sinon prendre un autre BF. [2] [26]

1.8.5 Application

En association avec une LED infrarouge, les utilisations les plus courantes sont dans la communication et la robotique avec le cas du suiveur de ligne (ligne noire sur fond blanc) ou de la détection d'obstacle sur de courtes distances. L'utilisation des photodiodes est représentée dans le tableau suivant :

Caméras	Médical	Communication	Industrie	Equipement de sécurité
Autofocus Le contrôle du flash	Analyse des particules de sang Scanneur X	La liaison des fibres optiques Communication sur onde visible (Li-Fi) Les télécommandes	Scanneur des codes-barres	Détecteur de la fumée

Tableau 1.05 : Application des photodiodes

1.8.6 Exemple de montage de la photodiode

Montage d'une photodiode dans un circuit de trans-impédance

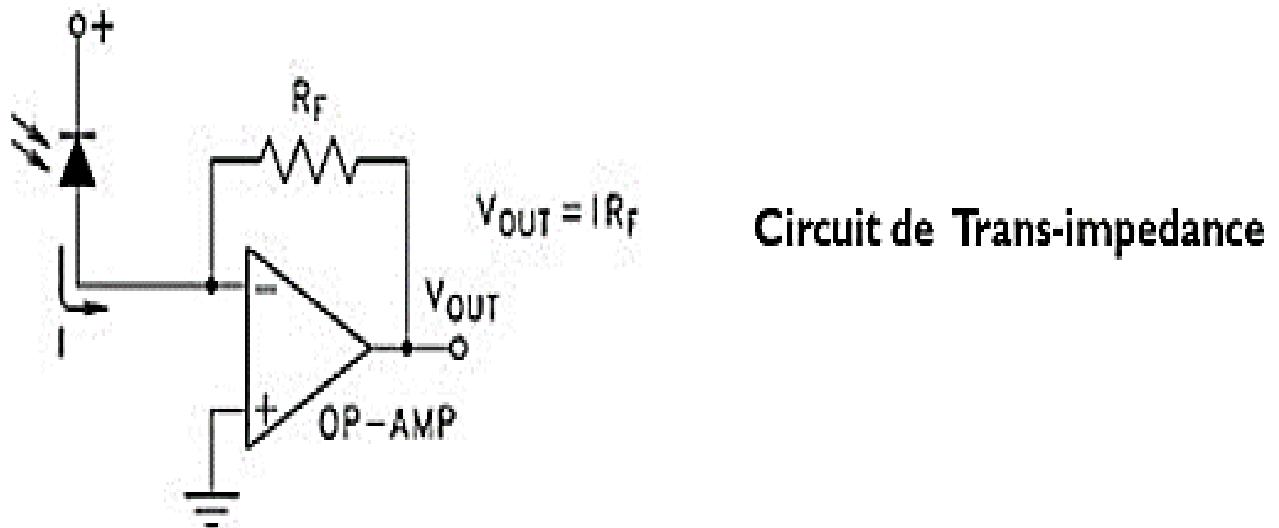


Figure 1.21 : Montage d'un circuit Trans-impédance

Montage d'une photodiode dans un circuit de mesure de la lumière

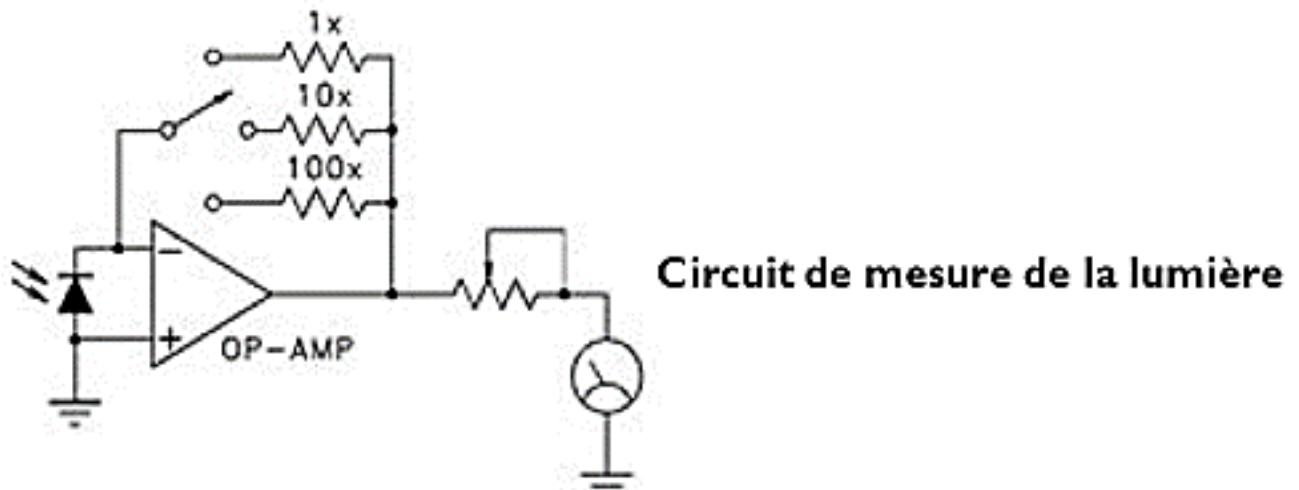


Figure 1.22 : Montage d'un circuit de mesure de la lumière

Montage d'une photodiode dans une transmission par onde visible

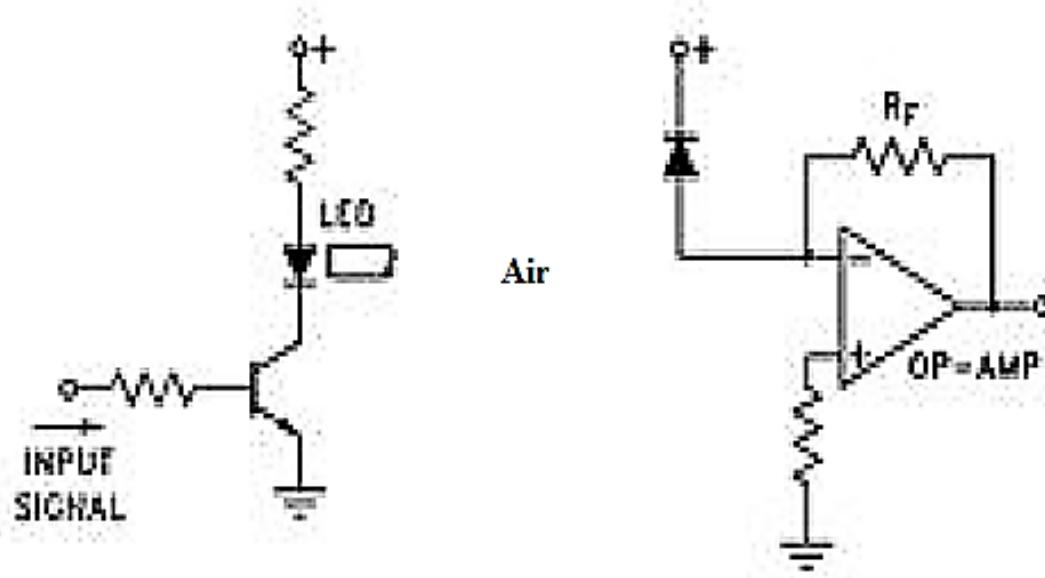


Figure 1.23 : Montage d'une transmission par onde visible

1.9 Énergie rayonnante et Grandeur radiatives

L'énergie radiative est transmise d'un corps à un autre par des ondes électromagnétiques qui se déplacent à la vitesse de la lumière. La radiation est caractérisée par sa longueur d'onde λ , qui est la distance entre deux crêtes successives de l'onde. La plupart des radiations émises par le Soleil ont des longueurs d'onde entre 0.3 et 4 μm . C'est la radiation solaire ou ondes courtes.

La radiation émise par l'atmosphère, radiation terrestre ou ondes longues, se situe dans l'intervalle de fréquences de 4.0 à 200 μm . [4]

Pour bien décrire la radiation nous avons besoin de connaître quelques définitions qui décrivent l'énergie rayonnante :

- L'énergie rayonnante Q est la quantité d'énergie transportée par l'onde. Elle est exprimée en joules (J) ;
- La puissance ou flux d'énergie ϕ est la quantité d'énergie émise par une source ponctuelle par unité de temps dans toutes les directions. On l'exprime en watts (W) ;
- L'intensité énergétique I d'une source ponctuelle dans une direction donnée θ est la portion du flux énergétique rayonnée dans cette direction.

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (1.13)$$

Où ω est l'angle solide à travers lequel la puissance est rayonnée. Un angle solide peut se représenter par un cône ayant une ouverture donnée. Il se mesure en stéradians. Il y a 4π radians dans une sphère. L'intensité énergétique est donc exprimée en watts par stéradian (W.sr⁻¹).

- La luminance énergétique L est l'intensité émise par unité de surface apparente selon la direction θ pour une source non ponctuelle de superficie dA rayonnant à travers l'angle solide ω . Elle est parfois désignée par le terme anglais *radiance*. On l'exprime par :

$$L = \frac{d\phi}{d\omega dA \cos \theta} = \frac{I}{dA \cos \theta} \quad (1.14)$$

Les unités employées sont des watts par mètre carré par stéradian (W.m⁻².sr⁻¹).

La surface apparente $dA \cos \theta$ correspond à la projection, dans le plan perpendiculaire à la direction visée θ , de la surface dA considérée. Si l'énergie émise par un corps dans une direction est proportionnelle à $\cos \theta$, alors la luminance d'un tel corps est indépendant de la direction d'émission : ces corps sont dits lambertiens. Une feuille de papier mat est un exemple de surface lambertienne. [5]

- L'exitance énergétique M est la puissance totale ϕ_e émise dans un hémisphère par unité de surface de la source. On emploie aussi le terme anglais emittance. L'exitance s'exprime par :

$$M = \frac{d\phi_e}{dA} \quad (1.15)$$

Elle se mesure en watts par mètre carré (W m^{-2}). Si la source est lambertienne, l'exitance sera égale à la luminance multipliée par π , ce qui correspond à l'intégration de $\cos\theta$ sur un hémisphère.

- L'éclairement énergétique E , parfois aussi appelé irradiance, est la puissance totale hémisphérique ϕ_i incidente par unité de surface. Sa définition ressemble à celle de l'exitance, sauf qu'elle concerne le rayonnement reçu au lieu du rayonnement émis. On l'exprime par les mêmes unités (W.m^{-2}) et on le définit par :

$$E = \frac{d\phi_i}{dA} \quad (1.16)$$

Dans le cas d'une surface terrestre, l'éclairement est fourni essentiellement par le rayonnement solaire, après diffusion et atténuation partielle par l'atmosphère. En un lieu donné, il varie essentiellement en fonction de l'angle solaire, donc de l'heure, de la saison et de la latitude du lieu. La topographie locale, plus particulièrement la pente et l'exposition sont également des facteurs importants de variation de l'éclairement solaire. [5]

Comme l'énergie rayonnante est constituée d'un spectre continu de fréquences, toutes les quantités définies ci-dessus s'appliquent aussi à chaque longueur d'onde. On parle alors de quantités spectrales. Nous définissons ainsi la luminance (radiance) et l'éclairement énergétique (radiance), par exemple, par :

$$L = \int_0^{\infty} L_{\lambda} d\lambda \quad \text{Et} \quad E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda \quad (1.17)$$

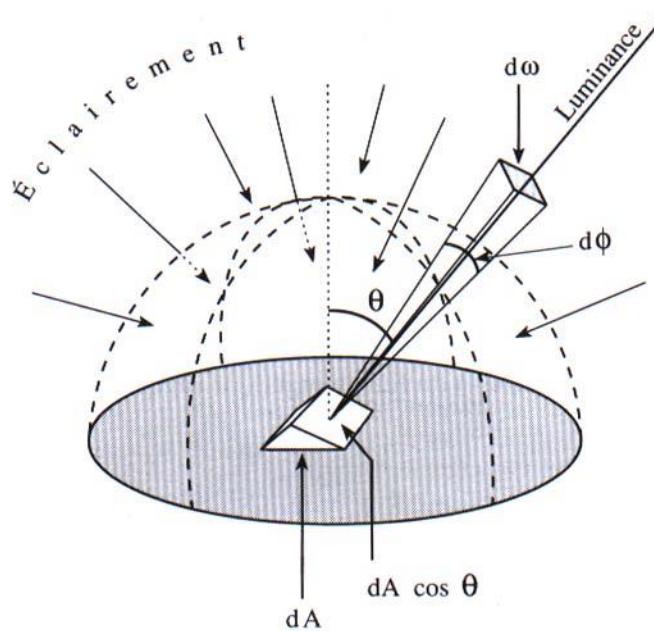


Figure 1.24 : Schéma illustrant les notions d'éclairement et de luminance énergétique

1.10 Lois fondamentales de la radiation

L'interaction entre la matière et la radiation peut se faire par extinction et émission. Si l'intensité de la radiation décroît, il y a extinction de la radiation ; si l'intensité augmente, on a de l'émission. Un photon peut disparaître parce qu'il a été absorbé ou diffusé. Si le photon ne disparaît pas, alors, il a été transmis à travers la matière.

La somme de l'énergie transmise, diffusée et absorbée doit être égale à la quantité d'énergie incidente (conservation d'énergie). Soit a_λ , r_λ , t_λ respectivement la fraction d'énergie absorbée, réfléchie ou diffusée et transmise. On a alors :

$$a_\lambda + r_\lambda + t_\lambda = 1 \quad (1.18)$$

Quand la matière est un gaz très dilué, l'absorption de la radiation est spectrale et seulement certaines longueurs d'onde sont absorbées. Les lignes spectrales sont caractéristiques des gaz et correspondent à des changements des niveaux d'énergie (énergie électronique, de vibration ou de rotation) qui, comme la mécanique quantique a démontré, sont des niveaux discrets.

Un changement d'énergie correspond à l'émission ou à l'absorption d'un électron. Dans le cas des liquides et des solides, les molécules sont tellement proches que l'absorption ou l'émission se fait plutôt par bandes.

Une molécule qui absorbe la radiation d'une certaine longueur d'onde émet aussi dans la même longueur d'onde. Le taux d'émission dépend seulement de la température de la matière et de la longueur d'onde. La loi de Kirchoff dit que :

$$\frac{E_\lambda}{a_\lambda} = f(\lambda, T) \quad (1.19)$$

C'est-à-dire, le rapport entre l'énergie émise et l'absorptivité dépend seulement de la température et de la longueur d'onde. [4]

Si on définit l'émissivité comme le rapport entre la radiation émise par la substance et le maximum de radiation émise à la même température et longueur d'onde (radiation émise par un corps noir), on obtient :

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{f(\lambda, T)} \quad (1.20)$$

Ces deux équations permettent d'écrire la loi de Kirchoff dans la forme qui nous est familière :

$$\varepsilon_\lambda = a_\lambda \quad (1.21)$$

Celle-ci nous dit que l'absorptivité et l'émissivité d'une substance sont égales. Un bon émetteur de radiation de longueur d'onde est aussi un bon absorbeur. Cette équation nous montre aussi que l'émission est possible seulement dans les longueurs d'onde où il y a de l'absorption.

Si l'absorption varie avec la longueur d'onde, l'émission aussi. Cette loi est valide seulement dans des régions où on peut admettre qu'il existe un équilibre thermodynamique local.

Cet équilibre est possible seulement dans le cas où il existe un nombre assez élevé de molécules. Dans l'atmosphère, à des altitudes supérieures à 50 km, la condition d'équilibre radiatif local n'est pas remplie.

Un corps qui émet le maximum d'énergie possible à chaque température et à chaque longueur d'onde est un corps noir. Dans le cas d'un corps noir, $a_\lambda = 1$, $r_\lambda = t_\lambda = 0$. Un corps noir est caractérisé par les propriétés suivantes :

1. L'énergie rayonnante est déterminée uniquement par la température du corps émetteur.
2. Pour une température donnée, l'énergie émise est le maximum possible pour chaque longueur d'onde.
3. Le rayonnement émis est isotrope.

La loi de Planck permet de calculer l'existence monochromatique M_λ du corps noir dans chaque bande de fréquence $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ et d'en déduire la répartition spectrale de la puissance rayonnée.

$$M_\lambda = c_1 \lambda^{-5} / (\exp(c_2/\lambda T) - 1) \quad (1.22)$$

Où $c_1 = 3.74 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$ et $c_2 = 14385 \mu\text{m K}$ si λ est exprimé en μm et la température T en Kelvin.

En posant $x = \lambda T$, on a :

$$M_{x=\lambda T} = c_1 x^{-5} T^5 / (\exp(c_2/x) - 1) = T^5 f(\lambda T) \quad (1.23)$$

Il en résulte que l'ensemble des spectres donnant l'exitance M_λ en fonction de λ , pour diverses valeurs du paramètre T , se réduit à un spectre unique obtenu en traçant la courbe

$$M_{xT}/T^5 = f(\lambda T) \quad (1.24)$$

Cette courbe présente un maximum pour :

$$\lambda T = 2898 \mu\text{K} = \text{constante} \quad (1.25)$$

Cette constante est appelée la constante de Wien.

L'intégration de la loi de Planck sur toutes les longueurs d'onde nous donne l'exitance totale du corps noir.

$$\int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} c_1 \lambda^{-5} / (\exp(c_2/\lambda T) - 1) d\lambda = \sigma T^4 \quad (1.26)$$

Où $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann.

La courbe suivante nous montre la valeur de la longueur d'onde en fonction de l'exitance.

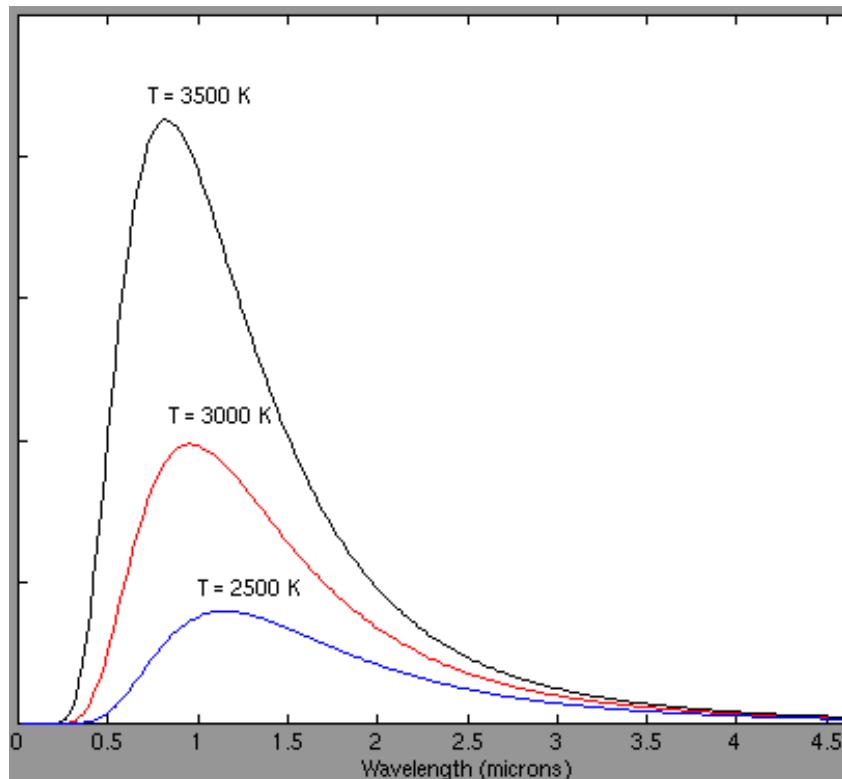


Figure 1.25 : Courbe d'exitance

1.11 Conclusion

Une LED est utilisée comme un émetteur tandis que le récepteur est à base d'une photodiode. Les travaux rapportés dans ce mémoire, en grande partie, en présente les expériences que nous avons menées au long de la recherche. Dans le premier chapitre on aborde les généralités concernant la lumière et les composants électroniques associés à son exploitation. Nous avons montré qu'une LED est bien adaptée comme un émetteur LI-FI.

CHAPITRE 2

GENERALITES SUR LE LI-FI

2.1 Introduction

Le Li-Fi ou Light Fidelity, aussi appelé VLC ou Visible Light Communications est un terme inventé par Harald Haas. Une LED ou diode électroluminescente est une diode émettrice de lumière. Le Li-Fi ou Light Fidelity est une innovation technologique et écologique.

Grâce au Li-Fi, une lumière à LED peut transmettre à distance un contenu multimédia comme : vidéo, son, géolocalisation, ... à une tablette ou à un smartphone. [27]

2.2 Présentation de la technologie Li-Fi

La technologie Li-Fi (Light Fidelity) est un système de transmission de données sans fil qui utilise la lumière comme vecteur de communication.

Un exemple de déploiement est représenté ci-dessous :



Figure 2.01 : Modèle de transmission d'un Li-Fi

Cette solution de transmission ne se positionne pas comme concurrente mais complémentaire des Technologies actuelles.

Nous avons quelques exemples d'applications de la transmission par onde visible possibles qui sont représentés ci-dessous :

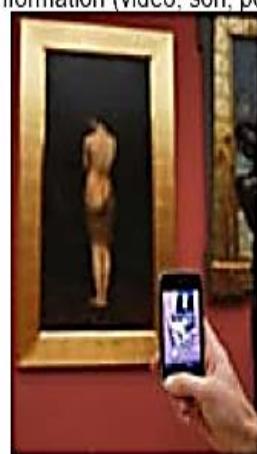
Géolocalisation en intérieur



Communication entre véhicules: transmission de distances, vitesse, sens de déplacement ...



AudioGuide du futur : transmission contextualisée d'information (vidéo, son, pdf ..)



Réception sans fil dans des zones sensibles



Figure 2.02 : Exemples d'applications du Li-Fi

2.3 La technologie Li-Fi

Le Li-Fi ou Light Fidelity est une technologie de communication sans fil basée sur l'utilisation de la lumière visible comprise entre la couleur bleue et la couleur rouge. Alors que le Wi-Fi utilise la partie radio du spectre électromagnétique, le Li-Fi utilise quant à lui le spectre optique. Le Li-Fi consiste à moduler la lumière visible émise par une lampe l'éteindre et l'allumer des milliers de fois par seconde, pour envoyer une suite de "0" et de "1" représentant des informations numériques. Ces changements de fréquence extrêmement rapides ne sont pas visibles par l'œil humain.

Le démarrage du Li-Fi est une conséquence directe de la migration de l'éclairage vers les lampes à LED, dispositifs électroniques qui se prêtent à la modulation à haute fréquence. La figure suivante résume le fonctionnement de chaque étape de la transmission Li-Fi.

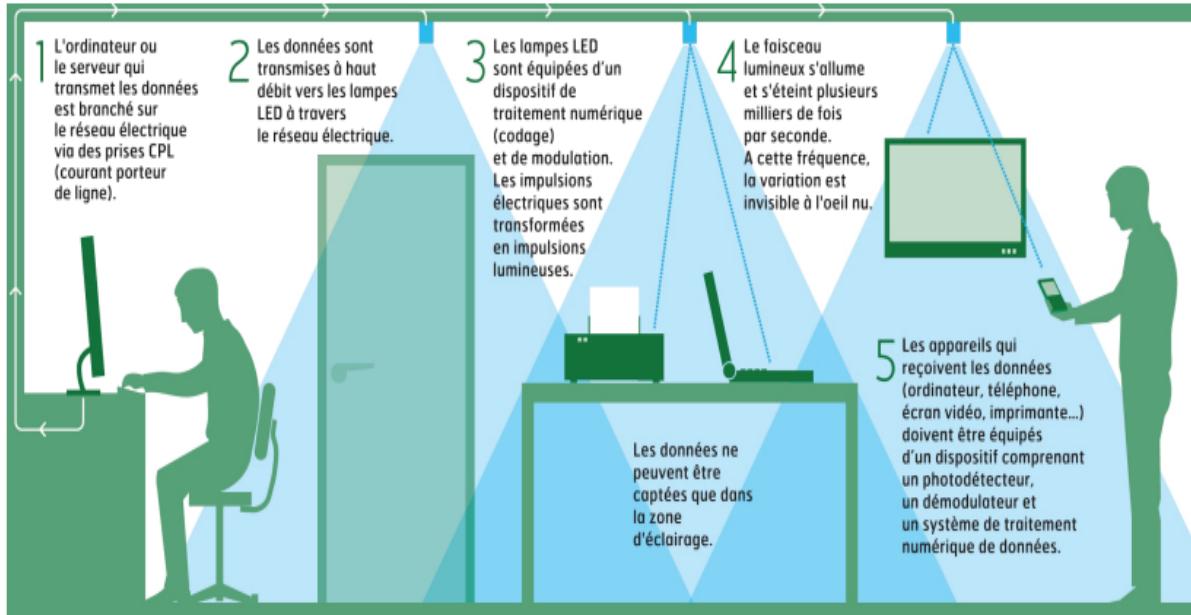


Figure 2.03 : Fonctionnement du Li-Fi

Le Li-Fi est basé sur l'utilisation de la lumière visible comprise entre la radiation 480 nm de longueur d'onde, soit 670 THz perçue comme le bleue et la radiation 650 nm, soit 460 THz qui est perçue comme le rouge.

Alors que le Wi-Fi utilise une partie radio du spectre électromagnétique hors du spectre visible, le Li-Fi utilise la partie visible ou optique du spectre électromagnétique.

Le Li-Fi utilise des ampoules LEDs pour fonctionner. En effet ces ampoules possèdent une intensité lumineuse modulable à de très grande vitesse et donc non visible à l'œil nu.

Ces variations d'intensité sont captées par un photo-détecteur. Ensuite, elles sont converties en signal électrique puis au format binaire pour pouvoir être interprétées par nos équipements.

Le principe du Li-Fi repose sur le codage et l'envoi de données via la modulation d'amplitude des sources de lumière (scintillation imperceptible à l'œil), selon un protocole bien défini et standardisé.

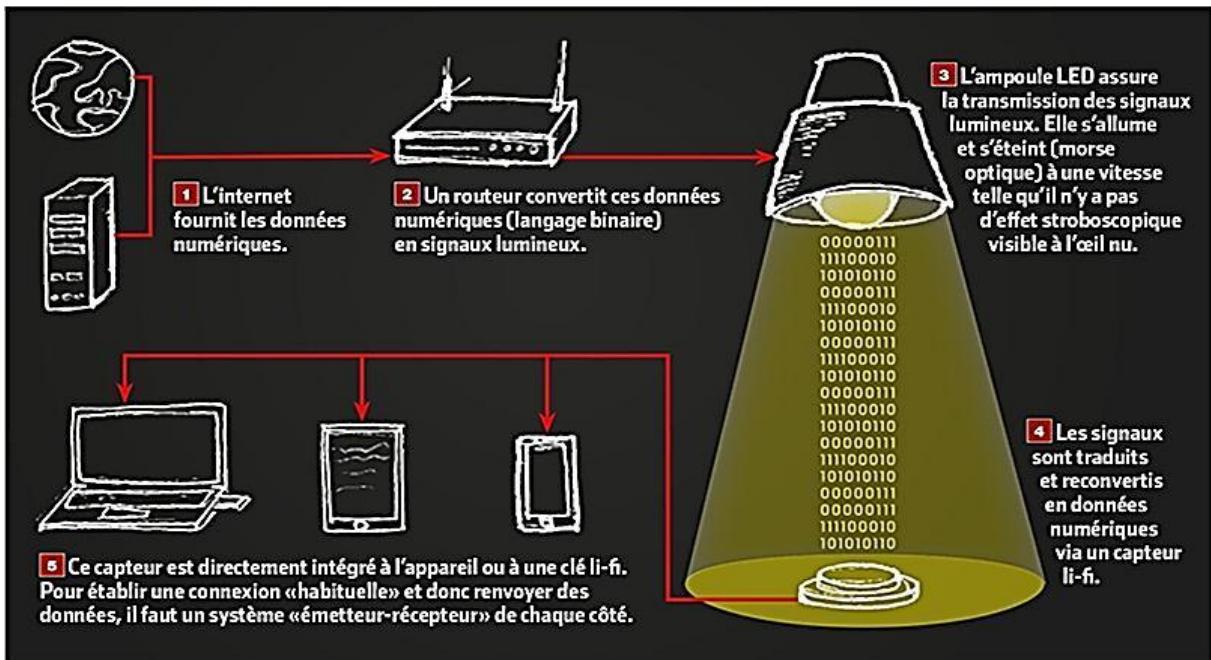


Figure 2.04 Architecture réseau du Li-Fi

Le Li-Fi se différencie de la communication par laser, par fibre optique et de l'IrDa par ses couches protocolaires. Les couches protocolaires du Li-Fi sont adaptées à des communications sans fil jusqu'à une dizaine de mètres, soit légèrement plus que Bluetooth basse puissance, et moins que Bluetooth haute puissance ou Wi-Fi. Le comparatif de la technologie Wi-Fi et Li-Fi est exposé dans le tableau suivant. [27]

	Wi-Fi	Li-Fi
Bande passante	11Mbits/s	1Gbits/s
Bandes de fréquence	Normée à 2.4 Ghz	Libre
Portée	300m	10m
Milieu de propagation	Tous types (sauf blindage)	Environnement transparent
Sécurité	Moyen	Excellent

Tableau 2.91 : Tableau comparatif Wi-fi et Li-Fi

Au vu de ces caractéristiques, on peut voir que le Li-Fi a un fort potentiel et qu'il sera au centre de plusieurs enjeux.

2.4 Standardisation

Cette technologie de communication sans fil à courte portée bénéficie d'une normalisation sous la référence IEEE 802.15.7, dont les spécifications des couches PHY et MAC ont été publiées en 2012 et qui fait partie intégrante des normes 802.15 dédiées aux réseaux sans fil personnels (WPAN, Wireless Personal Area Networks) auxquels appartient, notamment le Bluetooth.

La communication Li-Fi est donc réalisée selon le protocole de communication établi par le comité international IEEE 802.

Ce standard définit la couche PHY et la couche MAC à adopter afin de développer des solutions compatibles à l'échelle mondiale. Le standard est capable de délivrer des débits suffisants pour transmettre de l'audio, de la vidéo et des services multimédia. Il tient également compte de la mobilité de la transmission optique, de sa compatibilité avec les éclairages artificiels présents dans l'infrastructure, des déficiences qui peuvent être causées par les interférences générées par l'éclairage ambiant.

La couche MAC permet de réaliser la liaison avec les couches hautes plus communes comme celles utilisés dans les protocoles TCP/IP. Enfin, le standard se conforme à la réglementation en vigueur sur la sécurité oculaire des usagers. Le standard définit trois couches PHY selon les débits envisagés.

La couche PHY I (de 11,67 kb/s à 266,6 kb/s) a été établie pour des applications en extérieur. La couche PHY II permet d'atteindre des débits de 1,25 Mb/s à 96 Mb/s.

La couche PHY III (de 12 Mb/s à 96 Mb/s) est appropriée lorsqu'on utilise plusieurs sources émettrices suivant une méthode de modulation particulière appelée color shift keying (CSK). Les formats de modulation préconisés pour PHY I et PHY II sont les codages On-Off Keying (OOK) et Variable Pulse-Position Modulation (VPPM).

Le codage Manchester utilisé pour les couches PHY I et PHY II englobe l'horloge dans les données transmises en représentant un "0" logique par un symbole OOK de "01" et un "1" logique par un symbole OOK de "10" avec une composante continue. Ce point est important car

la composante continue permet d'éviter l'extinction de la lumière lors d'une suite prolongée de 0 logiques.

2.5 Fonctionnement Li-Fi

Le principe du Li-Fi repose sur deux points importants : réutiliser les technologies existantes et profiter des avantages de la lumière visible.

2.5.1 *Les émetteurs*

Afin de transmettre des informations, nous utilisons un émetteur. Pour cela, différentes possibilités existent, comme par exemple, les LED blanches. Elles ont de nombreux avantages et en ce qui concerne l'éclairage et la durée de vie, les lampes à LED ne sont pas encore arrivées au maximum de leurs possibilités. Il existe également des triplets RVB (Rouge, Vert et Bleu), qui sont plus chères que la technologie précédente du fait de l'utilisation de trois LED. [27]

Les triplets RVB sont également comptables avec le multiplexage, afin d'augmenter le taux de transfert des données.



Figure 2.05 : Diode LED RBV

Le débit des données transmises peut être augmenté par d'autres techniques comme l'égalisation comme dans les systèmes MIMO ou Multiple Input Multiple Output.

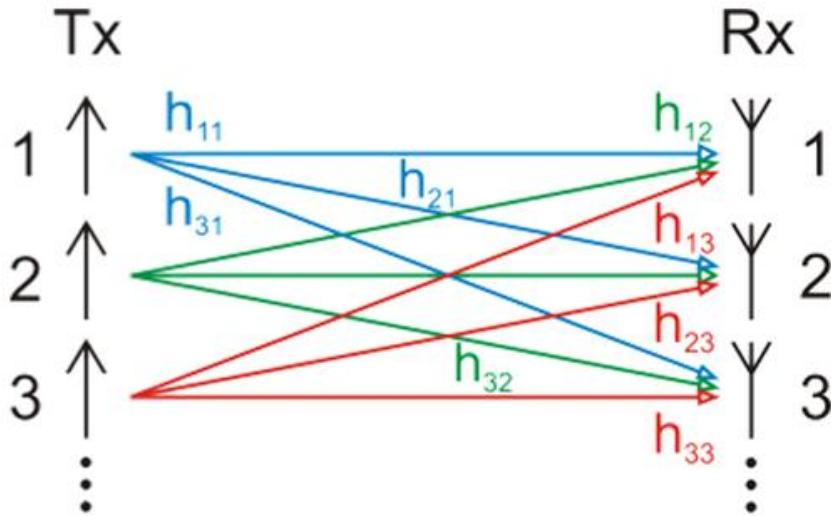


Figure 2.06 : Technique d'égalisation MIMO

Nous avons vu comment émettre un signal, ensuite les informations transmises doivent être reçues par un récepteur qui lui aussi doit avoir les dispositifs adéquats.

2.5.2 Les récepteurs

Les récepteurs utiles aux Li-Fi sont simples à concevoir avec une bande passante relativement large et une bonne résistance aux bruits.

Concernant la communication, deux choix sont possibles pour nos ordinateurs, nos téléphones ou nos tablettes : soit intégrer directement ces récepteurs, soit disposé d'un petit module permettant de recevoir l'information et de la transformer afin de pouvoir l'exploiter. Une fois les données reçues par le photo-détecteur, elles devront, dans tous les cas, être décrypté afin de récupérer les informations utiles. [27]

Concrètement, on utilise des photodiodes. Ces récepteurs reçoivent la lumière contenant les informations. Ensuite, les photodiodes décodent en quelque sorte l'information afin de récupérer l'information utile (les "1" et les "0" envoyés par les émetteurs).

Ensuite les informations reçues doivent être décryptées. Pour retrouver le signal d'origine, il faut faire le traitement inverse afin de récupérer notre signal d'origine. Aujourd'hui, il existe plusieurs techniques afin de transmettre des informations comme nous l'avons vu précédemment. Le multiplexage est une technique de mettre en parallèle plusieurs émetteurs et

récepteurs. Le plus important est de trouver un bon compromis entre le prix, l'efficacité et la complexité du système.

2.5.3 Performances

L'intérêt premier de n'importe quelle connexion internet est le débit de cette connexion, c'est à dire la vitesse de transmission des données. Avec les lampes à LED, les premiers débits mesurés sont extrêmement prometteurs et s'élèvent à 1 gigabits/s qui est dix fois supérieur aux meilleures connexions Wi-Fi existantes en débit réel et plus de deux fois supérieure aux meilleurs débits Wi-Fi mesurés en laboratoire. Alors que cela fait des années que les recherches sont colossales à ce sujet. Le tableau suivant nous permet de faire un comparatif des technologies de transmission de données pour déduire les avantages de chaque type de transmission.

TECHNOLOGIE	VITESSE	DENSITE DES DONNEES
FILAIRE		
FireWire ou IEEE 1394	800 Mbps	*****
USB 3.0	5 Gbps	*****
Thunderbolt	2X 10Gbps	*****
SANS FIL ACTUEL		
Wifi (802.11N)	150 Mbps	*
Bluetooth	3 Mbps	*
IrDA	4 Mbps	***
CONCEPT SANS FIL DU FUTUR		
Wi-Gig	2 Gbps	**
Giga-IR	1 Gbps	***
Li-Fi	>10 Gbps	*****

Tableau 2.02 : Comparaison des réseaux sans fil

2.5.4 Améliorations

Le spectre des ondes dans le domaine du visible est bien connu et avec l'utilisation de la lumière blanche, ce dernier est déjà exploité de façon très performante. Cependant, on vient de voir dans le point précédent que les fréquences d'utilisation des trois couleurs sont de plus en plus élevées, mais on ne sait pas jusqu'où celles-ci pourront aller. [27]

2.5.5 Les diodes LED

Une diode électroluminescente souvent abrégé en DEL en français, ou LED, de l'anglais : Light-Emitting Diode, c'est un dispositif optoélectronique capable d'émettre de la

lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens qui est le sens passant, comme une diode classique, l'inverse étant le sens bloquant. Cela produit un rayonnement monochromatique ou polychromatique non cohérent à partir de la conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse.

Elle compte plusieurs dérivées, principalement, l'OLED, l'AMOLED ou le FOLED. En raison de leur rendement lumineux, les LED pourraient représenter 75 % du marché de l'éclairage domestique et automobile.

Les premières LED à être commercialisé a produit de la lumière infrarouge, rouge, verte puis jaune. L'arrivée de la LED bleue, associée aux progrès techniques et d'assemblage permet de couvrir la bande des longueurs d'ondes d'émission s'étendant de l'ultraviolet (350 nm) à l'infrarouge (2 000 nm), ce qui répond à de nombreux besoins.

Le Li-Fi n'aurait pas pu se développer, ni même voir le jour si les lampes à LED n'avaient pas été inventées. Aujourd'hui les ventes ne cessent de croître et ses applications sont diverses : éclairage ou encore tous types d'écrans (smartphones, télévisions, ordinateur...). Elles remplacent petit à petit les autres lampes, qu'elles soient à incandescences, halogènes ou encore fluorescentes. Depuis une dizaine d'années, leurs performances ne cessent d'être améliorées et les différents petits défauts qu'elles pouvaient présenter, il y a quelques années sont en passe d'être résolus. C'est par exemple le cas de l'indice de rendu des couleurs qui n'était que de 80% et qui frôle désormais les 100%. Le tableau suivant nous montre un comparatif des technologies de lampe et leurs caractéristiques. [27]

Technologie	Lampe incandescente	Lampe halogène	Lampe fluorescente	Lampe à LED
				
Rendement (Lumen/Watt)	10-20	15-20	40-70	40-100
Durée de vie moyenne (heures)	1 000 - 2 000	2 000 - 3 000	6 000 - 15 000	15 000 – 50 000
Temps d'allumage	Lent	Lent	Très lent	Immédiat
Cycles de commutation	6 000	8 000	30 000	50 000
Indice de rendu des couleurs (IRC de 0 à 100)	100	80	100	80 - 100
Température de fonctionnement (°C)	600	725	60	35
Recyclage et pollution	Pas recyclable peu polluant	Pas recyclable peu polluant	Recyclable polluant	Recyclable très peu polluant

Tableau 2.03 : Comparaison des technologies de lampe

On voit immédiatement grâce au tableau que les lampes à LED sont très performantes à moindre consommation énergétique. Néanmoins, leur rendement est un peu plus faible si l'on prend en compte leur fabrication qui est plus énergivore que pour les autres lampes. Le point négatif des LED, étant donné que c'est encore une technologie récente, est évidemment son prix encore très élevé sur le marché. Ce dernier est tout de même en constante baisse. Nous aborderons ce point par la suite.

Toutes les lampes à LED présentes dans notre éclairage sont autant d'émetteurs possibles pour le Li-Fi. Un des gros enjeux va donc être de convaincre les industriels des LED d'intégrer leurs produits avec le Li-Fi.

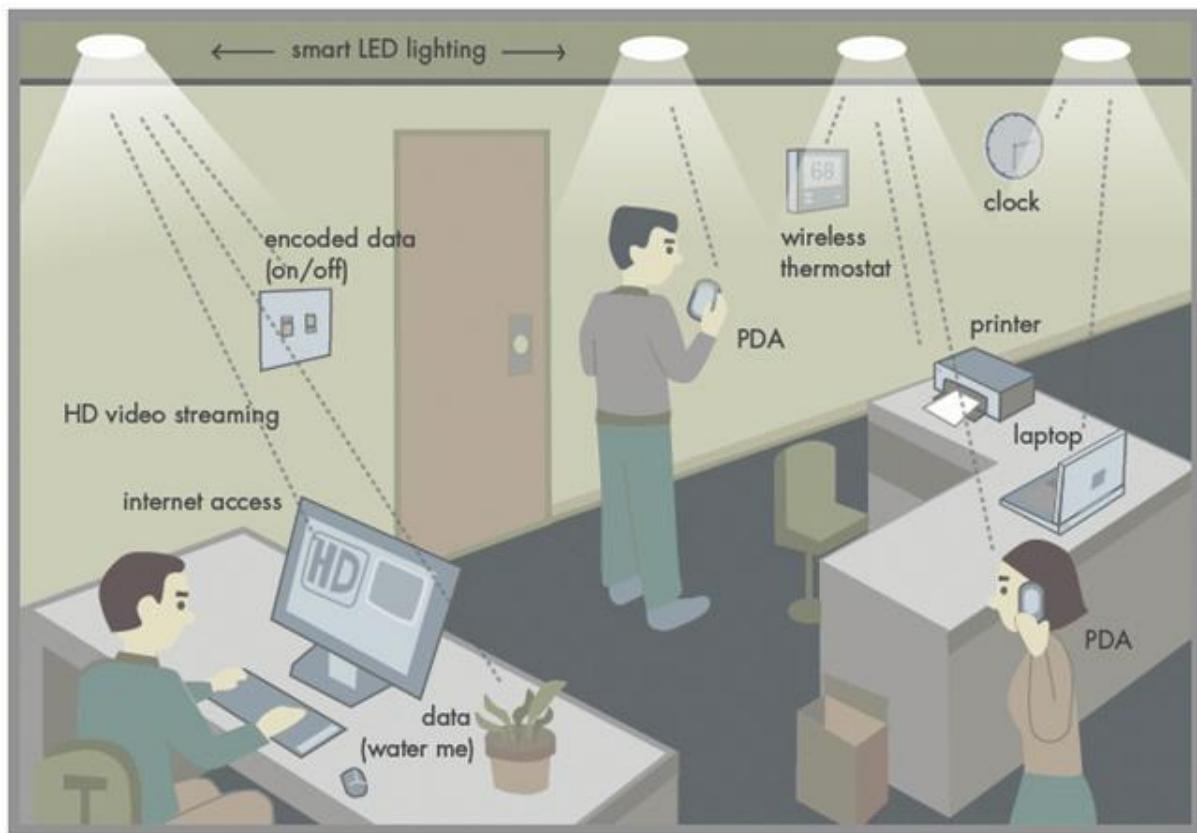


Figure 2.07 : Représentation des différents appareils pouvant utiliser le Li-Fi

2.6 Rapport qualité prix de le Li-Fi

2.6.1 Différents coûts

Avec le Li-Fi, il n'est plus nécessaire d'avoir une antenne relais car la transmission des données se fait par le réseau électrique. Ensuite, il nécessite toujours un modem. Mais, comme des économies seraient faites sur l'absence d'antennes et de transmissions via satellites, nous pouvons espérer que le prix des abonnements serait plus faible. Le coût des récepteurs dans les appareils n'est pas encore bien défini, étant entendu qu'il n'existe pas encore assez de produits pour faire de bonnes comparaisons et faire jouer la concurrence.

Cependant, un élément important est à prendre en compte : le coût des lampes à LED. Ces dernières coûtent 10 fois plus que le prix des halogènes, ce qui est encore assez cher aujourd'hui. Malgré tout, comme nous avons pu le voir dans le point précédent, leur prix est en train de diminuer et vu qu'elles sont extrêmement performantes, cela ne devrait pas être un obstacle pour le développement de la Li-Fi.



Figure 2.08 : Exemple de d'ongle qui dote le récepteur de la capacité à recevoir des informations en Li-Fi

Un dernier élément est à prendre en compte. Il s'agit de la consommation électrique. Nous avons énoncé précédemment que les LED demandent peu d'électricité pour fonctionner. La technologie Li-Fi quant à elle ne consomme que très peu d'énergie supplémentaire. A première

vue, le Li-Fi serait donc économique. Mais cet argument n'est valable que la nuit lorsque nous sommes éclairés avec des lampes.

Dès lors que l'éclairage n'est pas nécessaire, le Li-Fi engendre une consommation électrique supplémentaire et inutile. [28]

2.6.2 Point de vue des industriels

Réussir à trouver des investisseurs est un des points-clé de l'évolution du Li-Fi. Pour l'instant, les revenus engrangés par les entreprises, avec le Li-Fi, ne compensent pas encore les pertes occasionnées par la partie recherche et développement. Il est donc évident que seule l'aide financière d'entreprises prêtes à mettre sur cette technologie permet de combler la différence.

2.7 Utilisations possibles

2.7.1 Utilisation du Li-Fi dans la 5^{ème} Génération ou 5G

Actuellement en développement, la 5G utilisera la technologie Li-Fi. Le réseau 5G se contentera de switcher sur les réseaux de communications déjà existant afin de trouver le signal réseau le plus puissant et rester en permanence connecté au plus haut débit.



Figure 2.09 : Utilisation du Li-Fi dans la 5G

2.7.2 Utilisation dans la géolocalisation

Le Li-Fi peut s'utiliser de façon à s'orienter à l'intérieur d'un bâtiment. Le Li-Fi peut gérer la localisation avec une précision d'environ 10 cm et un temps de réponse de l'ordre de 10 ms

contre quelques mètres et quelques secondes pour les technologies de localisation déjà existantes.

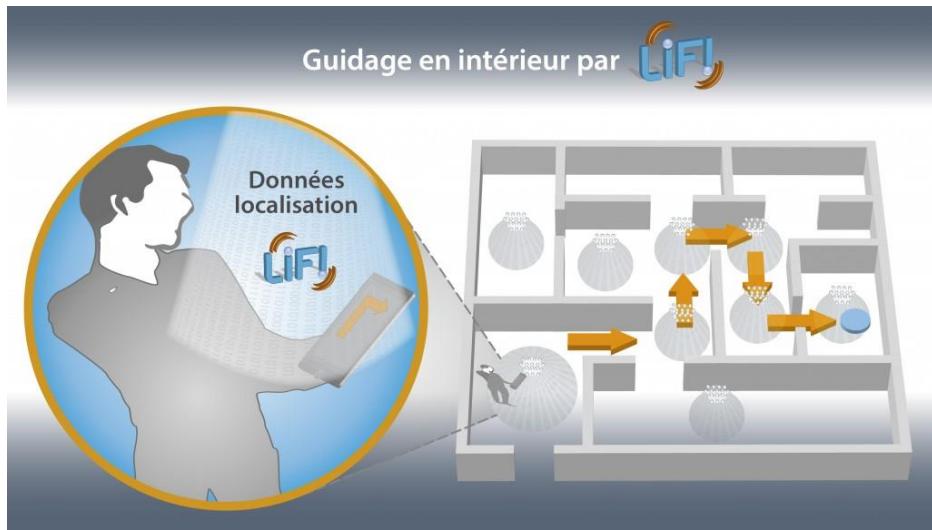


Figure 2.10 : Géolocalisation par Li-Fi

2.7.3 Utilisation dans l'Infrastructure sensible

Le Li-Fi est une des solutions sans fil qui pourrait équiper des avions et des hôpitaux, car cette technologie ne peut pas poser de problème d'interférence avec les divers appareils électroniques déjà en place. [28]



Figure 2.11 : L'utilisation du Li-Fi dans les infrastructures sensibles

2.7.3 Utilisation dans l'automobile

C'est grâce à ce secteur d'activité que le Li-Fi a vu le jour. Le but du Li-Fi dans ce domaine, est de communiquer à l'aide des phares LED de la voiture avec tous éléments routiers ou véhicules afin de faciliter le voyage des conducteurs.

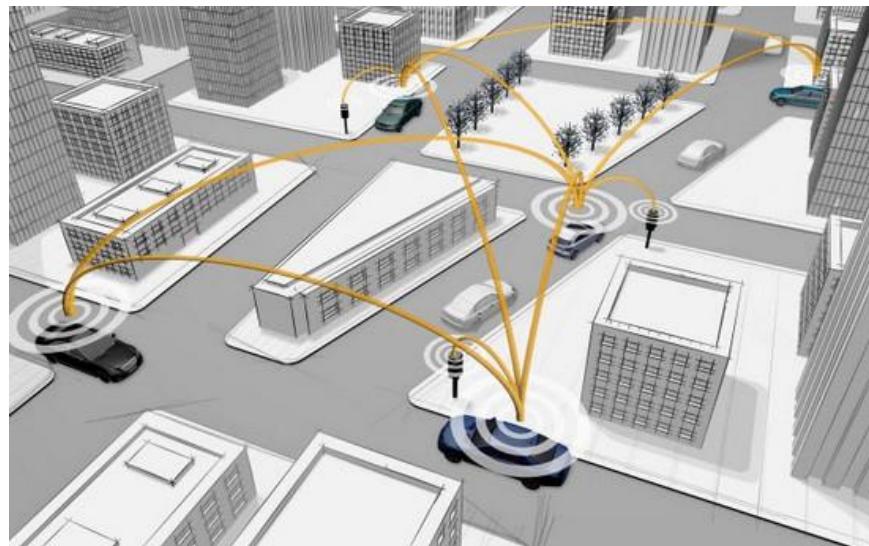


Figure 2.12 : L'utilisation du Li-Fi dans le domaine routier

2.7.4 Utilisation dans la communication aquatique

Le Li-Fi étant une technologie utilisant la lumière pour communiquer ; sous l'eau, il n'y aura plus de problèmes pour communiquer entre plongeurs.



Figure 2.13 : Communication aquatique

2.7.5 Utilisation du Li-Fi dans l'information ciblée

Les éclairages LED des grandes surfaces ou le backlight des écrans LED de publicités pourront être utilisés afin d'envoyer des promotions ou des publicités aux consommateurs. Dans le musée, il sera possible d'accéder sur son smartphone à l'explication d'une œuvre en se plaçant sous l'éclairage de celle-ci.

2.7.6 Utilisation dans la ville connectée

Le Li-Fi étant développé grâce aux réseaux d'éclairage et électrique de la ville, il sera possible d'obtenir plein d'informations sur le quotidien de la ville (transport, maintenance, tourisme).

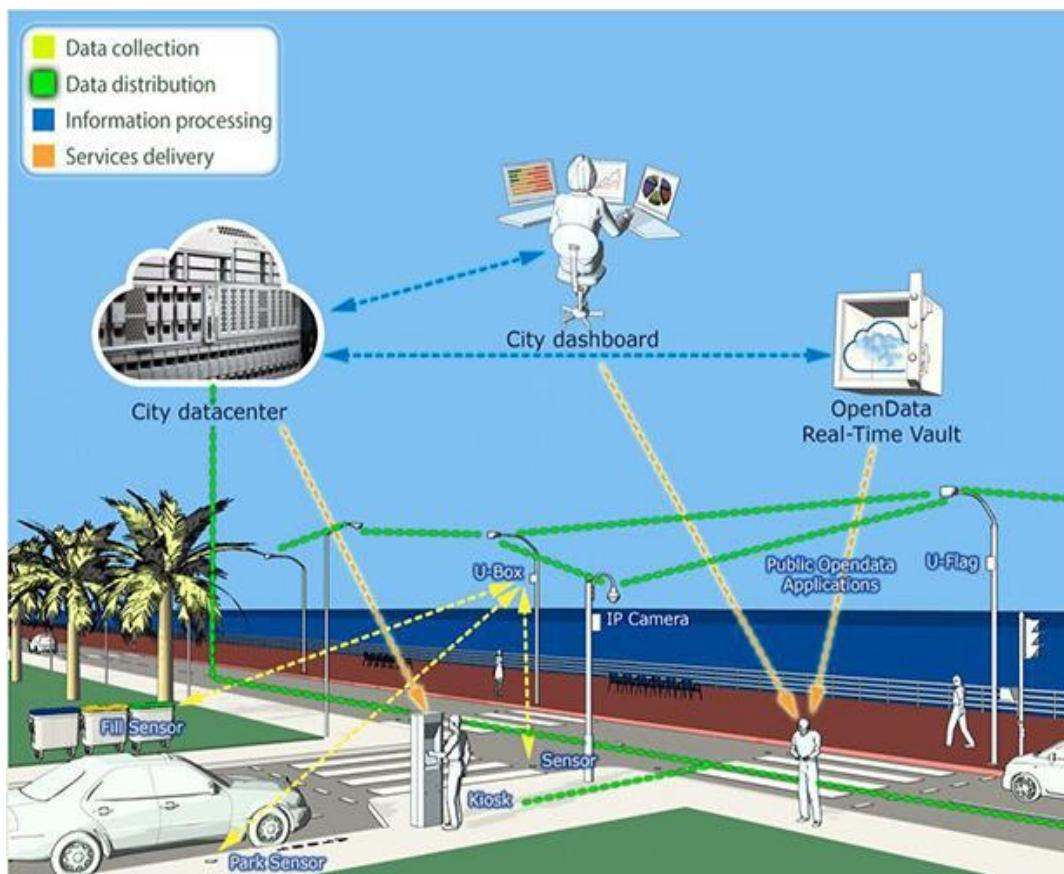


Figure 2.14 : Modélisation d'une ville connectée

2.8 Spectre visible du Li-Fi

Le spectre visible ou spectre optique utilisé par le Li-Fi est la partie du spectre électromagnétique visible pour l'humain, c'est-à-dire l'ensemble des composantes monochromatiques de la lumière visible.

On ne peut pas définir de façon absolue les limites en longueur d'onde des rayonnements perceptibles ; la sensibilité de l'œil diminue progressivement, et varie selon les individus. La Commission internationale de l'éclairage définit la vision de l'observateur de référence entre une longueur d'onde dans le vide de 380 nanomètres (nm), perçue comme un violet, et celle de 780 nm, correspondant à un rouge

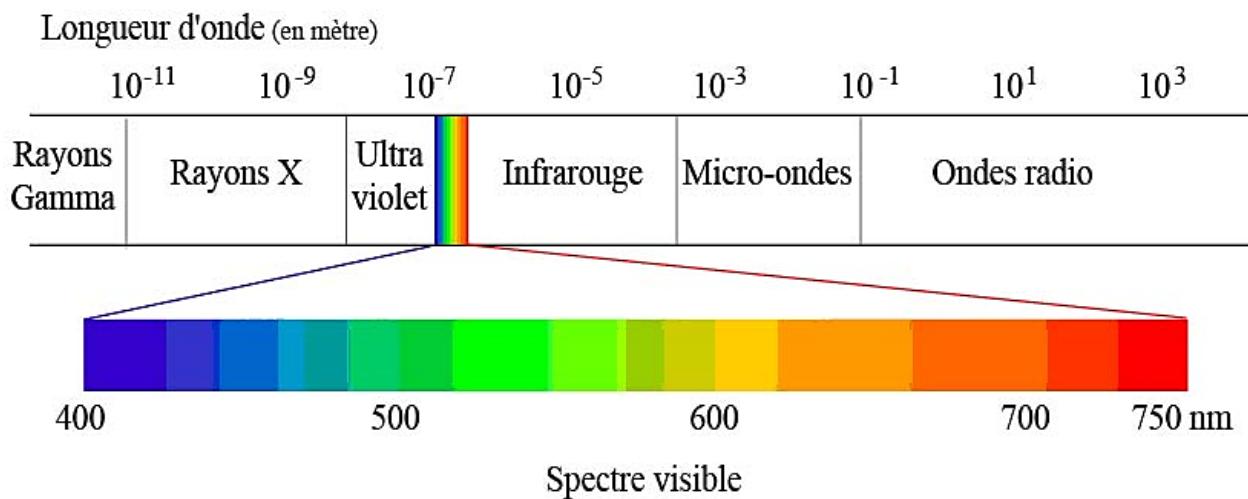


Figure 2.15 : Bande de fréquence du Li-Fi

La transmission sur onde visible ou Li-Fi est une technologie de communication sans fil basée sur l'utilisation de la lumière visible comprise entre la radiation (480 nm de longueur d'onde, soit 670 THz) (perçue bleue) et la radiation (650 nm, soit 460 THz) (perçue rouge). Alors que le Wi-Fi utilise une partie radio du spectre électromagnétique hors du spectre visible, le Li-Fi utilise la partie visible (optique) du spectre électromagnétique.

2.9 L'internet par Li-Fi

2.9.1 L'envoi des informations numériques dans le réseau Li-Fi

Dans un réseau Li-Fi, l'ordinateur ou le matériel est branché au réseau électrique par un adaptateur CPL. Ce dernier permet à l'ordinateur, tout en étant alimenté, d'envoyer ses données directement *via* le réseau électrique. Les informations sont superposées au courant électrique à 50 Hz par l'ajout d'un signal à plus haute fréquence. Les données montantes peuvent aussi être envoyées par Wifi ou par câble RJ45.

2.9.2 La conversion du signal électrique en un signal lumineux

Le signal électrique parvient jusqu'à une LED qui est également connectée au réseau *via* un adaptateur CPL. Équipée d'un système de traitement à la fois analogique et numérique, la diode convertit le signal électrique en un signal lumineux qu'elle émet quand elle est allumée. La transmission est semblable à celle de morse, et utilisant le système binaire : 0 = éteint, 1 = allumé. On peut atteindre le haut débit soit 100 Mbit/s tel le cas du WIFI, comme on peut aller plus loin.

2.9.3 La réception et traitement des signaux lumineux

Les appareils (ordinateur, tablette, téléphone) situés dans la zone d'éclairage reçoivent les données transmises grâce à leur récepteur LI-FI. Il se compose d'une photo détectrice et un amplificateur pour la conversion en signal électrique et d'un système de traitement du signal pour démoduler les données numériques.

L'application du LI-FI peut être généralisée à toutes les activités de la vie quotidienne.

2.10 L'optoélectronique base du Li-Fi

2.10.1 Présentation de l'optoélectronique

Les progrès réalisés dans les domaines de l'optoélectronique et de la photo-électricité ont abouti à la commercialisation de composants massivement utilisés dans l'industrie, notamment les diodes électroluminescentes (LED) et les coupleurs optoélectroniques.

Depuis 1956, on sait qu'une jonction PN parcourue par un courant direct émet une radiation lumineuse. Cependant, en raison de difficultés technologiques, il a fallu attendre 1964 pour voir apparaître sur le marché des diodes émettant une radiation lumineuse dans le visible. [6] [29]

2.10.2 Principe

Considérons une jonction PN polarisée dans le sens direct et parcourue par un courant IF.

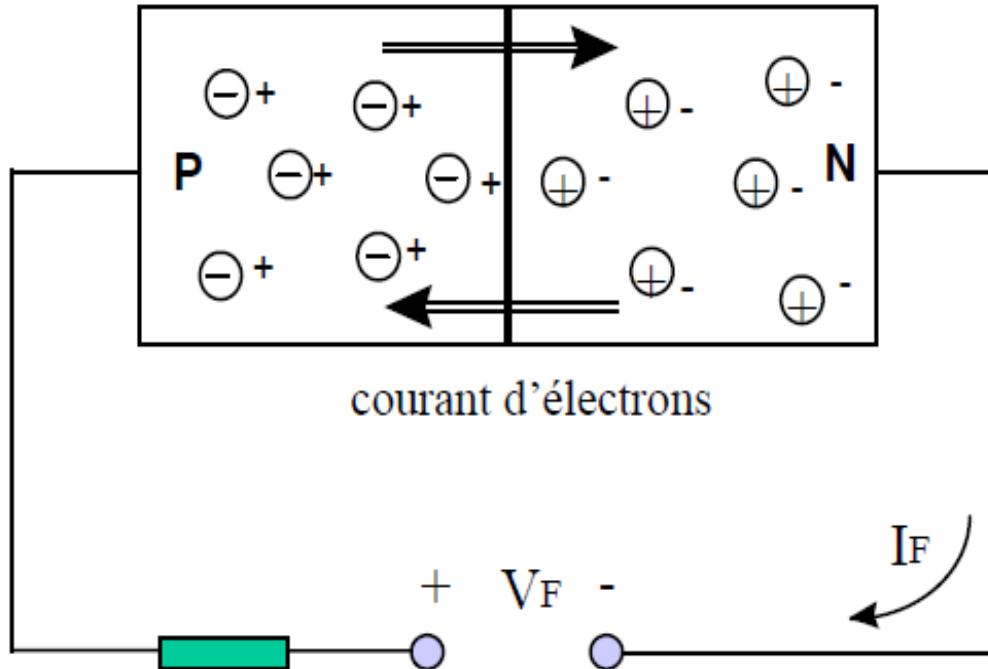


Figure 2.16 : Injection des porteurs minoritaires dans une jonction PN

A l'intérieur du matériau, il y a injection de trous dans la zone N et d'électrons dans la zone P : c'est le phénomène d'injection des porteurs minoritaires.

Statistiquement, un certain nombre de porteurs minoritaires se recombinent en libérant de l'énergie.

En effet, lorsqu'un électron libre rencontre un trou c'est-à-dire une absence d'électron dans un atome, qui de ce fait est chargé positivement, il le comble. [6] [29]

L'énergie de cet électron passe donc de la bande de conduction à la bande de valence du matériau P, libérant par conséquent une énergie égale à la différence entre ces deux bandes.

Une partie de cette énergie est libérée sous forme de lumière et le reste sous forme de chaleur

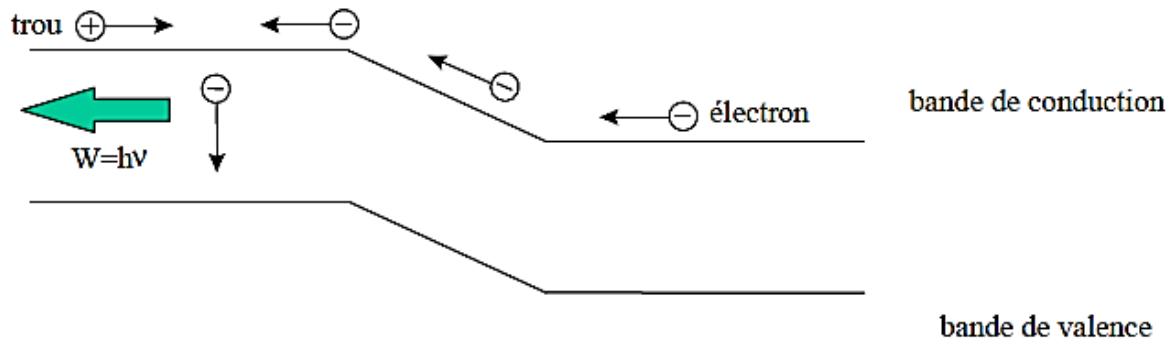


Figure 2.17 : Emission d'un photon lors de la recombinaison d'un électron et d'un trou

Nous voyons donc que la fréquence de la radiation émise est directement liée à la largeur de la bande interdite.

L'énergie d'un photon s'écrit :

$$W = h\nu \quad (2.01)$$

h : constante de Planck ($6,6 \cdot 10^{-34}$ Js)

ν : fréquence de la radiation émise (en Hz).

La longueur d'onde émise est donnée par la relation :

$$\lambda(A) \simeq \frac{12370}{Eg} \quad (2.02)$$

λ : longueur d'onde de la radiation émise (en Angström)

Eg : largeur de la bande interdite (en eV).

La tension de seuil d'une diode étant elle aussi fonction de la largeur de bande interdite, il existe une relation directe entre la tension de seuil de la diode et la fréquence de la radiation émise.

Plus une jonction possède une tension de seuil élevée, plus elle émet haut dans le spectre.

De ce fait, les diodes germanium et silicium qui possèdent des tensions de seuil relativement faibles (environ 0,3V pour Ge et 0,7V pour Si) émettent dans l'infrarouge lointain. La mise au point de diodes émettant dans le visible n'a donc pu s'effectuer qu'à partir d'un autre semi-conducteur : le gallium Ga dont le "Gap" vaut 1,4 eV (1,09 eV pour le silicium ; 0,66 eV pour le Germanium).

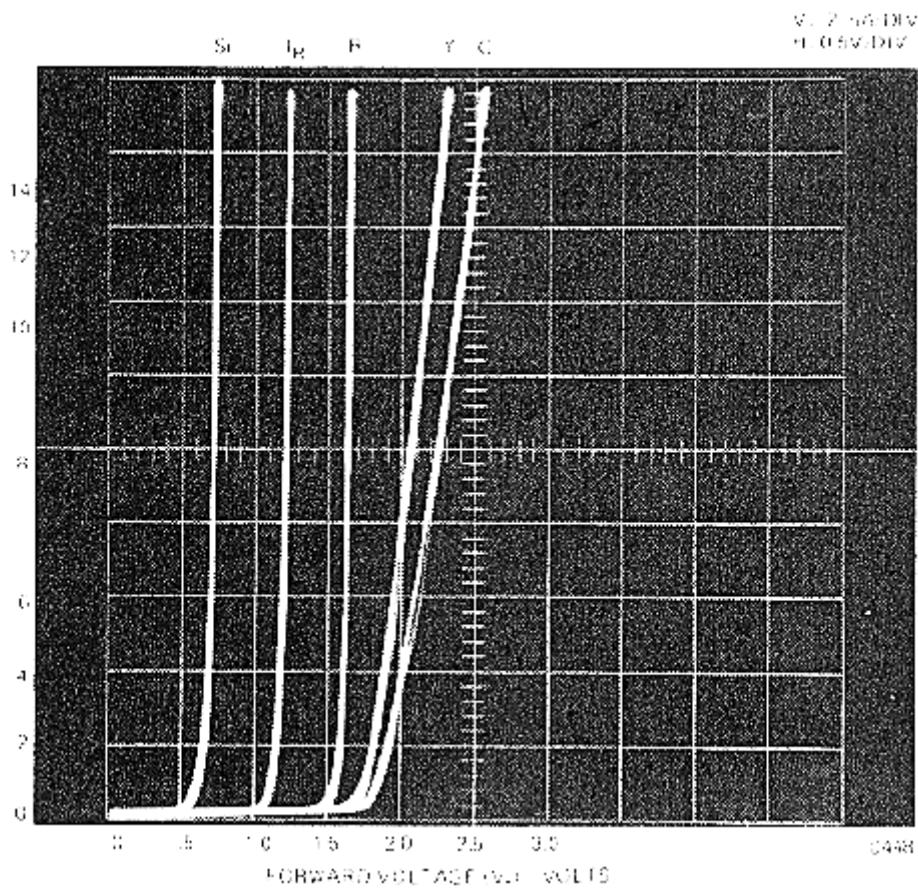


Figure 2.18 : Caractéristiques If-Vf de diodes Si, GaAs (IR), GAAsP (rouge, jaune, vert)

A partir de différents composés à base d'AsGa ou de GaP, on sait aujourd'hui fabriquer des diodes électroluminescentes émettant dans l'infrarouge, le rouge, le jaune, le vert et le bleu.

2.10.3 Utilisation des LED dans l'opto-électronique

Les LED sont utilisées comme source lumineuse :

- Soit dans un but de visualisation (voyants ...);
- Soit pour transmettre un signal (coupleurs optoélectroniques, capteurs ...).

Contrairement aux lampes à incandescence, une LED ne se pilote pas en tension mais en courant.

Dans le cas général, une LED doit être connectée à une source de tension par l'intermédiaire d'une résistance de limitation de courant.

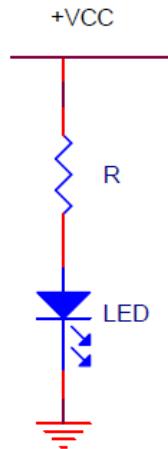


Figure 2.19 : Exemple de branchement LED

2.11 Conclusions

En résumé, les tests effectués sur le Li-Fi sont très prometteurs et les débits enregistrés ne cessent d'augmenter. Maintenant pour qu'une telle technologie ne reste pas au stade de prototype il faut qu'un second point et non des moindre soit validé. Dans le chapitre suivant nous allons étudier la mise en place d'une transmission Li-Fi pour nous permettre de comprendre le fonctionnement d'une architecture Li-Fi.

CHAPITRE 3

MISE EN ŒUVRE D'UNE LIAISON LI-FI

3.1 Introduction

Les systèmes de transmission numériques véhiculent l'information entre l'émetteur et le récepteur via un support. Dans notre projet, c'est la lumière. Notre projet qui est la modélisation et la simulation d'un concept de transmission sur onde visible consiste à établir une transmission d'une information par des impulsions lumineuses entre deux appareils.

Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique de base est donné à la figure ci-dessous :

- La source émet un message numérique en binaire ;
- Le codeur effectue le codage de l'information ;
- Le modulateur a pour rôle l'adaptation du spectre du signal transmis au milieu ;
- A la réception, le destinataire doit être équipé d'un démodulateur et d'un décodeur.

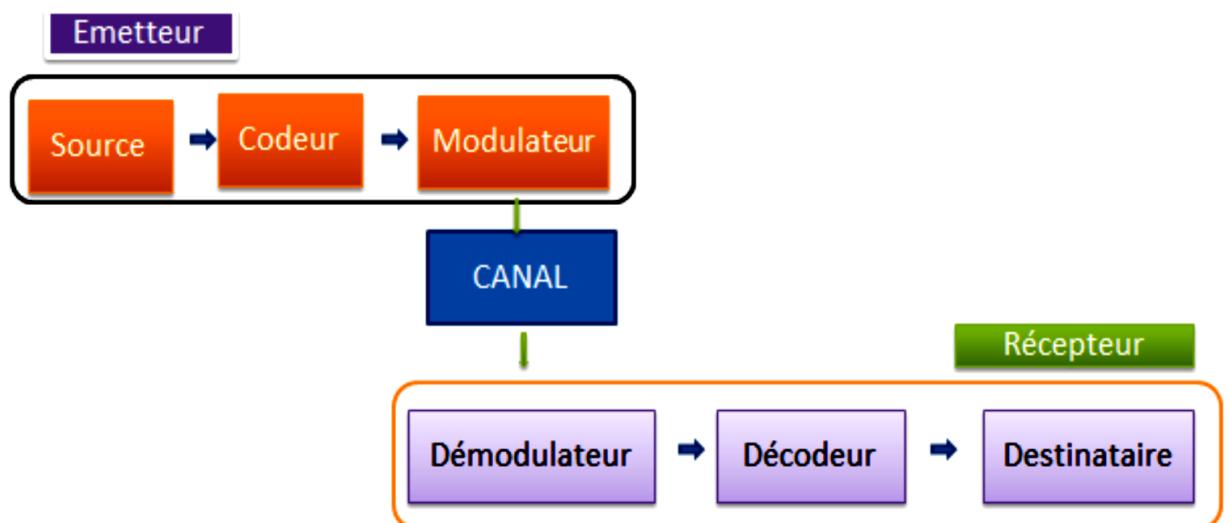


Figure 3.01 : Synoptique d'un système de transmission numérique

3.2 Concept de transmission

Le but du mémoire est de mettre en œuvre un système de communication Li-Fi permettant le transfert de données d'un PC vers un autre en utilisant la lumière comme vecteur de transport de l'information.

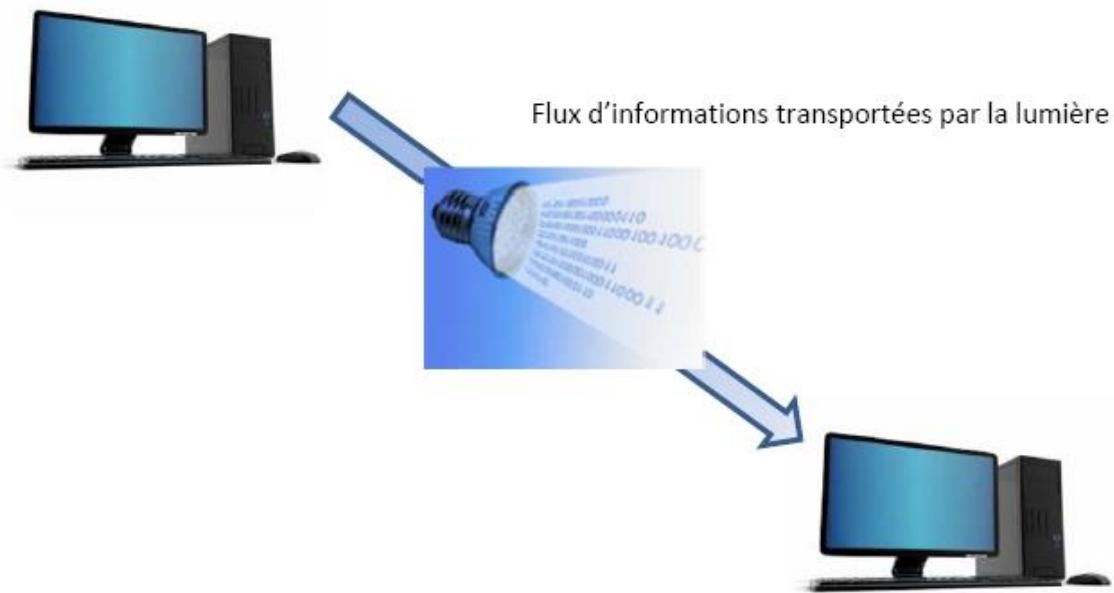


Figure 3.02 : Concept de transmission Li-Fi

Nous allons pour cela :

- Comprendre le principe de fonctionnement de la communication Li-Fi ;
- Réaliser l’interconnexion des différents éléments ;
- Mettre en œuvre la communication ;
- Mesurer les signaux caractéristiques.

3.2 Objectifs

L’objectif de ce projet est donc la réalisation d’un prototype unidirectionnel permettant l’échange de données par la lumière visible.

Soit le développement d’un protocole de communication (simple dans un premier temps) visant à transmettre des données d’un ordinateur à un autre. Pour cela, nous avons divisé cet objectif, en trois sous objectifs, qui sont :

- L’analyse de la performance de la transmission Li-Fi ce qui consiste à étudier le codage et les modulations qui en lieu au niveau de la technologie en permettant l’envoi sans-fil.
- La réalisation d’un prototype de transmission permettant l’émission de données “t”, la réception de données et le filtrage des autres sources de lumières nuisible à la communication.
- L’analyse de la mise en œuvre d’un système de transmission Li-Fi dans une salle

3.3 Avantages et contraintes du projet

Afin de mieux cerner notre étude, nous avons effectué un bilan.

Les avantages du projet sont :

- Une bande de fréquences entièrement libre et sans licence à l'échelle mondiale.
- Absence d'interférence avec les ondes radio et de brouillage électromagnétique.
- Sécurisation accrue de la communication (les ondes optiques ne traversant pas les murs).
- Communications sans fil à très haut-débit avec une limite théorique de 1 Gbits/s par LED émettrice.
- Possibilité de communication multi-usagers.
- Omniprésence des LED dans l'éclairage domestique, industriel, dans les displays et les signalétiques urbaines.
- Possibilité de se géo localiser à l'intérieur des bâtiments sans GSM et sans Wi-Fi.
- Un débit supérieur à la Wi-Fi grâce à sa fréquence 400 à 750GHz environ.

Les contraintes du projet sont :

- La transmission Li-Fi est actuellement une technologie unidirectionnelle. Il doit donc être couplé avec une autre technologie (CPL, Wi-Fi) ou être utilisé dans des cas particulier (besoin uniquement de débit descendant) ;
- Evidemment pour fonctionner, la lumière doit toujours être allumée et visible du récepteur.
- Sensibilité aux obstacles opaques.

3.5 Choix du logiciel Matlab

Le logiciel Matlab est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. L'avantage de l'utilisation du logiciel Matlab pour notre simulation par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique.

Le logiciel de calcul Matlab possède un large éventail d'applications, cela nous permet d'analyser et de manipuler les données à travers des images, des graphiques, des diagrammes

et des algorithmes. Car le logiciel fournit un niveau plus élevé de précision mathématique pour des calculs complexes.

Le choix du logiciel Matlab pour notre simulation se résume 3 grands points majeurs :

- Performance du logiciel au niveau calcul matriciel ;
- Simplicité des manipulations mathématiques ;
- Précision des résultats graphique et numérique.

3.6 Conception d'une application de simulation du Li-Fi

3.6.1 Présentation de la démarche

Pour modéliser une transmission Li-Fi, nous avons suivi les démarches d'une transmission numérique. Pour cela, nous avons suivi le diagramme suivant :

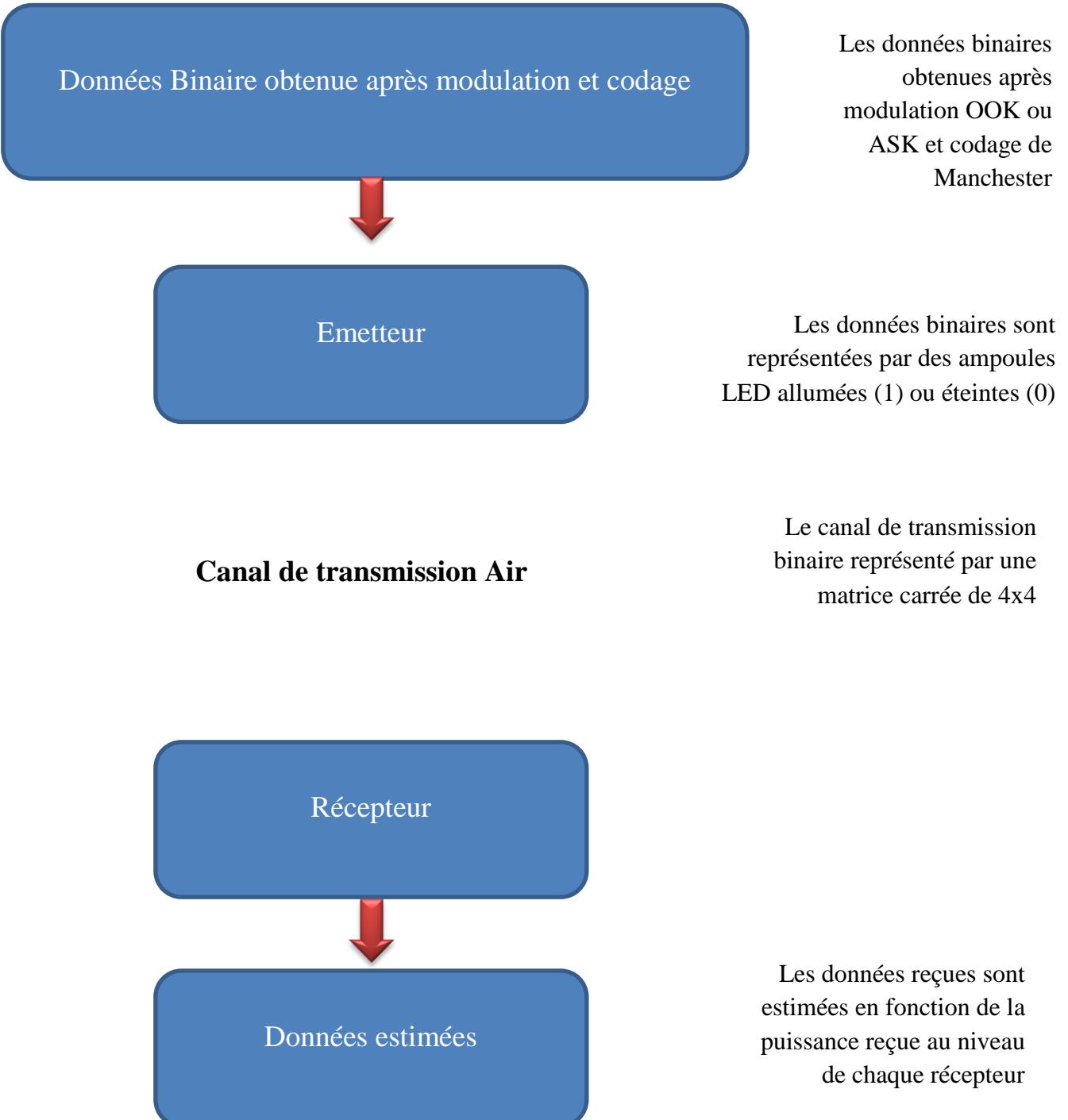


Figure 3.03 : Fonctionnement de l'application

Comme nous le voyons sur le diagramme, notre projet consiste à analyser 4 grands blocs. Dans le premier bloc, nous avons considéré les données obtenues après la modulation ASK ou OOK et après un codage Manchester. Notons que les données obtenues sont donc sous la forme binaire.

La transmission sur onde visible n'est applicable que si et seulement si les données sont sous forme binaire, car la transmission dépend du clignotement de la diode LED.

Pour représenter ce phénomène, nous allons donc représenter les données binaires par des interrupteurs où :

- L'état 1 sera représenté par l'ampoule LED allumée.
- L'état 0 sera représenté par l'ampoule LED éteinte.

Ces données seront donc envoyées par l'émetteur dans le canal de transmission qui est l'air. Pour modéliser ce phénomène, nous avons modélisé le canal de transmission par une matrice carrée H de 4x4.

$$H = \begin{matrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{matrix}$$

Pour représenter les pertes et les perturbations, nous avons modélisé les perturbations et les atténuations de l'air pour une simulation qui se base sur la propagation dans le canal de Rice(LOS) et dans le canal de Rayleigh (NLOS)

Plutôt qu'un graphe, le canal est représentable par la matrice P des probabilités conditionnelles ou matrice de canal. Pour un cas idéal la matrice est représentée par la relation suivante :

$$PY/X(1/1) = PY/X(0/0) = 1-p \text{ et } PY/X(1/0) = PY/X(0/1) = p \quad (3.01)$$

A la réception, les données sont interprétées en fonction de leurs puissances pour être reconstruites.

Nous pouvons donc schématiser le transfert des données dans le réseau par la figure suivante :

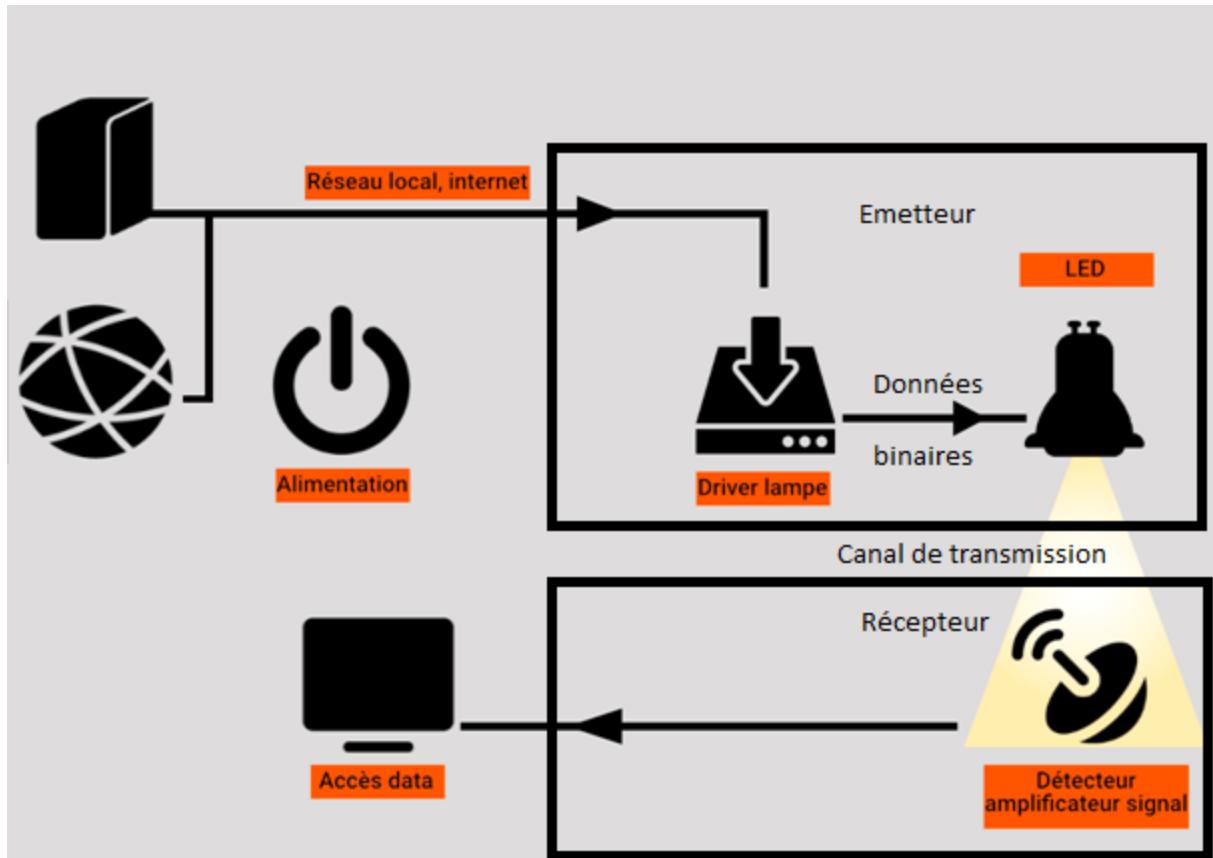


Figure 3.04 : Schématisation du transfert de données

3.6.2 Code des paramètres de base de la simulation sous Matlab

La simulation de la transmission Li-Fi se base sur plusieurs paramètres de base :

- Nombre de Prx
- Réflexion de la salle
- Puissance LED
- Distance TX et RX
- Gain de la salle

Les paramètres de base de la simulation sont :

```
% paramètre de base %
```

```
% pour 2 Prx différent
```

```
% phi = (7.5*pi)/180;
```

% puissance émise des LED en Watt

PLED = 0.1;

% Vue du champ du détecteur

psi_c = (20*pi)/180;

% Emplacement des détecteurs

ARX = 7.8E-7;

% Distance entre TX et RX en mètre

% Hauteur des LED = 1.48;

% -----Pour 3 Prx_diff----- %

% Grandeur et réflexion de la salle en mètre %

L = 5;

W = 5;

H = 3;

n_floor = 0.15;

n_wall = 0.7;

n_ceiling = 0.8;

% -----Pour 4 Prx total----- %

% Index des photodéTECTEUR %

n_conc = 1.46;

% Gain des lentilles du LED %

Tf = 10.0;

% ----- Analyse du SNR----- %

% SNR %

I2 = 0.562;

% Débit (Bit par seconde)

Rb = 115200;

% puissance des LED en Ampère %

Iamb = 7E-8;

% Réponse des photodiodes (A/W)%

R = 0.55;

% charge des electron (C)

q = 1.60E-19;

% AmpLi-Fication de la bande (Hz)%

Ba = 4.5E6;

% AmpLi-Fication de la densité de bruit (Ampere/Hz^{0.5})%

Iamf = 5e-12 ;

3.6.3 Présentation de la simulation sous Matlab

La simulation d'un concept de transmission par onde visible a été effectuée sous Matlab. La réalisation d'une application de modélisation nous permet d'analyser les étapes et les phénomènes pendant la transmission des informations. L'application est basée sur 2 calculs majeurs, au niveau du canal de transmission et au niveau de la réception. L'implémentation d'une interface avec Matlab permet une utilisation plus pratique de l'application.

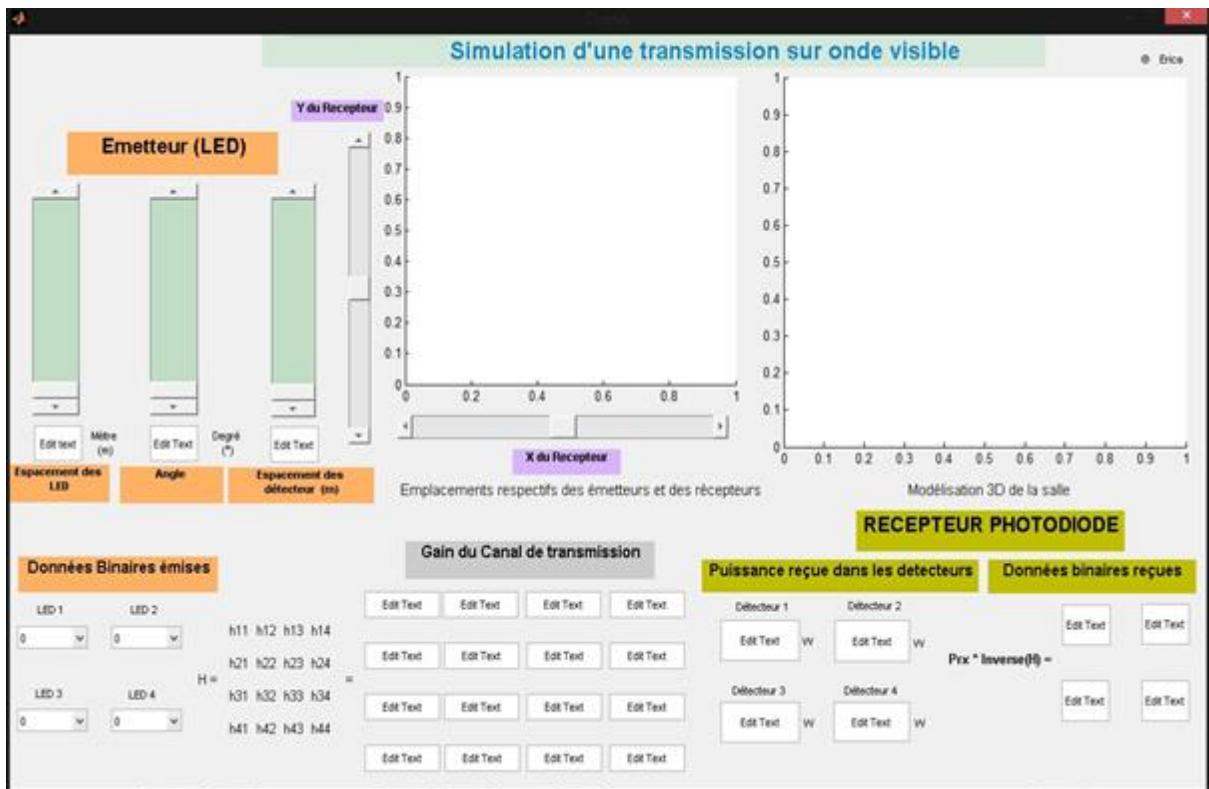


Figure 3.05 : Affichage de la simulation sous Matlab

L'utilisation de la simulation se divise en deux étapes :

Etape 1 : Entrer des données binaires.

Comme nous le savons, après la modulation ASK ou OOK et le codage de Manchester, l'information est sous forme de suite binaire. Pour représenter ces données binaires dans Matlab, nous avons utilisés 4 LED représentés par l'état 0 et 1.

Pour une LED allumée, elle est représentée par l'état 1 et pour une LED éteinte elle est représentée par l'état 0. Comme nous le savons le concept de la transmission Li-Fi est d'envoyer des informations en utilisant les clignotements des diodes LED. Nous avons utilisé 4 émetteurs LED pour la transmission.

Données Binaires émises

LED 1	LED 2
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
LED 3	LED 4
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Figure 3.06 : Panneau d'entrée de la suite binaire

Etape 2 : Configuration des Emetteurs

Pour le fonctionnement de la simulation, chaque état des LED doit être configuré.

Après la configuration de chaque état des LED, il faut ensuite disposer les LED dans la salle. L'application que nous avons créée nous permet de régler l'espacement de chaque LED entre eux et l'espacement des photodiodes. Nous pouvons aussi régler l'angle d'ouverture de chaque diode LED pour mieux analyser le phénomène quand l'angle d'ouverture du rayonnement est changé.

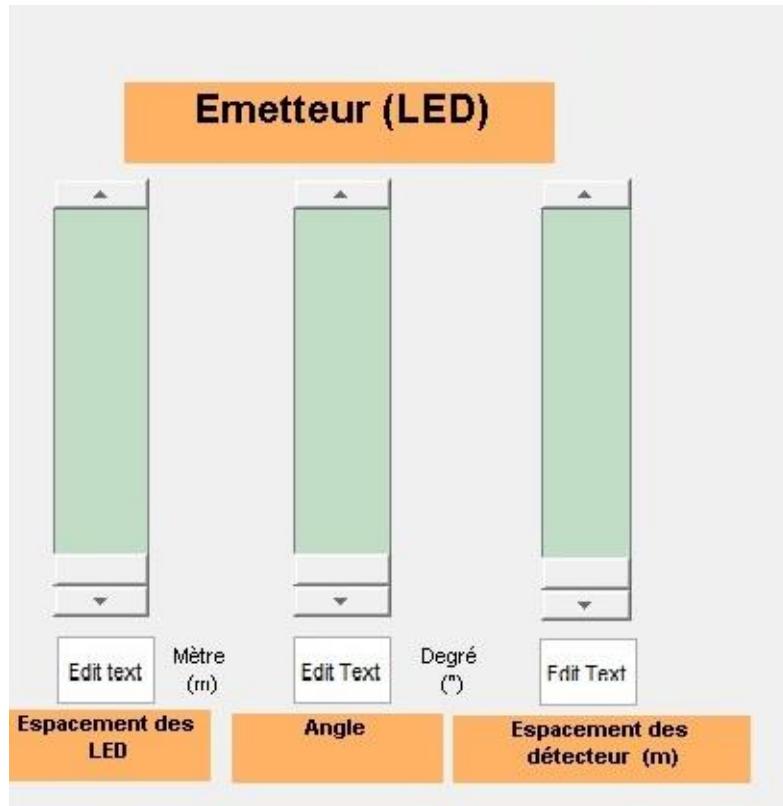


Figure 3.07 : Panneau de configuration du TX et RX

L'espacement des LED et des photodiodes sont représentés en mètre. L'angle d'ouverture de la LED est en dégrée. L'utilisation de l'objet slider sur Matlab permet le changement rapide des valeurs des espacements.

La figure suivante nous montre l'interface de réglage des coordonnées des émetteurs et des récepteurs dans la salle. L'utilisation de l'objet slider sous Matlab nous permet une utilisation plus pratique dans le changement des coordonnées des émetteurs et récepteurs.

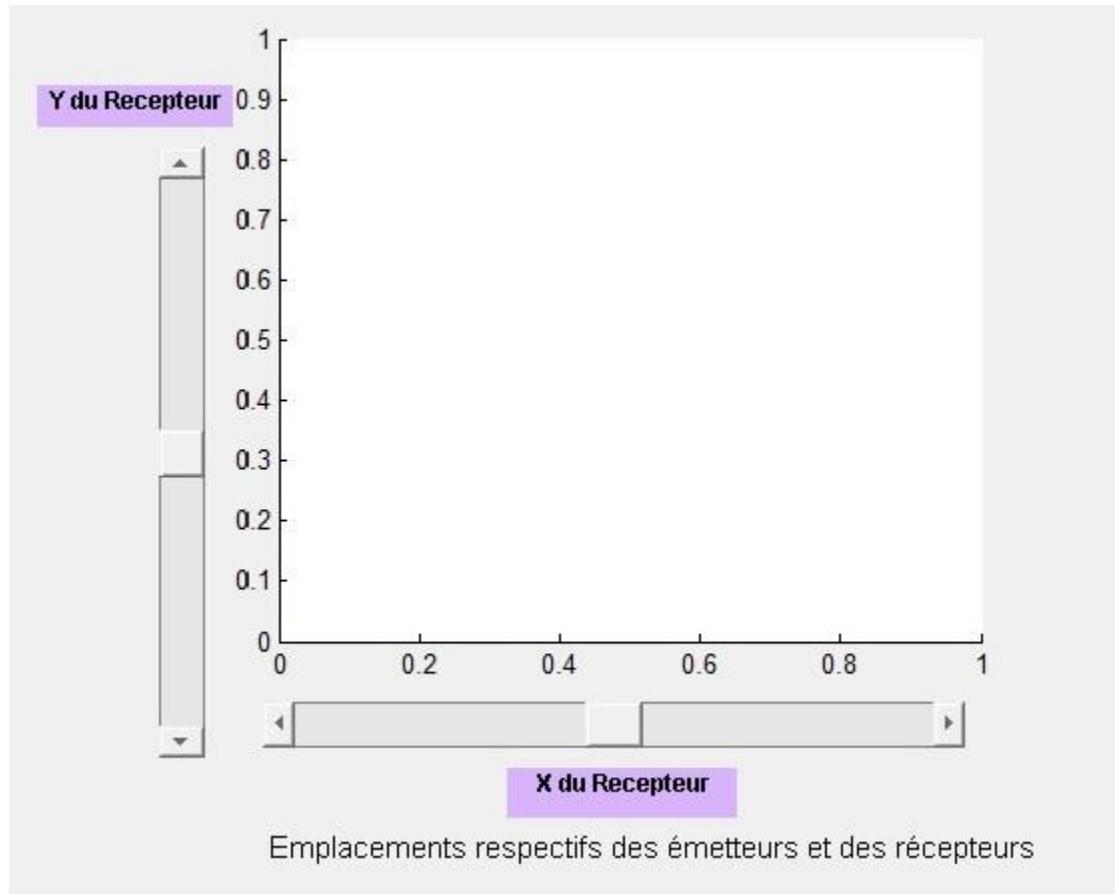


Figure 3.08 : Configuration des coordonnées du TX et du RX

Ensuite, nous avons le canal de transmission. Le canal de transmission est modélisé par une matrice carré de 4x4. La propagation utilisée dans la simulation se divise en 2 étapes :

- Pour la propagation en LOS ou la visibilité directe le canal de Rice est utilisé. Le canal de Rice utilisé dans la simulation est défini par :

$$y(t) = \alpha(t)s(t) + n(t) \quad (4.01)$$

Avec

$\alpha(t)$: variable aléatoire gaussienne complexe de moyenne non-nulle

$r(t) = |\alpha(t)|$: variable de Rice

$\sigma > 0$ paramètre de la fonction de Rice

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \text{ avec } r \geq 0 \quad (3.02)$$

- Pour la propagation NLOS ou pas de ligne en vue le canal de Rayleigh a été utilisé. Le canal de Rayleigh définit par :

$$y(t) = \alpha(t)s(t) + n(t) \quad (3.03)$$

Avec

$\alpha(t)$: variable aléatoire gaussienne complexe de moyenne nulle.

$r(t) = |\alpha(t)|$: variable de Rayleigh.

$\sigma > 0$ paramètre de la fonction de Rayleigh.

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \text{ avec } r \geq 0 \quad (3.04)$$

Pour simuler le canal de transmission l'utilisation de ces 2 canaux sont indispensables.

Gain du Canal de transmission

Figure 3.09 : Modélisation du canal de transmission

La figure suivante nous montre la modélisation 3D des rayons émis par les émetteurs LED. Cette modélisation nous permet de visualiser la puissance émise par les LED dans la salle. Cette visualisation nous permet de déterminer la puissance en chaque point de la salle. Sachant que le spectre d'émission d'une diode LED est relativement étroit. Le flux lumineux n'est pas homogène tout autour de la LED. La répartition spatiale de la puissance émise dépend de la forme de la diode LED.

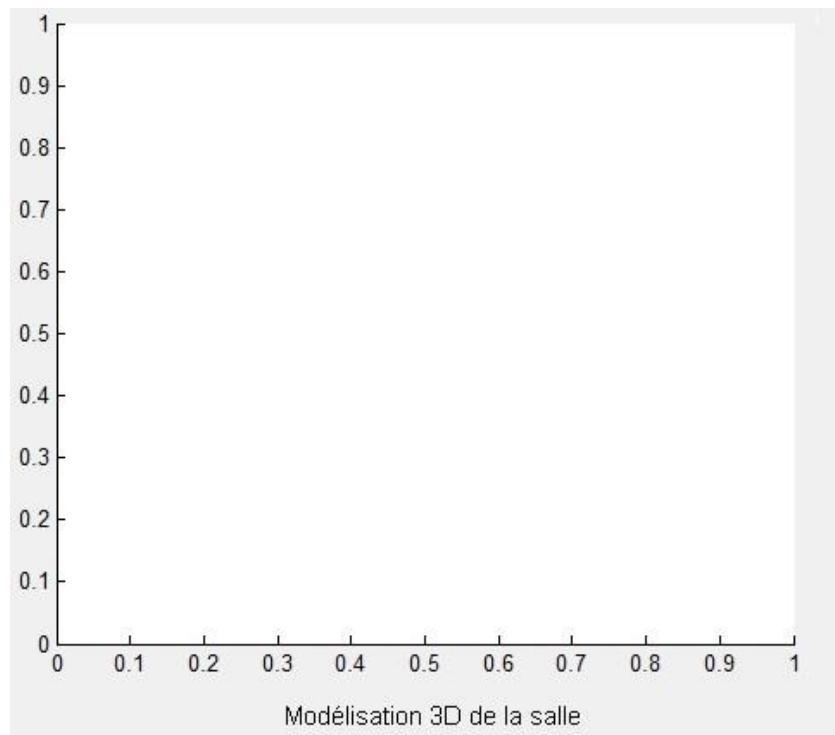


Figure 3.10 : Modélisation 3D de la salle

Enfin la dernière figure représente le récepteur qui est la photodiode. Les données reçues par les détecteurs sont multipliées par l'inverse de la matrice (H) pour obtenir les données binaires reçues. Les données binaires à la réception sont celles des données interprétées par un récepteur, malgré le gain du canal de transmission.



Figure 3.11 : Affichage des données reçues par les récepteurs

3.7 Modélisation de la simulation

Les variables d'entrées de la simulation sont les données binaires, ensuite les coordonnées des émetteurs et récepteurs, enfin nous avons la configuration de l'angle d'ouverture des diodes LED.

La simulation consiste à utiliser ces variables d'entrées pour modéliser le fonctionnement réel d'une transmission Li-Fi.

Nous obtenons comme variable de sortie les données binaires interprétées par le récepteur.

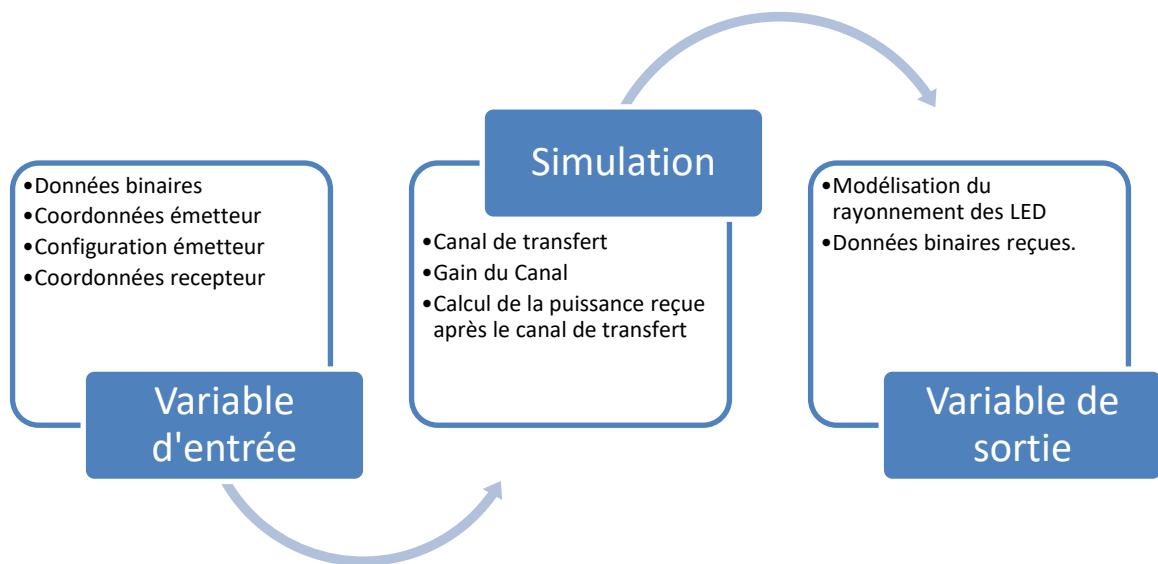


Figure 3.12 : Modélisation de la simulation

3.8 Démarche de calcul

La démarche de calcul au niveau de la simulation se partage en 3 étapes majeures.

- La première étape consiste à calculer la puissance totale reçue en visibilité directe ;
- La seconde étape est d'effectuer le calcul de la puissance totale de diffusion, plus précisément à calculer la puissance reçue en trajet réfléchi ;
- Dans la dernière étape, nous avons effectué le calcul de la puissance totale reçue au niveau du récepteur, c'est l'ensemble de la puissance en visibilité directe et la puissance en trajet réfléchi.

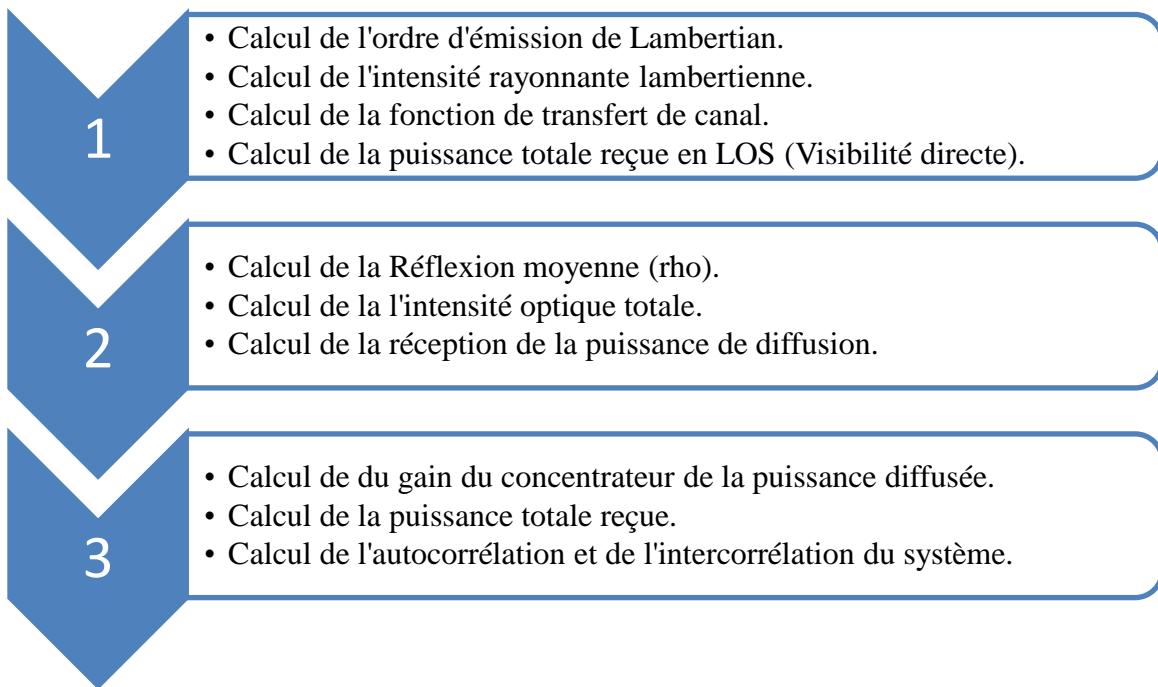


Figure 3.13 : Démarche de calcul de la simulation

3.9 Conclusion

La simulation numérique se base ici sur l'étude mathématique du système Li-Fi qui représente un phénomène physique. Le système d'équations a pu être établi grâce au calcul numérique et au calcul matricielle pour la représentation du phénomène. Ce modèle a été ensuite traduit en programme informatique sous Matlab et qui nous a permis de réaliser des expériences numériques grâce à la résolution de ces équations. La simulation du phénomène physique et des composants électroniques peut être traduite mathématiquement, le logiciel Matlab nous a permis de modéliser et de simuler numériquement les phénomènes physiques difficiles à mettre en œuvre pour l'aboutissement de ce mémoire.

CHAPITRE 4

ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1 Présentation des résultats

Nous avons récapitulé dans le tableau ci-dessous, les différentes caractéristiques, les analyses et les interprétations y afférentes.

Caractéristique	Interprétation
Réalisation	Facile à mettre en œuvre
Puissance requise	Technologie écologique qui requiert moins de puissance
Coût de déploiement	Moins couteux que le déploiement d'un réseau Wi-Fi
Débit	1 gigabit par seconde (10 fois plus que le Li-Fi)
Sécurité	Le réseau est accessible que seulement dans la salle
Sensibilité à la perturbation	Atténuation négligeable des rayons à l'atténuation de l'air
Sensibilité à l'obstacle	Bloqué par des objets ou obstacle opaque
Durée de vie	Entre 100 000h et 40 000h
Principaux avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Haut débit • Sécurité • Evite les pollutions électromagnétiques • Ville intelligente • Fiabilité du système • Ergonomie • La bande fréquence n'est pas régulée et est gratuite
Principales faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Une technologie monodirectionnelle • Sensible à l'obstacle opaque • Transmission disponible que dans le halo de lumière

Tableau 4.01 : Tableau d'interprétation des résultats

Ce tableau met en exergue que notre simulation sous Matlab la réalisation d'une transmission sur onde visible est réalisable, cette technologie de transmission de données numériques par la lumière est très prometteuse au niveau du débit et du niveau de taux d'erreurs.

4.2 Présentation des résultats de la simulation sous Matlab

La présentation des résultats de notre simulation consiste à émettre une suite de données binaires qui est prise au hasard. Pour notre cas nous avons pris la suite binaire suivante :

$$E = 1 \ 0 \ 1 \ 1$$

Cette suite est représentée par 3 ampoules LED allumées et 1 ampoule éteinte. La présentation générale du logiciel est comme la suivante :

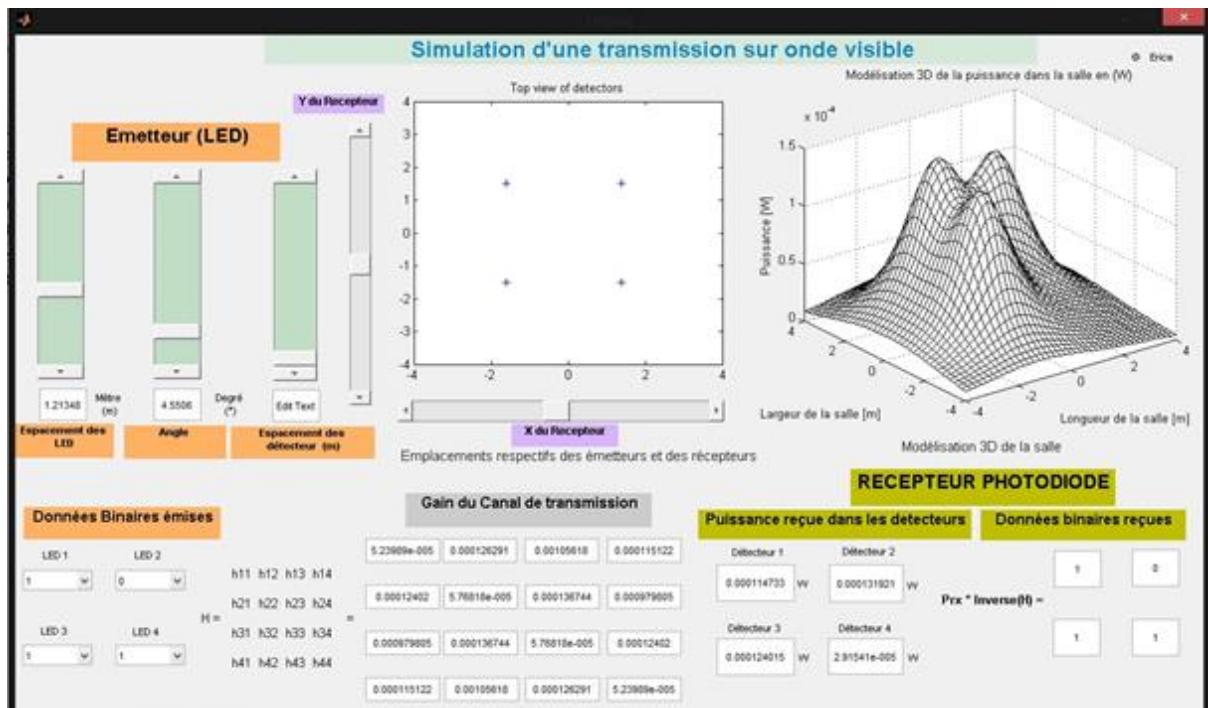


Figure 4.01 : Modélisation de la simulation de la suite binaire

La suite binaire est entrée dans le cadran données binaires émises. La valeur des LED est choisie en cliquant sur le panneau de chaque LED. Afin de modéliser la transmission nous avons utilisé 4 émetteurs. L'état 1 représente l'allumage de la LED et l'état 0 représente la LED éteinte. Nous pouvons visionner sur la figure suivante le cadran de paramétrage des données binaires.

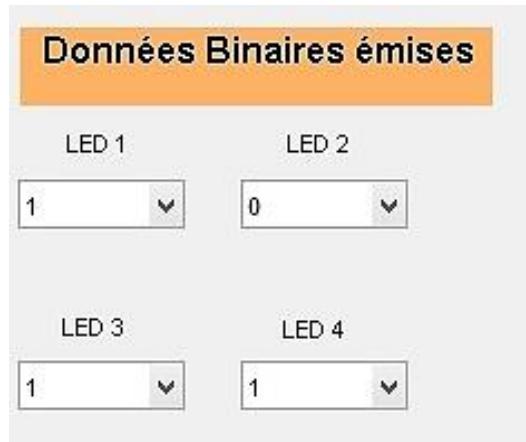


Figure 4.02 : Entrée de la suite binaire

Le paramétrage de la distance entre les émetteurs se fait dans le cadrant Emetteur (LED). Les 4 émetteurs forment un carré dont la valeur des cotés est paramétrable sur le slider espacement des LED. Plus la distance entre les LED augmente plus la séparation des spectres de puissance de chaque LED est observée au niveau de la modélisation 3D de la puissance dans la salle.

Le paramètre suivant permet le paramétrage de l'angle d'ouverture de chaque émetteur. Plus l'angle d'ouverture grandit, plus la portée de la puissance de rayonnement diminue. Contrairement plus l'angle d'ouverture est faible plus la portée de la puissance de rayonnement élevé.

Enfin le dernier paramètre configurable au niveau du cadrant de l'émetteur LED est l'espacement entre les détecteurs. Les détecteurs sont les récepteurs photodiodes. Plus les récepteurs photodiodes ont une distance synchronisée avec les émetteurs plus la transmission des données est précise et plus rapide.

Notons que la distance des espacements des émetteurs et récepteurs sont en mètre (m) et l'angle d'ouverture de l'ampoule LED est en Degré ($^{\circ}$).

La figure suivante nous montre les paramétrages de l'émetteur et du récepteur.

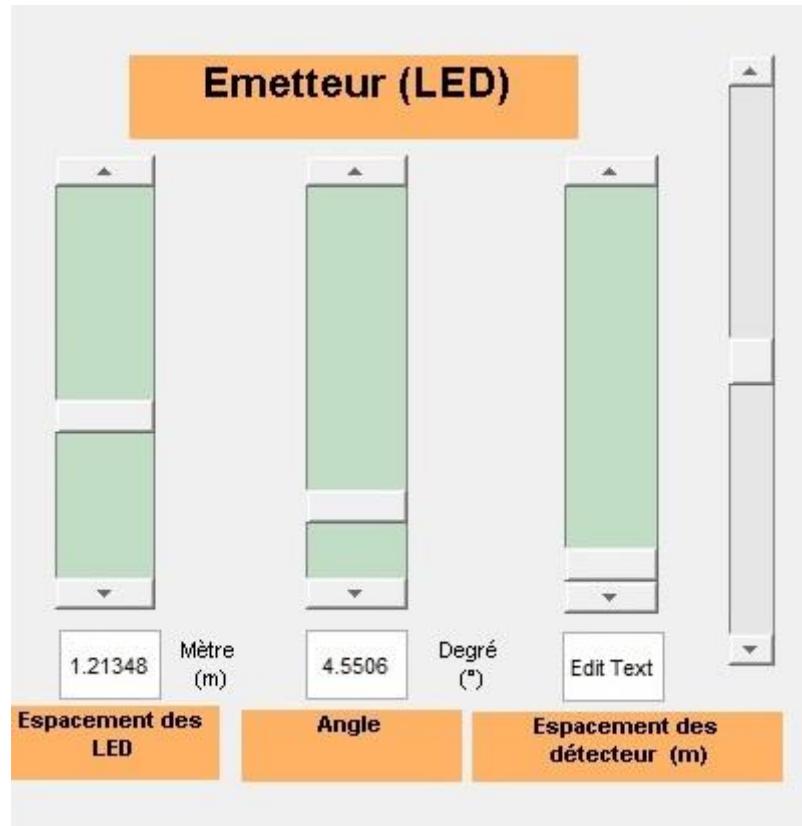


Figure 4.03 : Configuration des données de l'émetteur

Après la configuration de l'émetteur et récepteur, les configurations sont affichées sur le repère orthonormé suivant qui représente la salle.

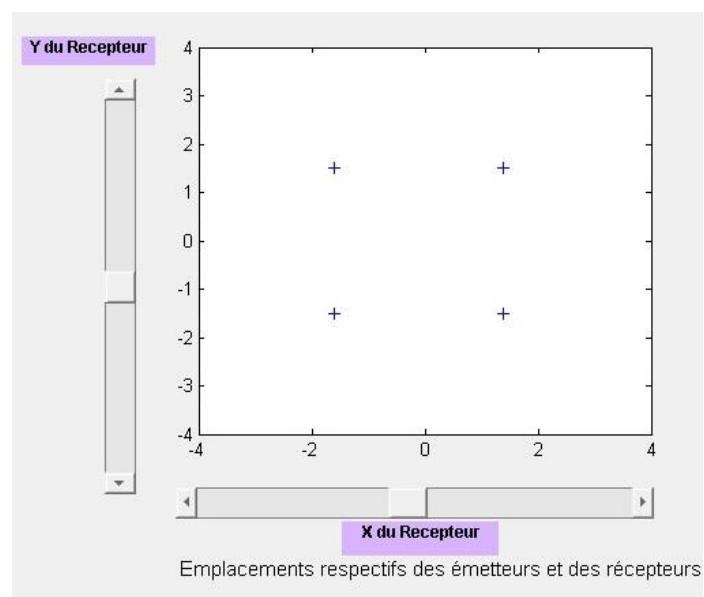


Figure 4.04 : Configuration de l'emplacement des TX et RX

Nous avons aussi les valeurs du gain du canal de transmission. Le canal de transmission étant représenté par une matrice 4×4 . Contrairement au canal idéalisé, un canal réel est affecté par le bruit. Le canal est caractérisé par une matrice de transition P ou appelée aussi matrice stochastique :

$$P = \begin{pmatrix} p(y_1|x_1) & \cdots & p(y_N|x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p(y_1|x_M) & \cdots & p(y_N|x_M) \end{pmatrix}$$

Avec

$$p(y|x) = \frac{p(x|y) \cdot p(y)}{p(x)} \quad (4.01)$$

Le canal est constant ou par opposition à un canal à mémoire si sa matrice de transition est constante dans le temps qu'il ne change pas d'un message au suivant. Nous considérerons uniquement des canaux constants.

Cas extrêmes :

- Le canal n'est pas perturbé par le bruit. Dans ce cas, $M = N$ et $PP \equiv I_N I$ modulo une renumérotation des y ou des x ou matrice identité d'ordre N .
- Il n'y a aucune corrélation entre les messages d'entrée et les messages de sortie, c'est-à-dire $p(y_1|x_1) = p(y_1)$. Dans ce cas, toutes les lignes de la matrice sont identiques.

Nous avons remarqué que pour un canal $0 \leq I(X ; Y) < H(X)$, les cas extrêmes étant celui d'un canal presque sans bruit ($I(X ; Y) \equiv H(X)$) et celui d'un canal qui ne transmet pas l'information ($I(X ; Y) = 0$).

Pour un cas intermédiaire, la matrice de transition P étant donnée, il serait utile de déterminer le maximum de $I(X ; Y)$ par rapport aux distributions de probabilités possibles pour les messages de la source ($p(x)$).

Afin d'améliorer la transmission, nous essayerons de privilégier $p(x)$ élevé les messages de la source qui ne sont pas affectés par les perturbations spécifiques au canal telles qu'elles sont indiquées par P), et d'utiliser le moindre possible des autres messages ($p(x) \equiv 0$).

Comme nous le voyons sur l'image suivante nous avons la représentation du gain de canal de transmission. Le canal de transmission représente la fonction de transfert des données binaires de l'émetteur et du récepteur.

Gain du Canal de transmission				
Gain du canal	h11	h12	h13	h14
H =	h21	h22	h23	h24
	h31	h32	h33	h34
	h41	h42	h43	h44
	5.23989e-005	0.000126291	0.00105618	0.000115122
	0.00012402	5.76818e-005	0.000136744	0.000979805
	0.000979805	0.000136744	5.76818e-005	0.00012402
	0.000115122	0.00105618	0.000126291	5.23989e-005

Figure 3 Modélisation du canal de transmission

%gain du canal
function gain= channelgain(xlocation, ylocation, phi, space);
m = -log(2)/log(cos(phi)); % Ordre d'émission de Lambertian %
Ro = ((m+1)/(2*pi))*cos(phi)^m; % Intensité rayonnante lambertienne %
HLOS = (ARX./hdist.^2).*cos((incidence*pi) /180)*Ro; % Fonction de transfert de canal %
Formule de calcul
Prx_los = PLED * HLOS; % Puissance reçue après canal de transfert en visibilité directe (Watt)%
Prx_diff = PLED / (Aroom) * rho / (1 - rho) * ARX; % Puissance reçue de diffusion%
Prx_total = (Prx_los + Prx_diff) * Tf * g; % Puissance total (W) %
gain=Prx_total/PLED % Gain du canal en Watt) %

Un calcul en visibilité (LOS, Line Of Sight) avec le canal de Rice et un calcul en non-visibilité (NLOS, Non Line of Sight) avec le canal de Rayleigh.

En effet, l'émetteur étant situé à une hauteur du récepteur, il s'agit principalement d'une propagation "guidée", l'émetteur et le récepteur étant en visibilité directe (LOS), soit (NLOS) pour les trajets réfléchis.

L'utilisation du LOS et du NLOS à la fois permet la réception du signal pour remédier au problème lorsque émetteur et récepteur ne sont pas alignés ou la présence d'un obstacle.

Grâce à l'utilisation du NLOS la lumière peut parvenir au récepteur même si le récepteur n'est pas en visibilité directe avec l'émetteur.

Nous avons utilisé le modèle Lambertien qui est le modèle le plus utilisé pour décrire le phénomène de réflexion à l'intérieur des diélectriques.

Ce modèle permet de relier l'irradiance incidente à un capteur à l'angle formé par l'onde incidente et la normale à la surface à l'aide de l'équation suivante :

$$I = K_{diff}(\cos\theta) \quad (4.02)$$

Avec K_{diff} est une constante dépendant du matériau.

Nous avons ensuite effectué la modélisation en 3D de la puissance dans la salle. La modélisation nous permet de visualiser la puissance émise par les LED, nous pouvons voir le spectre de puissance de la suite binaire 1011.

Comme la visualisation de la figure nous le montre, Nous pouvons observer la modélisation du spectre de puissance des émetteurs à l'état 1, et la modélisation du spectre de puissance de l'émetteur à l'état 0. Les émetteurs sont ici regroupés au centre de la salle. Nous pouvons constater dans la figure suivante la représentation de cette modélisation en 3D du spectre de puissance des émetteurs dans la salle.

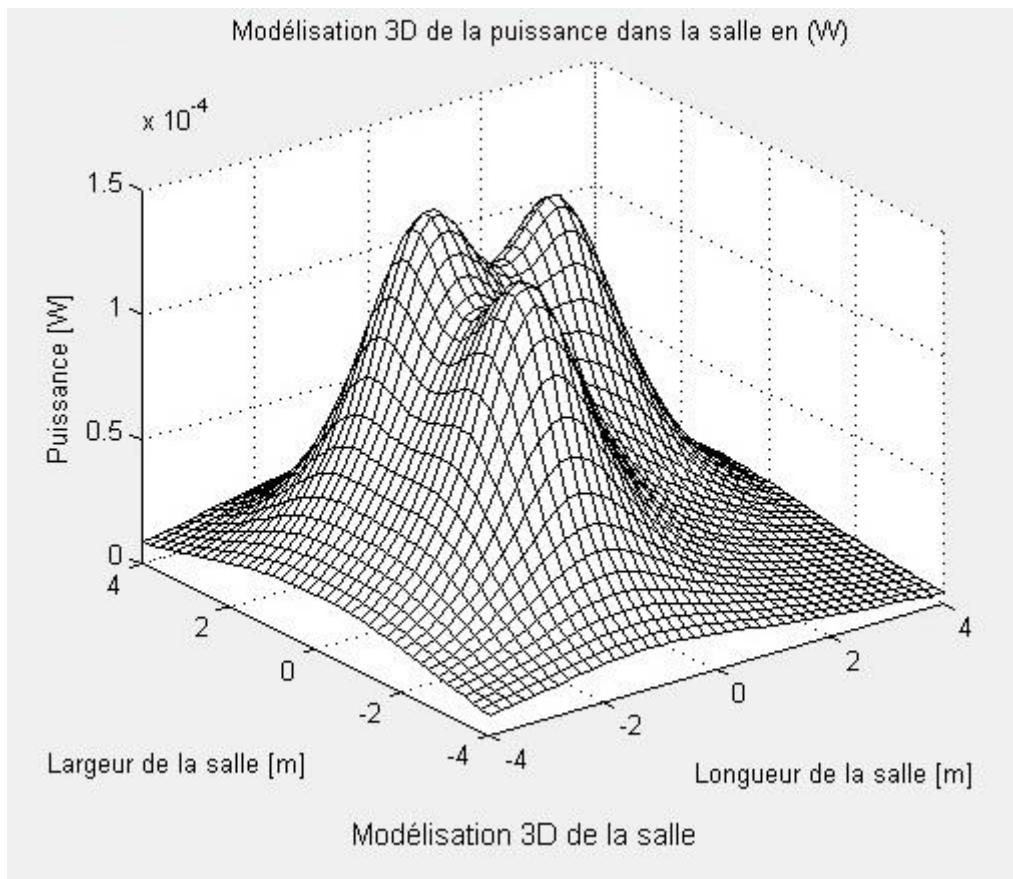


Figure 4.06 : Modélisation 3D de la puissance de la salle en (W)

Pour obtenir les données binaires à la réception, nous avons multiplié la valeur de la puissance reçue au niveau des détecteurs par la matrice inverse du canal de transmission. Ce calcul permet de déterminer la valeur des données binaires émises, cela malgré les atténuations de l'air qui ont perturbé la transmission des rayons des émetteurs. Notons ici que la valeur reçue par chaque détecteur dépend de l'emplacement respectif des détecteurs aux émetteurs.

La réception dépend donc sur 3 principaux critères :

- Atténuation et réflexion des rayons lumineux qui sont émis par les LED à l'émetteur
- L'emplacement respectif de chaque détecteur.
- Obstacle des rayons lumineux

Nous avons notées que si les deux critères sont pris en compte, le système Li-Fi tend vers un résultat de taux d'erreur quasiment nul.

Nous avons sur la figure suivante la représentation de la simulation de ce récepteur.



Figure 4.07 : Modélisation des données reçues aux RX

```
% Recepteur Rx
function [Prx_total, Prx_total_nolen, SNRdB, impulse_response_t,
impulse_response_tdiff, impulse_response_f, impulse_response_fdiff ]=
Formule de RxSNR(incidence,hdist,t,phi)
calcul g = n_conc^2 / (sin(psi_c)^2); % Gain du concentrateur %
% puissance total reçue (W) %
Prx_diff_total = Prx_diff *Tf*g; % Puissance reçue totale %
g = n_conc^2 / (sin(psi_c)^2); % Puissance du gain du concentrateur %
% Puissance total (W) %
Prx_total = ( Prx_los + Prx_diff ) * Tf * g; % Puissance totale %
Prx_diff_total = Prx_diff *Tf*g; % Puissance total de diffusion %
```

Les données reçues aux récepteurs sont les puissances émises par les LED. Pour reconstruire les données nous multiplions les puissances reçues dans les détecteurs par l'inverse de la matrice canal.

4.2 Analyse et interprétation des résultats

Afin de modéliser les points essentiels dans la transmission sur la lumière visible, nous avons & établit le diagramme suivant :

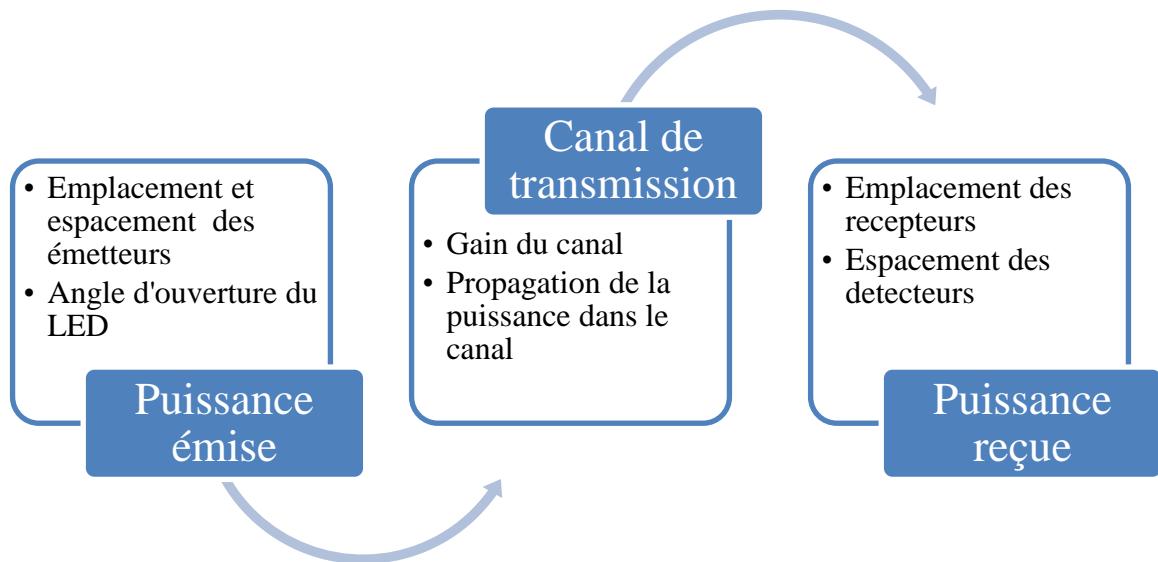


Figure 4.08 : Modélisation des points essentiels de la simulation

La simulation de la transmission Li-Fi permet de modéliser mathématiquement le fonctionnement de chaque composant.

Grâce à cette simulation nous avons pu déterminer avec précision la nécessité et le changement provoqué par l'angle d'ouverture de la diode LED.

L'angle d'ouverture de la diode est donc le paramètre clé de l'émetteur pour permettre une optimisation de la performance de la réception.

Les deux cas concernant l'angle d'ouverture possible sont représentés sur les figures suivantes :



Figure 4.09 : Variation de l'angle d'ouverture en fonction de la portée



Figure 4.10 : Variation de l'angle d'ouverture en fonction de la portée

Ces figures nous suggèrent que l'angle d'ouverture de la diode LED varie inversement proportionnel à la portée des rayons émis.

Nous avons noté aussi que l'optimisation de la transmission dépend aussi de l'alignement entre les émetteurs et les récepteurs. Cet alignement permet aux rayons lumineux une trajectoire droite sans réflexion qui permet de diminuer le risque d'erreur.

Etant donné que le récepteur peut être en mouvement nous avons intégré au niveau de l'application la possibilité de déplacer le récepteur tout en tenant compte des réflexions possibles des rayons lumineux. Grâce à l'intégration de toutes les propriétés physiques de la lumière, le logiciel Matlab permet de simuler avec une grande précision le déroulement de la transmission.

Ensuite nous pouvons aussi déduire que l'augmentation du nombre de diode LED permet aux systèmes d'adopter la technique MIMO.

Les technologies MIMO utilisent plusieurs émetteurs à l'émission et à la réception afin d'améliorer la qualité du rapport signal sur bruit (SNR) ou le débit de transmission. Cela permet aussi de pouvoir diminuer le niveau, mais aussi de prolonger l'autonomie des batteries dans le cas d'un téléphone.



Figure 4.11 : Variation du nombre de LED en fonction de la performance

4.3 Analyse de la performance du système

Dans ce paragraphe nous allons évaluer la performance de notre système. Sur le principe, si les facteurs qui peuvent impacter une liaison demeurent stables dans le temps, ce qui est impossible, plus la force du signal est élevée, plus la transmission de données est rapide. Mais cette augmentation de performance est dépendante de la capacité du système à disposer d'un bon algorithme pour sélectionner le niveau de modulation adéquat à employer au niveau de la couche physique.

Pour l'analyse de la performance de notre système nous avons utilisé Matlab. Ici nous étudierons 3 points essentiels :

- La courbe de la puissance reçue ;
- La courbe du signal de sortie dans le domaine temporel ;
- La courbe du signal de sortie dans le domaine fréquentiel.

4.3.1 Analyse de la courbe de la puissance reçue

Pour analyser la puissance reçue par le récepteur, nous allons analyser la puissance reçue en fonction de la longueur de la surface, pour le cas d'une transmission avec atténuation et bruité et ensuite prendre des points pour le cas d'une transmission idéale.

La figure 4.12 analysera la courbe de puissance reçue dans une salle pour le cas d'une Diode LED.

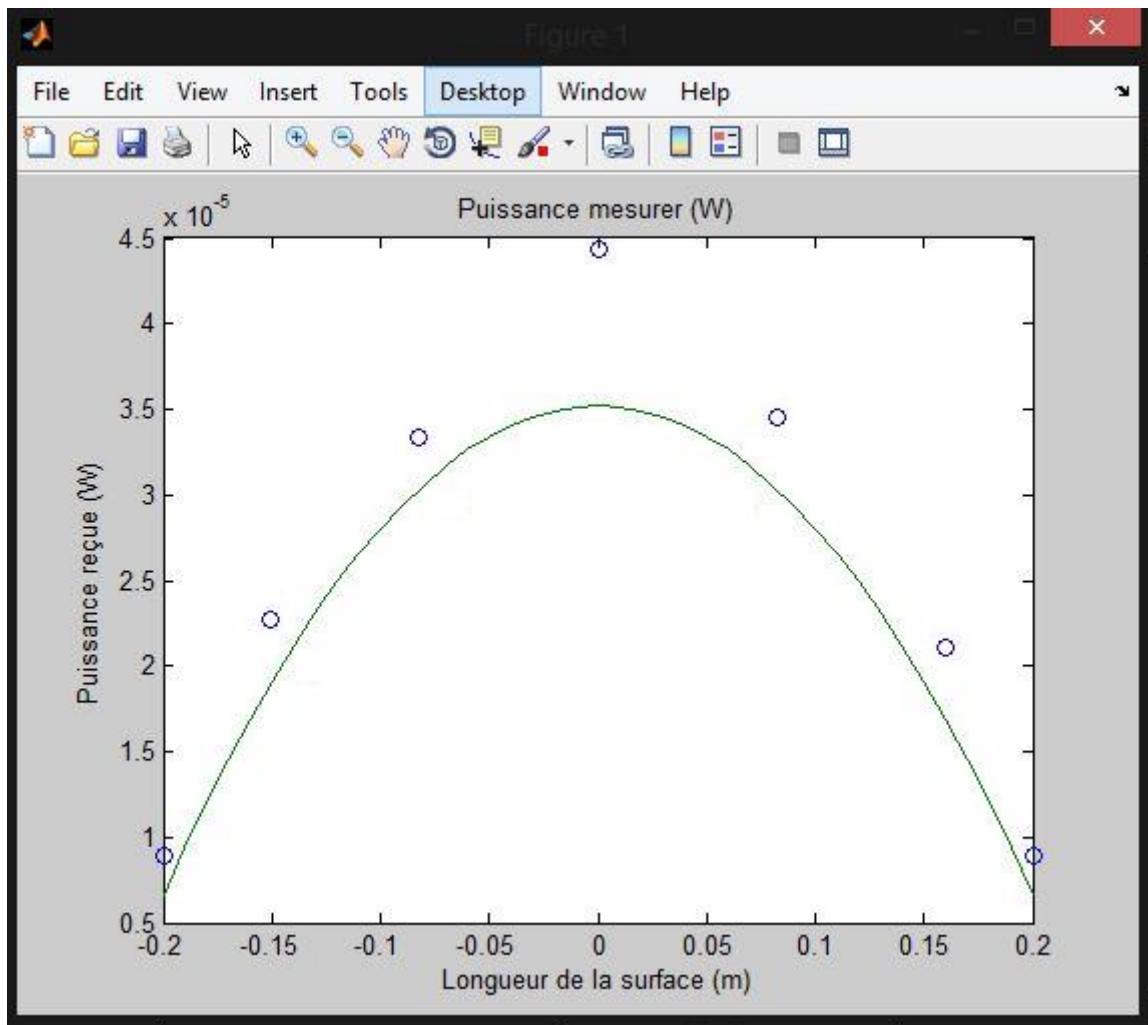


Figure 4.12 : Courbe de la puissance reçue

Sur cette figure, nous pouvons déduire que la puissance maximale reçue est à l'origine 0 de la diode LED. Pour le cas d'une transmission idéale, la valeur maximale est de $4.5W \times 10^{-5}W$ à l'origine de la diode. Par contre elle est de $3.5 \times 10^{-5}W$ avec l'atténuation.

La perte de puissance à cause de l'atténuation et du bruit pour chaque point est donc de :

$$P1(\%) = \frac{3.5}{4.5} \times 100 = 77\%$$

$$P2(\%) = \frac{0.5}{0.8} \times 100 = 62.5\%$$

$$P3(\%) = \frac{3}{3.4} \times 100 = 88\%$$

4.3.2 Analyse de la courbe du signal de sortie dans le domaine temporel

Nous allons analyser le signal de sortie dans le domaine temporel. L'observation de la réponse temporelle ou du spectre nous donne des renseignements très intéressants sur les propriétés du système. La figure 4.13 nous montre l'évolution du signal de sortie dans le domaine temporel.

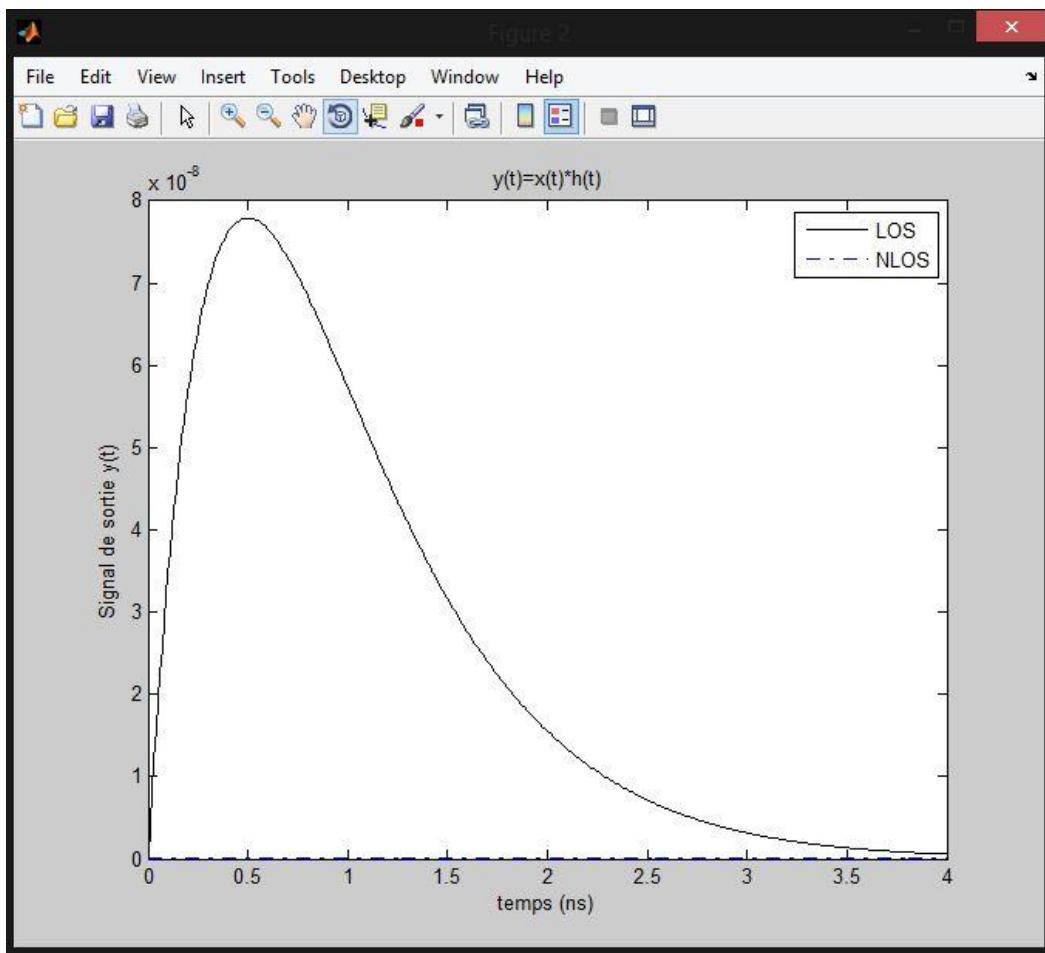


Figure 4.13 : Signal de sortie dans le domaine temporel

La figure ci-dessous représente 2 courbes

- LOS

Pour le cas de la courbe LOS elle est maximale pour $t = 0.5$ ns. Après $t = 0.5$ ns la courbe tend vers 0.

Sur la courbe du LOS, nous pouvons observer que le temps de réponse de la transmission entre l'intervalle 0 et 0.5 ns.

- NLOS

Pour le cas de la courbe NLOS elle admet un retard donc dans l'intervalle de temps 0 à 4 elle est égal à une valeur nulle.

4.3.3 Analyse de la courbe de signal de sortie dans le domaine fréquentiel

Parallèlement à cet aspect temporel, il est souvent intéressant d'utiliser une représentation en fonction de la fréquence. En effet, si nous souhaitons mesurer le niveau de distorsion du signal ou que nous voulons détecter le bruit dans la transmission. Dans les deux cas, nous essayons de détecter une composante sinusoïdale de faible amplitude en présence d'un signal ayant une contribution beaucoup plus importante. La figure 4.14 nous montre le signal dans le domaine temporel.

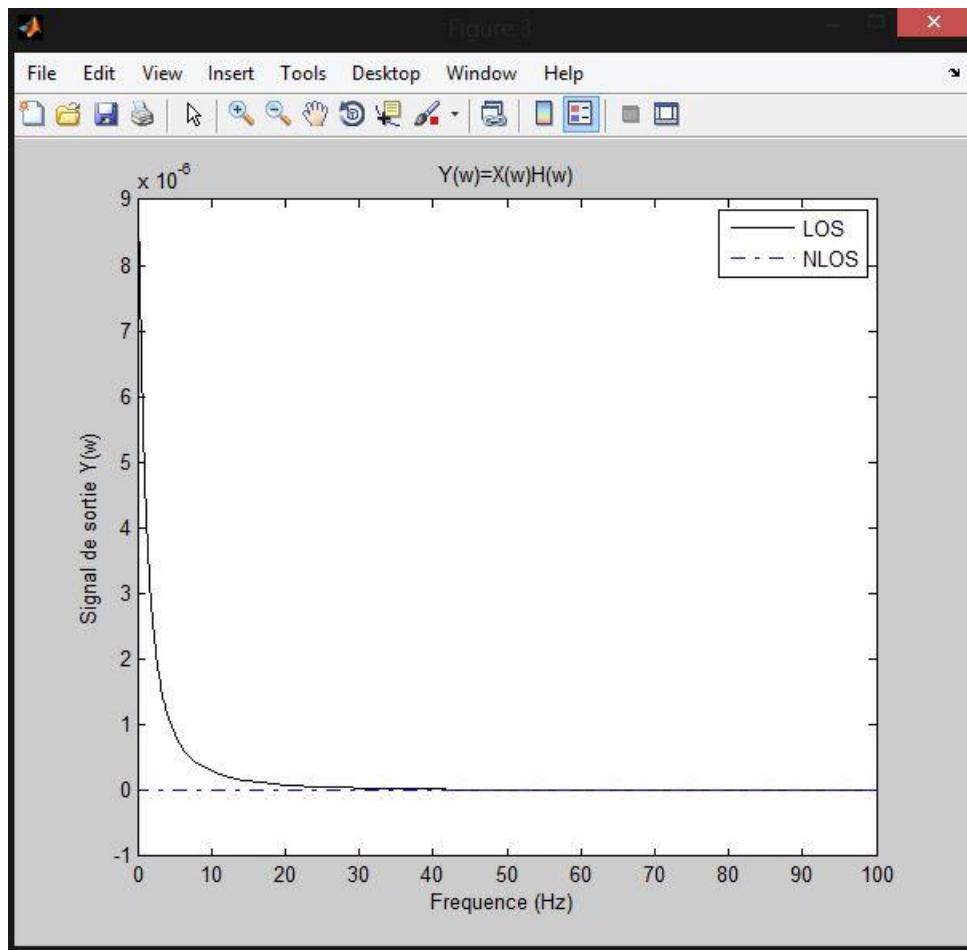


Figure 4.14 : Signal de sortie dans le domaine fréquentiel

- LOS

Nous pouvons déduire de cette courbe que quand la fréquence du signal tend vers 0 le signal de sortie est maximal, et si la valeur de la fréquence du signal tend vers 40Hz le signal tend vers 0.

- NLOS

Pour le cas de la courbe NLOS la valeur du signal $Y(w)= 0$ pour chaque valeur de la fréquence

4.3.4 Analyse de l'autocorrélation

L'autocorrélation, c'est la corrélation croisée d'un signal par lui-même. Il s'agit donc de la moyenne temporelle du produit du signal par lui-même décalé d'un temps τ . La fonction d'autocorrélation est paire ; on peut donc l'étudier pour $\tau>0$.

L'autocorrélation permet de détecter les régularités, les profils répétés dans un signal comme un signal périodique perturbé par beaucoup de bruit, ou bien une fréquence fondamentale d'un signal qui ne contient pas effectivement cette fondamentale, mais l'implique avec plusieurs de ses harmoniques.

Nous chercherons donc à générer des familles de codes permettant d'obtenir un grand nombre de séquences ainsi que des propriétés d'autocorrélation maximal et d'intercorrélation minimales afin de limiter l'impact du bruit sur la transmission.

La fonction d'autocorrélation est calculée par la fonction suivante sous Matlab :

```
def autocorrel(x,N,i,M):  
    C = numpy.zeros(N)  
    for k in range(i,i+M):  
        for n in range(N):  
            C[n] += x[k]*x[k-n]  
    return C/M
```

L'analyse de l'autocorrélation permet d'analyser la performance de notre système de transmission par onde visible. Une série autocorrélée est ainsi corrélée à elle-même, avec un décalage (*lags*) donné.

La figure 4.15 nous montre le signal de sortie dans le domaine temporel et ensuite le signal obtenu après l'autocorrélation.

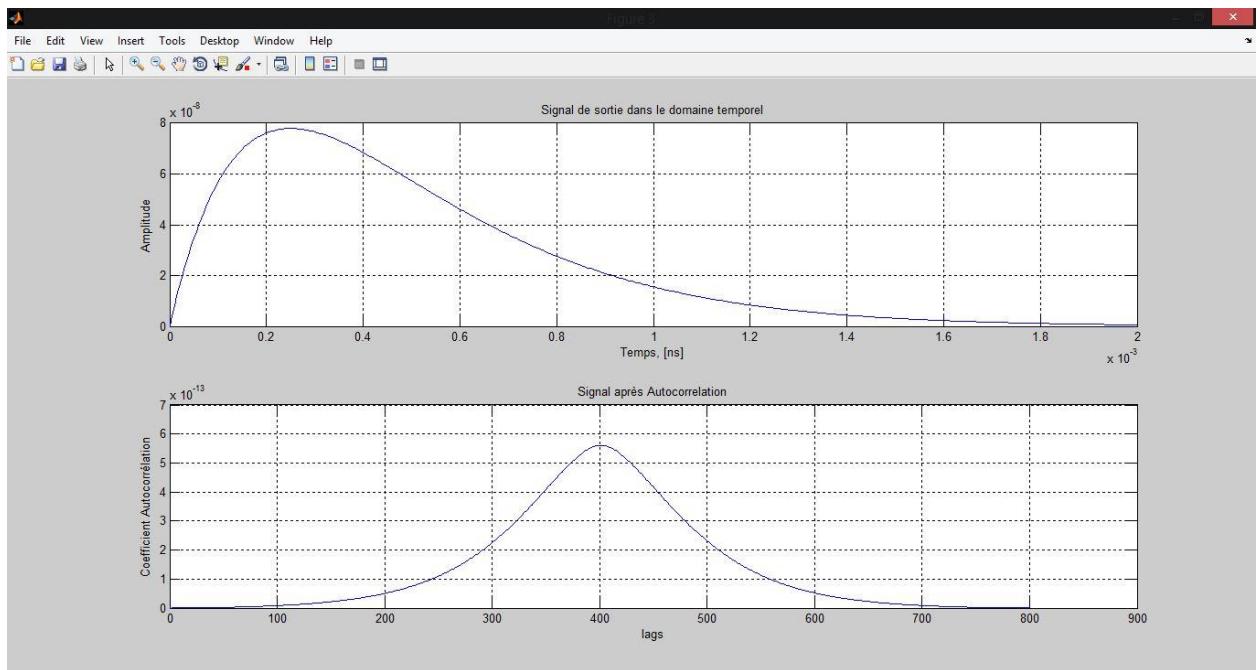


Figure 4.15 : Signal après autocorrélation

Une séquence de synchronisation doit présenter une fonction d'autocorrélation maximale pour un décalage nul.

L'autocorrélation est particulièrement forte pour le décalage 400 lags. Avec une valeur du coefficient d'autocorrélation égal à 5.5×10^{-13} .

Sur ce graphique, le temps de corrélation est égal au pic de la courbe à la valeur 400 lags. Ce temps de corrélation correspond au temps que le signal met à ne plus se "ressembler".

Le temps nécessaire pour que l'autocorrélation tende vers 0 est appelé temps de corrélation. Cela correspond au temps nécessaire pour que le processus physique n'ait plus de mémoire.

Ainsi, la recherche d'une ressemblance au sein du signal permet de retrouver les retards qui se superposent au signal original. Cependant, au-delà de l'aspect purement retard, il y a la présence d'un pic d'autocorrélation, l'aspect de l'autocorrélation

4.3.5 Analyse de l'intercorrélation du signal avec du bruit

Le concept que nous proposons de mettre en œuvre au cours de cet analyse est l'intercorrélation entre deux signaux. Ce concept vise à extraire le taux de ressemblance entre deux signaux

unidimensionnel, signaux temporels avec le bruit. Cela nous permettra d'analyser la corrélation de chaque type de bruits au signal optique.

On distingue 3 types de bruits :

- Bruit déterministe (dépend des caractéristiques du support) ;
- Bruit aléatoire (perturbations accidentelles) ;
- Bruit blanc (agitation thermique des électrons).

Le bruit qui perturbe le plus la communication sur onde visible est le bruit aléatoire. Il peut modifier notamment le signal à certains moments et produire des confusions entre "0" et "1". Pour cette raison, il faut veiller à ce que la puissance du signal soit supérieure à celle du bruit.

Pour simuler l'effet du bruit sur le signal, l'analyse de l'intercorrélation est indispensable. L'intercorrélation du signal ainsi construit (bruit+ train d'onde) avec le train d'onde permet de localiser le train d'onde sans ambiguïté dans la fonction d'intercorrélation.

La fonction d'intercorrélation avec le bruit est calculée par la fonction suivante sous Matlab :

```
r = xcorr(x,y)  
r = xcorr(x)  
r = xcorr(___,maxlag)  
r = xcorr(___,scaleopt)  
[r,lags] = xcorr(___)
```

4.3.5.1 Intercorrélation avec du bruit impulsif

Les bruits impulsifs sont produits par des variations transitoires des ondes dans l'environnement proche. Ces variations induisent des signaux qui perturbent la transmission. La simulation du bruit impulsif permet de montrer le point de corrélation du bruit impulsif au signal optique.

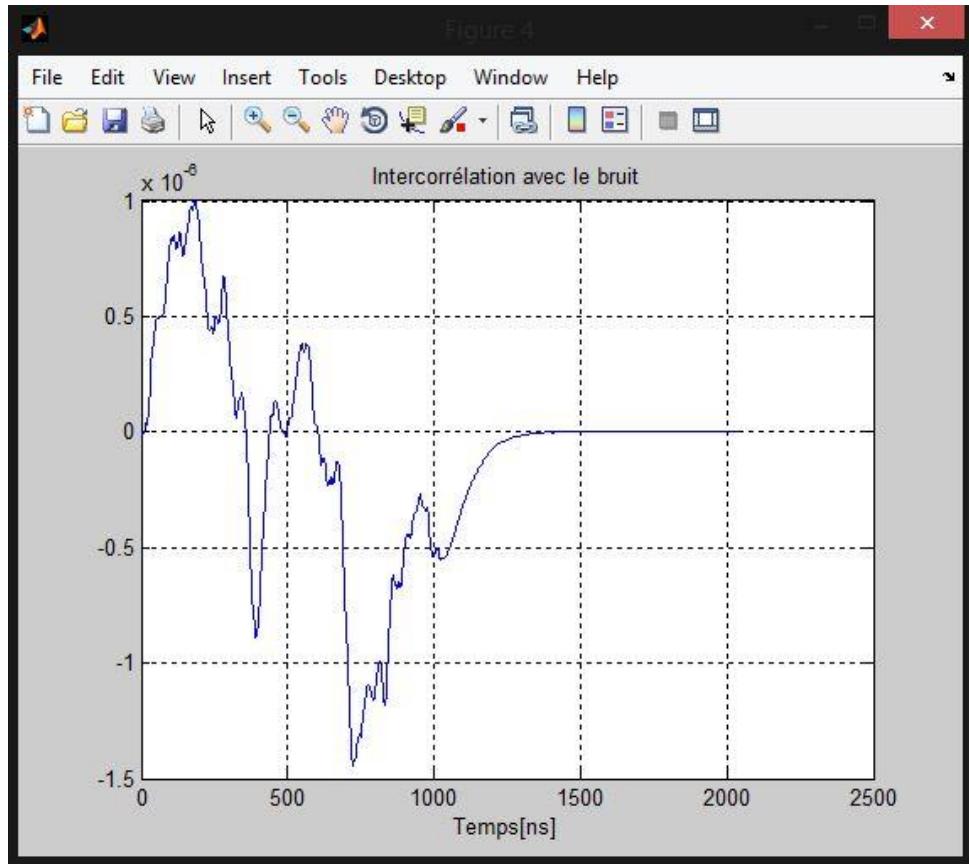


Figure 4.12 : Intercorrelation avec du bruit impulsif

Si le niveau de bruit augmente, nous pouvons retrouver le signal de référence dans le bruit, comme sur le cas de notre image. Sur cette figure, nous pouvons observer que l'intercorrélation du bruit impulsif avec le signal est maximum entre 0 et 350 ns mais notons que la courbe de l'intercorrélation varie en fonction de la fonction ou bruit corrélé avec le signal. Pour que la performance du système soit maximale il faut que l'intercorrélation soit minimale.

Dans notre simulation, l'intercorrélation du signal optique est affectée par le bruit impulsif pendant une durée de 350 ns où la valeur de l'intercorrélation est maximum. Nous pouvons constater que la durée du bruit n'est que de l'ordre de "ns" mais son impact est notable sur la transmission. Nous pouvons mettre en évidence l'impact du bruit impulsif pendant les 350 ns sur le signal optique.

Après 500 ns le coefficient d'intercorrélation tend vers 1.5×10^{-6} ensuite tend vers 0.

4.3.5.2 Intercorrelation avec le bruit gaussien de forte amplitude (1,500)

Le modèle de bruit le plus couramment rencontré dans les mesures est le bruit Gaussien. Il est réalisé par la commande "randn", données fournies par le répertoire ``elmat'', help elmat. Pour

notre analyse nous allons voir l'intercorrélation du bruit gaussien de forte amplitude avec le signal optique. La figure suivante présente cette intercorrélation.

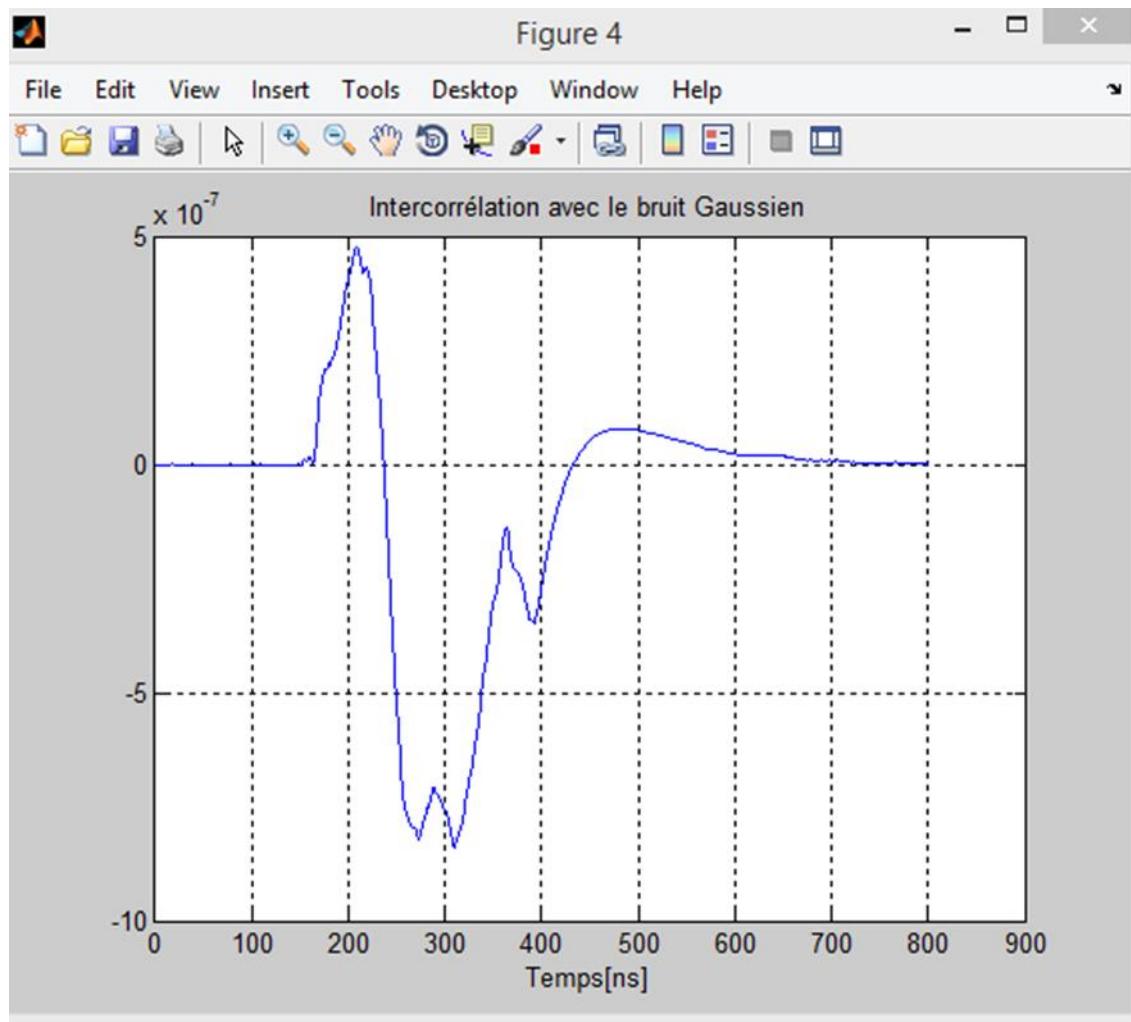


Figure 4.13 : Intercorrélation du signal optique avec le bruit Gaussien

Comme la courbe nous le montre, l'intercorrélation avec la courbe du bruit Gaussien à forte amplitude nous renseigne que :

- La courbe est maximale au point 200 ns avec un coefficient d'intercorellation égal à 5. Cela signifie que le signal optique est totalement la similitude entre deux signaux sont au maximum. L'intercorrélation maximum au point 200 ns peut entraîner une confusion de l'information émise ;
- La courbe admet une valeur minimales entre 250 et 3500 ns car le signal optique admet un coefficient d'autocorrélation maximal en ce point.

4.3.5.3 Intercoréllation avec le bruit Gaussien de faible amplitude (1,10)

Si le bruit gaussien est indépendant du signal optique, l' intercorrélations sont nulles pour tout valeur de temps ou lags. Si de plus la densité spectrale du bruit est absolument continue.

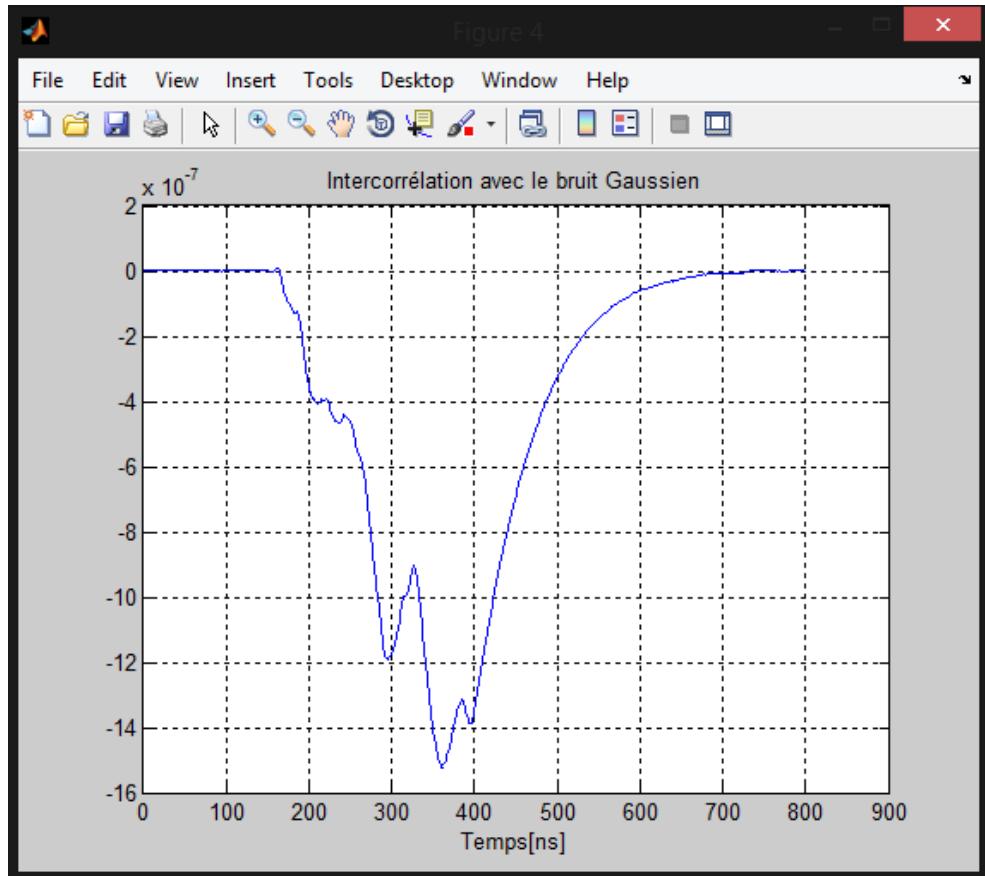


Figure 4.14 : Intercorrelation du signal optique avec le bruit Gaussien de faible amplitude

La courbe ci-dessus nous montre, l'intercorrélation avec la courbe du bruit Gaussien à faible amplitude nous suggère que :

- La courbe est toujours inférieure à un coefficient d'intercorrélation égal à 0. Cela signifie que le signal optique n'admet pas de perturbation au bruit Gaussien de faible amplitude ;
- La courbe admet une valeur minimum entre 300 et 400 ns car le signal optique admet un coefficient d'autocorrélation maximal en ce point. Quand l'autocorrélation est maximal la valeur des $f(i)$ est dépendant de l'un à l'autre..

4.3.5.4 Intercorrélation avec le bruit déterministe

Un bruit est dit déterministe, s'il n'existe aucune incertitude sur son comportement dépendant du temps quels que soient les instants du temps.

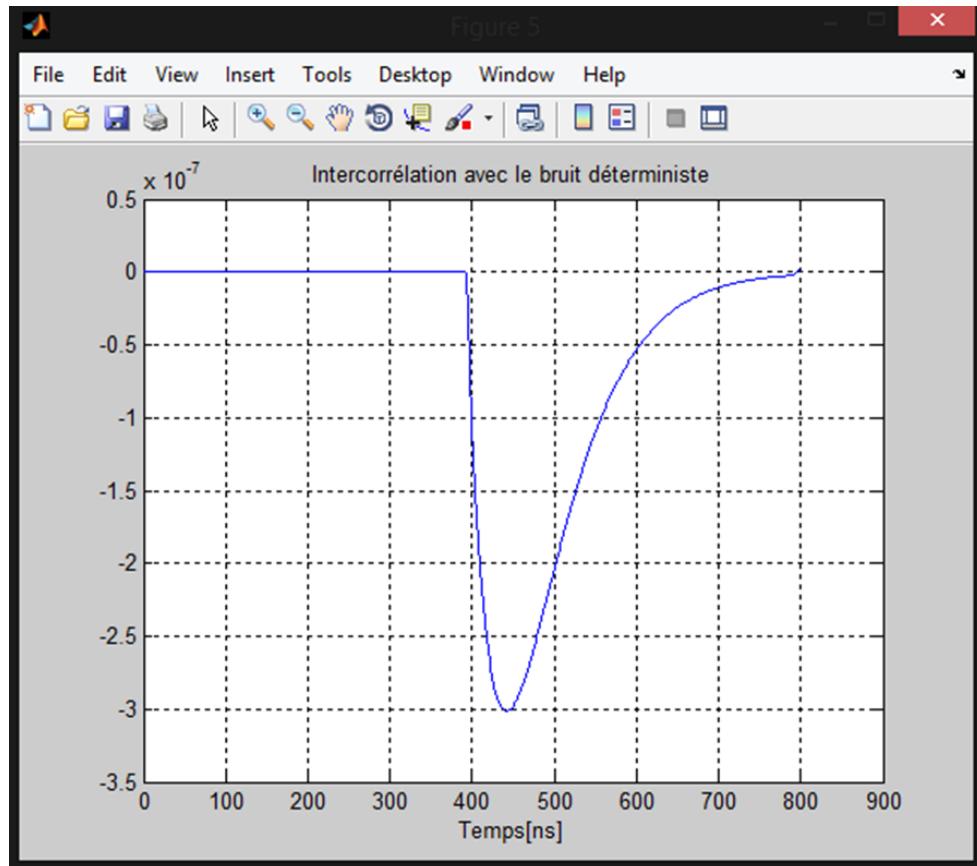


Figure 4.15 : Intercorrelation du signal optique avec le bruit déterministe

Comme la courbe nous le montre, l'intercorrélation avec la courbe du bruit déterministe nous montre que :

- La courbe est toujours inférieure à un coefficient d'intercorrélation égal à 0. Cela signifie que le signal optique n'admet pas de perturbation au bruit déterministe.
- La courbe admet une valeur minimum au point 450 ns car le signal optique admet un coefficient d'autocorrélation maximal en ce point. Plus précisément il admet des $f(i)$ qui admet une dépendance l'un à l'autre.

4.3.5.5 Résumé de l'impact du bruit sur le signal optique

Après l'analyse de l'intercorrélation, on peut résumer l'impact du bruit à notre transmission par le tableau suivant :

Type de Bruit	Niveau d'intercorrélation	Interprétation de l'impact du bruit
Bruit impulsif	Elevé entre 0 et 500 lags avec une valeur de coefficient d'intercorrélation 1×10^{-6}	La transmission par onde visible est affectée par le bruit impulsif, car la valeur du coefficient d'intercorrélation est supérieure à 0. Cela entraîne un risque de confusion entre symbole
Bruit Gaussien de forte amplitude (1,500)	Elevé au point 200 lags avec une valeur de coefficient d'intercorrélation 5×10^{-7}	La transmission par onde visible est aussi affectée par le bruit Gaussien de forte amplitude, car la valeur du coefficient d'intercorrélation est supérieure à 0. Cela entraîne un risque de confusion entre symbole
Bruit Gaussien à faible amplitude (1,10)	La courbe ne dépasse pas la valeur 0 et possède une valeur de coefficient d'intercorrélation minimum de -15×10^{-7} au point 350 lags	La transmission par onde visible n'est pas affectée par un bruit gaussien à faible amplitude comme pour le cas de l'exemple, le coefficient d'intercorrélation est inférieur et égal à 0
Bruit déterministe	La courbe ne dépasse pas la valeur 0 et possède une valeur de coefficient d'intercorrélation minimum de -3×10^{-7} au point 450 lags	La transmission par onde visible n'est pas affectée par un bruit gaussien à faible amplitude comme pour le cas de l'exemple, le coefficient d'intercorrélation est inférieur et égal à 0

Tableau 4.02 : Impact du bruit dans la liaison sur onde visible

4.4 But de la simulation

Comme la technologie Li-Fi est encore sous forme de concept, notre simulation permet de démontrer la possibilité de réalisation d'une transmission Li-Fi avec l'analyse de sa performance.

Ce projet est aussi été réalisable par l'utilisation directe des composantes électroniques. Malheureusement, ce nouveau système a beau paraître parfait, de gros points restent à améliorer. A commencer par le fait que ce réseau ne fonctionne uniquement que lorsque l'ampoule LED est allumée. De plus, elle doit se situer à proximité du récepteur car le signal est de courte portée. Il sera donc impératif d'installer une lampe dans chaque pièce et de la laisser allumer.

A ceci s'ajoute qu'actuellement le signal est unidirectionnel, c'est à dire que nous pouvons recevoir des informations mais ne pouvons pas en émettre, donc l'architecture Li-Fi doit être couplé avec un autre réseau comme le CPL ou le Wifi.

Après cette simulation la recherche peut se concrétiser pour la réalisation d'une transmission Li-Fi.

Les objectifs de cette simulation sont :

- Comprendre le fonctionnement de la transmission Li-Fi.
- Connaitre le fonctionnement de chaque bloc de la transmission.
- Analyser la propagation de la puissance d'émission des LED.
- Analyser la propagation de la lumière dans un canal à gain.
- Perfectionner et optimiser une transmission Li-Fi.
- Analyser la performance du système et l'impact du bruit.

4.5 Avantages et faiblesses de la technologie selon notre simulation

Pendant notre simulation de la transmission Li-Fi, plusieurs points. Dans le ce tableau ci-dessous nous allons les recenser les avantages et les inconvénients.

Avantages	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none">• Performance de la technologie en visibilité directe et en trajet réfléchi.• Gain du canal faible.• Rapidité de la transmission grâce à la visibilité directe (LOS).• Taux d'erreur très faible• Temps de latence très faible.	<ul style="list-style-type: none">• Sensibilité à l'obstacle opaque car les rayons lumineux ne pénètrent pas la matière opaque.• Faible portée du rayonnement.

Tableau 4.03 : Avantages et faiblesses de la technologie d'après la simulation

4.6 Limites et Améliorations envisageables

Un obstacle, même fin, peut empêcher la transmission du faisceau de lumière. Mais le problème majeur est au niveau de l'interférence avec le rayonnement du soleil par exemple. La lumière du soleil peut également être une source de perturbation. Ces points restent un domaine d'analyse pour l'amélioration de la transmission par onde visible.

Quelles sont donc les limites potentielles de cette technologie ? Le spectre des ondes dans le domaine du visible est bien connu et avec l'utilisation de la lumière blanche, ce dernier est déjà exploité de façon très performante. Cependant on vient de voir dans le point précédent que les fréquences d'utilisation des trois couleurs sont de plus en plus élevées, mais on ne sait pas jusqu'où celles-ci pourront aller. Le débit des données transmises peut être augmenté par d'autres techniques comme l'égalisation ou le MIMO

CONCLUSION GENERALE

La communication par lumière visible utilise des impulsions lumineuses pour transmettre des informations à distance. Cette technologie, autrement désignée Li-Fi, pourrait dans certains cas devenir une alternative au Wi-Fi. La technologie Light Fidelity utilise le spectre visible de la lumière pour transmettre des données, de ce fait elle appartient aux VLC. Les systèmes Li-Fi d'aujourd'hui communiquent de manière assez primaire, en suivant le principe du télégraphe optique et de la modulation d'intensité. Ils permettent néanmoins d'atteindre des débits de transmission très importants jusqu'à 4 Gbps contre 450 Mbps pour les meilleurs systèmes Wi-Fi. Ses avantages sont nombreux : s'affranchir de la diffusion d'ondes radio, atteindre des débits importants, transformer n'importe quelle source de lumière en hot spot internet haut débit, communiquer dans des milieux difficiles, fournir de l'énergie en parallèle d'un accès réseau. Ses inconvénients sont également bien. Cela en fait une technologie prometteuse mais destinée à des usages très spécifiques dans un premier temps.

Grâce aux progrès réalisés en termes de débit et d'architecture, le Li-Fi devient une technologie sans-fil de plus efficace et prometteuse.

Toujours est-il, comme évoqué dans ce mémoire de recherche, le problème du Li-Fi réside dans la difficulté à obtenir une voix montante ou coté client nomade ce qui élimine la majorité des cas potentiels d'adoption. Malgré le fait qu'il soit unidirectionnel pour le moment, les possibilités d'utilisation sont nombreuses.

Dans notre projet, la simulation d'un concept de transmission nous permet de mieux comprendre les principaux problèmes et comment y remédier. D'abord la réception du signal peut engendrer un problème, lorsque l'émetteur et récepteur ne sont pas alignés. Cependant, grâce à notre simulation nous avons démontré que l'intégration du LOS et du NLOS dans le calcul permet de remédier à ce problème fondamental de la communication par onde visible. Ensuite la faiblesse de la technologie au niveau du faisceau lumineux, qui garantit la sécurité des informations transmises, mais cela peut être un inconvénient car il empêche l'utilisateur de se déplacer en dehors de la zone d'éclairage et nécessite que la lumière soit constamment allumée. Pour résoudre les difficultés citées précédemment, nous avons opté pour l'utilisation de la technique MIMO (Multiple in Multiple out). Cette technique consistait à utiliser plusieurs émetteurs et récepteurs. Grâce à cette technique nous obtenons non seulement une amélioration du débit fonctionnel mais aussi une amélioration de la zone de couverture du réseau Li-Fi.

En définitive, il s'avère que le Li-Fi a souvent fait l'actualité ces dernières années mais ne s'est jamais concrétisé commercialement. Pourtant, cette technologie étant d'actualité et indispensable pour la mise en œuvre de la 5^{ème} génération de réseau et la mise en œuvre de la ville intelligente. De plus, grâce à la vitesse de propagation importante de la lumière, nous pouvons nous attendre à des latences très faibles.

Ce projet nous a permis, premièrement de comprendre comment bien déterminer les objectifs et les limites d'un projet à réaliser et deuxièmement de diriger le mémoire qui se basera sur ce projet de recherche. Notre projet pourrait être amélioré sur de divers points, comme créer le module pour la transmission Li-Fi, augmenter la fréquence de transmission ou bien créer une couche logicielle permettant de gérer la transmission entre l'émetteur et le récepteur.

Il serait aussi très intéressant de faire l'étude de faisabilité d'une transmission bidirectionnelle avec un retour en infrarouge ou wifi du côté client.

ANNEXE 1 : BASE DE L'OPTIQUE GEOMETRIQUE

A1.1 Généralités sur la lumière

La lumière n'est ni une onde, ni un ensemble de particules mais une onde-particule (l'ornithorynque n'est ni un canard, ni un castor mais un ornithorynque).

A1.2 Indice de réfraction d'un milieu

Il est obtenu par le rapport entre la célérité de la lumière dans le vide et la vitesse à laquelle elle se propage dans le milieu considéré :

Matières	Indices
Vide	1,00
Eau	1,30
Verre	1,50
Diamant	2.42

Tableau A1.01 : Exemple d'indice de réfraction de certains milieux

A1.3 Le chemin optique

La notion de chemin optique permet de traduire de manière géométrique l'influence de l'indice de réfraction des milieux sur la vitesse de la lumière. Le chemin optique est égal à la distance que la lumière aurait parcourue pendant le même temps dans le vide.

En pratique, dans un milieu homogène d'indice n , pour une distance parcourue $[AB]$, le chemin optique L_{AB} s'exprime :

$$L_{AB} = [AB] \times n$$

Dans une approche continue et non discrète du chemin optique :

$$\int_A^B n(x) dx^5$$

Le principe de Fermat s'appuie sur cette notion de chemin optique : « entre 2 points, la lumière suit le trajet correspondant à un chemin optique stationnaire (constant) c'est-à-dire le chemin avec le temps de parcours minimal.

A1.4 Lois de l'optique géométrique

Deux grands principes ont fondé l'optique géométrique :

- Le principe de Fermat qui énonce que le trajet de la lumière est toujours un extremum, donc que le rayon lumineux passera toujours par le trajet le plus rapide ou un point col (ou le plus long parmi les chemins respectant des contraintes imposées) ;
- Le principe du retour inverse de la lumière énonçant que le trajet d'un rayon lumineux peut être parcouru dans les deux sens.

Ces principes n'ont été formalisés que tardivement comparé à la loi de la réflexion mais ils avaient déjà été postulés dans l'Antiquité par Héron d'Alexandrie. La loi de la réfraction est arrivée plus tard. Réflexion et réfraction sont gouvernées par les lois de Snell-Descartes. Le phénomène de réfraction limite et de réflexion totale ne seront trouvés que plus tard.

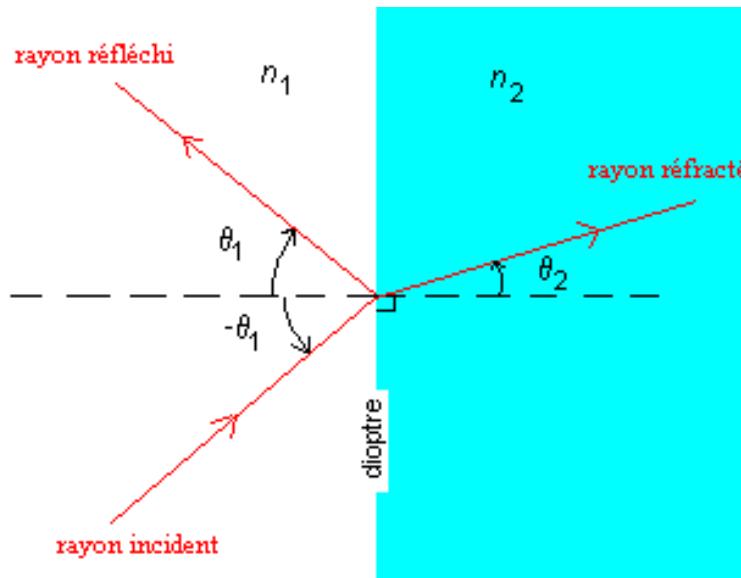


Figure A1.01 : Réfraction sur un dioptr plan

La figure précédente nous montre la réfraction en optique géométrique sur un dioptr plan, dans le cas où $n_2 < n_1$.

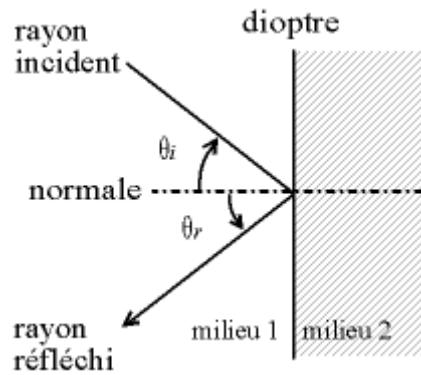


Figure A1.02 : Illustration de la loi de la réflexion

A1.5 Réfraction

Il y a réfraction quand il y a changement de direction de propagation de la lumière lorsque celle-ci traverse un dioptre et change donc de milieu transparent.

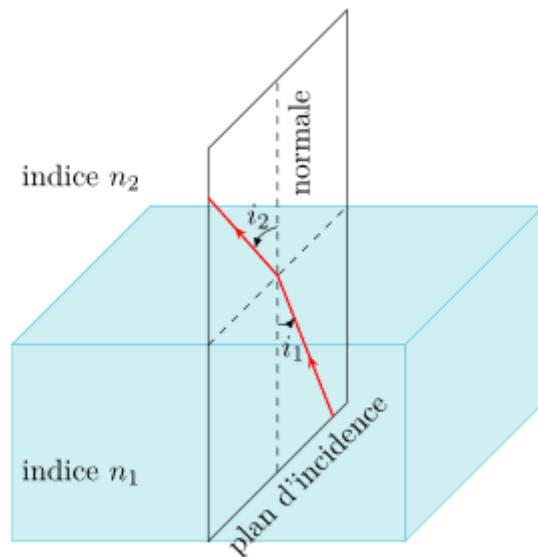


Figure A1.03 : Réfraction d'un rayon

Passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent : le rayon s'éloigne de la normale

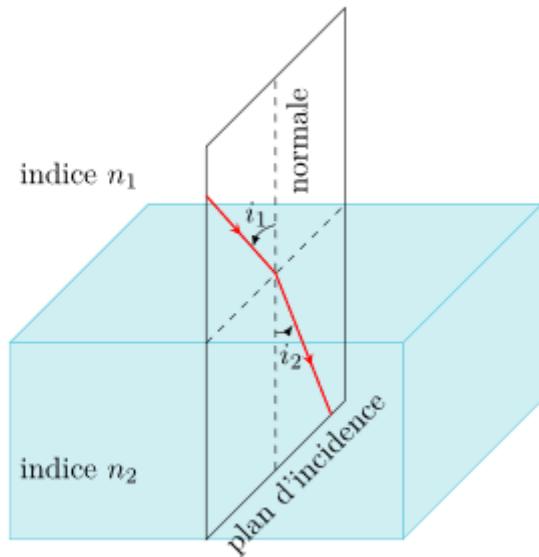


Figure A1.04 : Le principe de retour inverse de la lumière

Le passage d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent : le rayon se rapproche de la normale
 Passage d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent : le rayon se rapproche de la normale.

A1.6 La dispersion

Un rayon lumineux va donc changer de direction en changeant de milieu, du fait de la différence d'indice de réfraction. Comme nous l'avons dit précédemment, l'indice de réfraction varie en fonction de la couleur (de la fréquence) de la lumière, on en déduit que l'angle de réfraction ne sera pas le même pour chaque couleur composant une lumière. Les couleurs seront donc dispersées.

Le phénomène a lieu avec une seule réfraction mais ne se voit pas très bien. Par contre un dispositif adapté comme un prisme, permet d'obtenir le spectre de la lumière blanche.

ANNEXE 2 : CIRCUIT ELECTRONIQUE TX ET RX LIFI

LIFI TX AND RX

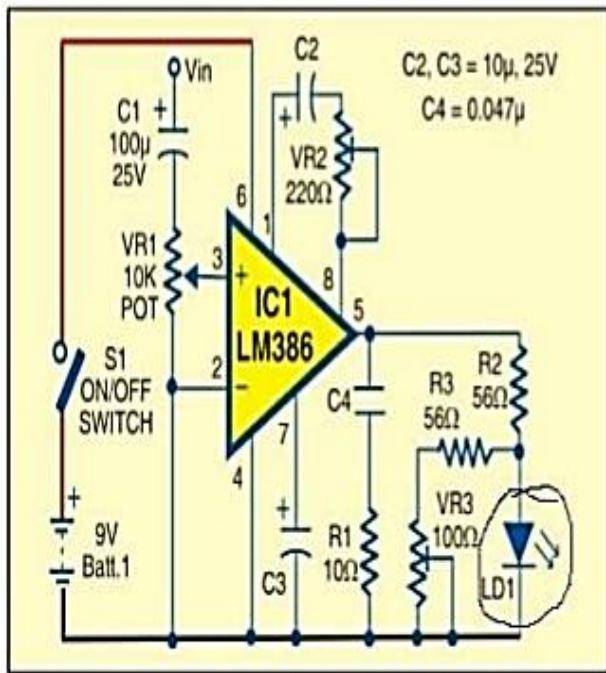


Fig. 1: Transmitter circuit

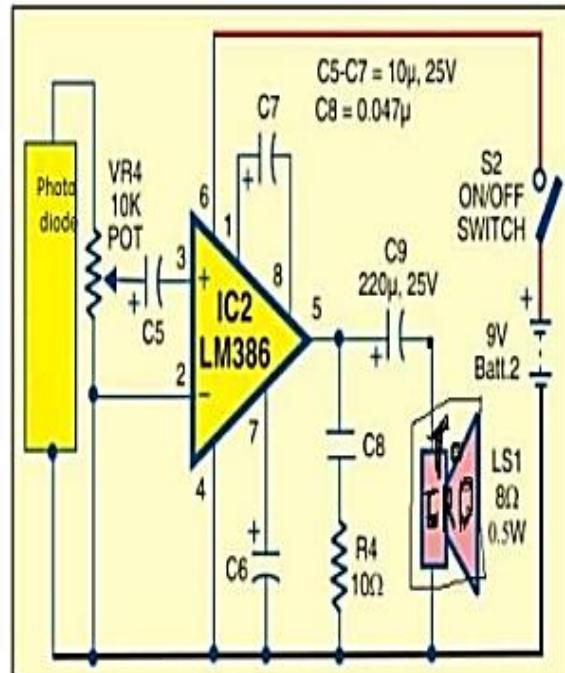


Fig. 2: Receiver circuit

11

Figure A2.01 : Modélisation d'un TX et RX Li-Fi

ANNEXE 3 : MODELISATION DE LA MODULATION OOK

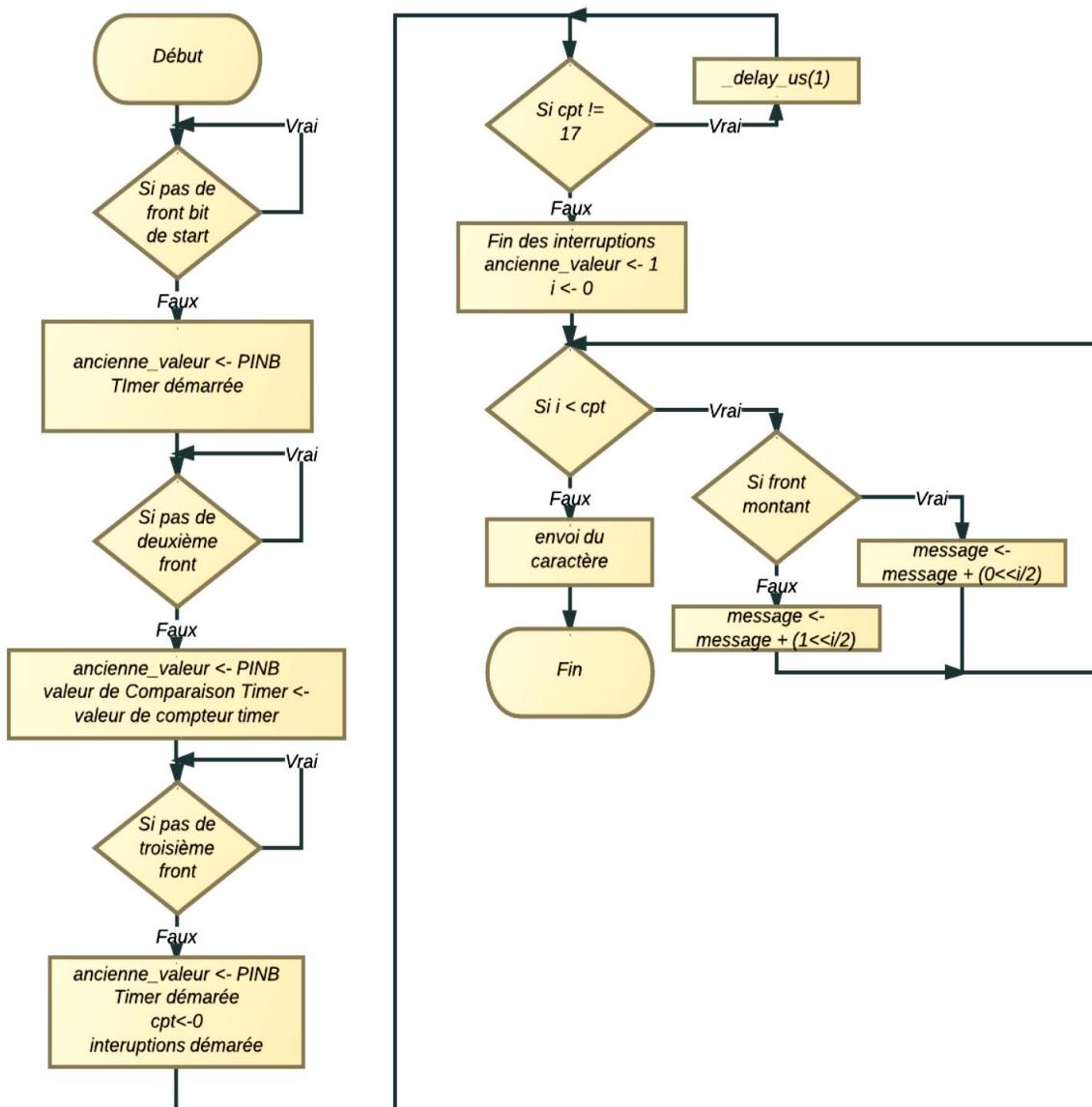


Figure A3.01 : Algorithme d'une modulation OOK

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

- [1] CICHON, Cichon D.J., Wiesbeck W., " *Indoor and outdoor propagation modelling in pico cells* ", PIMRC'94, Personal Indoor Mobile Radio Communications, Sept. 1994.
- [2] CLARKE, Clarke R.H., " *A statistical theory of mobile-radio reception* ", B.S.T.J. p.957-1000, août 1968.
- [3] CNET/CSELT Cooperation, CNET/CSELT Cooperation, Data transmission on DECT standard, " *Definition of common propagation models, regeneration scheme and performance evaluation criteria for the alignment of the two radio link simulators* ", march 1998.
- [4] COST231, COST 231, " *Evolution of land mobile radio* " (including personal), 1999.
- [5] CROCHIERE, Crochière R.E, Rabiner L.R., " *Interpolation and decimation of digital signals – a tutorial review* ", Proceedings of the IEEE, Vol. 69, n° 3, pp. 300-331, march 1981.
- [6] FAILLY,1989 Failly M., " Final Report of COST 207, Digital Land Mobile Radio Communications ", CEE Luxembourg, 1989.
- [7] FOULONNEAU, Foulonneau B., Gaudaire F., Gabillet Y. : " *Measurement method of electromagnetic transmission loss of building components using two reverberation chambers* ", Elect. Letters, 7, Vol .32, N°23, p.2130-2131, 1996.
- [8] GAHLEITNER, Gahleitner R., Bonek E., " *Radio waves penetration into urban buildings in small cell and microcells* ", Technische universität Wien, Vienna, Austria, Preceedings Vehicular Technology Conference, Stockholm, , juin 1994.
- [9] GFELLER, GFELLER F.R., BAPST U.R.S.; " *Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation* " Proceeding of the IEEE, Vol, 67, n° 11 1979.
- [10] HASHEMI, Hashemi H., Sajjadi B.A., Tabatabaei V., " *Practical design considerations for digital mobile radio systems operating in the mountainous terrain* " ,1993.
- [11] [KOUYOUUMJIAN, 1974] Kouyoumjan R.G., Pathak P.H., " *A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface* ", Proc IEEE vol. 62, n°11, p. 1448-1461, Nov. 1974.

[12] [KURNER, 1993] Kurner T., Cichon D.J., Wiesbeck W., "Concepts and Results for 3D Digital Terrain Based Wave Propagation Models: an overview ", IEEE Trans. Selected Areas in Com., Vol. SAC 11, N° 7, Sept. 93, p. 1002-1012.

[13] [LAGRANGE, 2000] LAGRANGE X.; "Les réseaux mobiles"; Chapitre 2 : Propagation radioélectrique (SIZUN H., BIC J.C.), Réseaux et Télécoms, Information-Commande-Communication, HERMES, 2000.

[14] <https://www.edf.fr/edf/accueil-magazine/le-lifi-accedez-a-internet-par-la-lumiere>
Consulté le 05/07/2016

[15] <http://www.futura-sciences.com/tech/actualites/internet-li-fi-internet-haut-debit-lumiere-arrive-marche-maj-59745/> Consulté le 06/07/2016

[16] <http://www.physique-chimie-college.fr/courlumiere/la-propagation-rectiligne-de-la-lumiere/> le 09/07/2016

[17] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Li-Fi> Consulté le 09/09/2016

[18] <http://www.lifi-led.com/> Consulté le 09/07/2016

[19] http://www.media4.obspm.fr/public/AMC/pages_base-optique-geo/bog-propagation.html
Consulté le 10/07/2016

[20] http://www.pignolos.pagesperso-orange.fr/college/5e_ch14.html Consulté le 01/08/2016

[21] <http://www.physique-chimie.discip.ac-caen.fr/spip.php?article68> Consulté le 01/08/2016

[22] <http://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/lesdefis-lifi.pdf> Consulté le 17/08/2016

[23] <http://www.lifi.insa-rennes.fr/wp-content/uploads/2015/Monographie-Li-Fi-Version-Finale1.pdf> Consulté le 19/08/2016

[24] http://www.impro-lifi.com/formation_new/formation.html, Consulté le 10/09/2016

[25] <http://pccollege.fr/le-wifi-est-mort-vive-le-lifi/>, Consulté le 10/09/2016

[26] <http://www.htmicro.org/bldsomething/>, Consulté le 12/09/2016

[27] <https://prezi.com/6fcyc4nenhyo/li-fi-light-fidelity/>, Consulté le 15/09/2016

[28] <https://www.quora.com/I-want-to-demonstrate-the-power-of-“Li-Fi>, Consulté le 15/10/2016

[29] <https://www.fr.slideshare.net/siroddeo/lifi-technology-light-feadility> Consulté le 20/10/2016

[30] <https://www.pic-microcontroller.com/lifi-ready-go-led/> Consulté le 01/09/2016

[31] <https://www.electronicshub.org/led-projects-circuits-engineering-students/> Consulté le 20/10/2016

[32] <https://www.ijireeice.com/upload/2016/april-16/IJIREEICE%2052.pdf> Consulté le 20/10/2016

PAGE DE RENSEIGNEMENTS