

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de Fin d'Etude**  
*pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique*

Domaine : **Sciences et Techniques**  
Filière : **Télécommunications**  
Spécialité : **Réseaux et Télécommunications**

---

---

**Etude d'un Système de Communication VLC DCO-OFDM**

---

---

Présenté par :  
**BOUSLIBA CHAYMA et BOUZAOUI GHADA**

Sous la direction de :  
**Pr. ABED DJAMEL**

Juillet 2021

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de Fin d'Etude**  
*pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique*

Domaine : **Sciences et Techniques**  
Filière : **Télécommunications**  
Spécialité : **Réseaux et Télécommunications**

---

---

**Etude d'un Système de Communication VLC DCO-OFDM**

---

---

Présenté par :  
**BOUSLIBA CHAYMA et BOUZAOUI GHADA**

Sous la direction de :  
**Pr. ABED DJAMEL**

Juillet 2021

# Remerciement

*Mes remerciements reviennent en premier lieu à Allah, le Tout Puissant, le Clairvoyant, pour tous ses indénombrables bienfaits ; pour m'avoir accordé la force, le courage et la volonté à finir ce travail.*

*« Si vous êtes reconnaissants, très certainement, J'augmenterai [Mes bienfaits] pour vous. » {Sourate Ibrahim : verset 7}*

*Je tiens à remercier chacun des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner et d'évaluer mon travail.*

*Je souhaite également exprimer ma sincère reconnaissance à mon tuteur de thèse, Pr ABED DJAMEL, qui s'est montré à l'écoute et disponible pour m'orienter et me conseiller tout au long de mon projet.*

*Comment pouvoir être là à remercier toutes ces personnes si l'on ne pas enseigné et formé au cours de mon cursus universitaire. Merci à tous ces enseignants qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et m'ont permis d'être là aujourd'hui.*

*Ces remerciements seront inachevés si je ne parle pas de toutes ces personnes qui ont été présentes par des conseils, par des encouragements ou encore par des invocations pour me voir réussir un jour. A toute ma famille, à tous mes amis, merci.*

*« Celui qui ne remercie pas les gens n'a pas remercié Allah ». {Hadith rapporté par Abou Daoud dans ses Sunan n°4811}*

## *Dédicaces*

*A tous ceux qui ont un jour cru en moi.*

*A tous ceux qui m'ont encouragé.*

*Ceci n'aurait pas été possible sans vous.*

*Boussiba chayma*

# Table des Matières

Introduction .....	01
<b>Chapitre I : État de l'Art sur les Communications l'Optique Sans Fil</b>	<b>03</b>
I.1. Introduction .....	03
I.2. Contexte Général des Systèmes de Communication Optique sans Fil .....	04
I.3. Motivations Pour les Communications OWC .....	06
I.4. Applications des Systèmes OWC .....	08
I.5. Technologies envisagées pour les les Systèmes OWC .....	12
I.6. Conclusion .....	20
<b>Chapitre II : État de l'Art sur les Systèmes VLC Multiporteuse</b>	<b>22</b>
II.1. Introduction.....	22
II.2. Principe de la Modulation Multiporteuse.....	23
II.2.1 La modulation OOK.....	23
II.2.2 La modulation VPPM.....	24
II.2.3 La modulation CSK .....	25
II.3 Principe de la Modulation Multiporteuse .....	26
II.3.1. Les Systèmes VLC Multiporteuse .....	27
II.3.1.1. Le Système VLC DCO-OFDM.....	28
II.3.1.2. Le Système ACO-OFDM.....	29
II.3.1.3. Le Système ADO-OFDM.....	30
II.3.1.4. Le Système Flip-OFDM.....	31
II.3.2. Comparaison entre les Systèmes VLC multiporteuse.....	32
II.4. Modélisation du Système DCO-OFDM .....	32
II.4.1 Modélisation du Récepteur VLC-DCO-OFDM .....	37
II.5. Modélisation du canal VLC .....	38
II.6. Conclusion .....	41
<b>Chapitre III : Simulation d'un Système DCO-OFDM</b>	<b>42</b>
III.1. Introduction.....	42
III.2. Environnement Utilisé .....	42
III.3. Evaluation de la Constellation M-QAM .....	43
III.4. Evaluation de la Valeur de DC-Bias .....	45
III.5. Conclusion .....	46
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>47</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>49</b>
<b>Références Bibliographique .....</b>	<b>53</b>

## Liste des Figures

<b>Figure I.1</b>	Le spectre électromagnétique (EM).	05
<b>Figure I.2</b>	Applications potentielles de l'OWC.	09
<b>Figure I.3</b>	Catégorisation des applications OWC en fonction de la portée De transmission.	09
<b>Figure I.4</b>	Les Applications OWC basée sur la Distance de Communication. OFS : optique en espace libre, ECG : électrocardiographie et EMG : électromyographie	10
<b>Figure I.5</b>	Architecture de base de l'équipement utilisateur (UE) vers Le réseau central (CN) pour OWC.	12
<b>Figure I.6</b>	Illustration des applications utilisant les VLC en milieu Intérieur.	13
<b>Figure I.7</b>	Schéma fonctionnel d'un système VLC	
<b>Figure I.8</b>	Illustration des applications VLC en extérieur.	17
<b>Figure I.9</b>	Représentation standard d'un composant LED.	19
<b>Figure I.10</b>	Exemple d'évolution de la puissance émise d'une LED en Fonction du Courant de polarisation appliqué.	19
<b>Figure II.1</b>	Schéma de modulation OOK	24
<b>Figure II.2</b>	Modulation VPPM.	24
<b>Figure II.3</b>	Modulation CSK	25
<b>Figure II.4</b>	Schéma de Principe d'un Système DCO-OFDM.	28
<b>Figure II.5</b>	Schéma Blocs d'un Système ACO-OFDM : (a) Emetteur, (b) Récepteur.	29
<b>Figure II.6</b>	Schéma de Principe d'un émetteur ADO-OFDM.	30
<b>Figure II.7</b>	Schéma de Principe d'un Système Flip-OFDM.	31
<b>Figure II.8</b>	Schema Fonctionnel de l'Eémetteur DCO-OFDM.	32
<b>Figure II.9</b>	Illustration de la Symétrie Hermitienne dans un Système DCO-OFDM pour une Modulation 4-QAM. (a) $\text{Re} [X(k)]$ (b) $\text{IM} [X(k)]$	34
<b>Figure II.10</b>	Un exemple de conversion de signal DCO-OFDM de FD en TD avec HS.	35
<b>Figure II.11</b>	Représentation Temporelle du signal DCO-OFDM (a) avant Polarisation, $\tilde{x}(t)$ (b) biaisé signal, $\hat{x}(t)$ (c) signal polarisé Après écrêtage, $x(t)$ .	36
<b>Figure II.12</b>	Schéma fonctionnel du récepteur DCO-OFDM.	37
<b>Figure II.13</b>	Modèle de distribution géométrique intérieure du système.	38
<b>Figure III.1</b>	Effet de Nombre d'Etat de Constellation M-QAM pour un Système DCO-OFDM dans un Canal AWGN avec un DC-Bias = 7dB.	43
<b>Figure III.2</b>	Effet de Nombre d'Etat de Constellation M-QAM pour un Système DCO-OFDM dans un Canal VLC-LOS avec un DC-Bias = 7dB	44
<b>Figure III.3</b>	Effet de la Valeur de DC-Bias pour un Système DCO-OFDM	45

dans un Canal VLC-LOS (a)4QAM, (b)16QAM, (c)64QAM et  
(d)128QAM

## *Liste des Tableaux*

<b>Tableau I. 1</b>	Comparatif LED et LD .	18
<b>Tableau II.1</b>	Comparaison des techniques OFDM évaluées .	32

## *Liste des Acronymes*

ACO-OFDM:	Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ADO-OFDM:	Asymmetrically Clipped Direct Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
AWGN:	Additive White Gaussian Noise.
BER:	Bit Error Rate
CP :	Cyclic Prefix
DC:	Direct Current
DCO-OFDM:	Direct Current biased Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DFT :	Discrete Fourier Transform
FFT:	Fast Fourier Transform
Flip-OFDM	Flip Orthogonal Frequency Division Multiplexing
FOV:	Field of View
FSO:	Free Space Optics
ICI:	Inter-Carrier Interference
IDFT :	Inverse Discrete Fourier Transform
IEEE :	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEP:	Interférence Entre Porteuses
IFFT :	Inverse Fast Fourier Transform
IM :	Intensity Modulation
IM/DD:	Intensity-Modulation/Direct-Detection
IR:	Infrared
ISI:	Inter-Symbol Interference
I2V:	Infrastructure to Vehicle
LD :	diodes laser
LED :	Light Emitting Diode
Li-Fi :	Light Fidelity
LOS :	Line of Sight
OFDM :	Orthogonal Frequency Division Multiple
MIMO :	Multi Input Multi Output
NLOS:	No Line of Sight
OOK:	On Off Keying
OWC:	Optical Wireless Communications
PAM:	Pulse Amplitude Modulation
PAM-DMT:	Pulse Amplitude Modulated -Discrete Multi-Tone Modulation
PAPR :	Peak-to-Average Power Ratio
PD:	Photodiode.
QAM:	Quadrature Amplitude Modulation
RF:	Radio Frequency
RLL:	Run Length Limited
SCM:	Single Carrier Modulation
SNR :	Signal Noise Ratio
TEB:	Taux d'Erreurs Binaire
V2V:	Vehicle-to-Vehicle
VL:	lumière visible
VLC:	Visible Light Communication
VPPM:	Variable Pulse Position Modulation

# Introduction

Depuis les temps les plus anciens jusqu'au XIXe siècle, tous les systèmes de communication optique sans fil ont été tributaires de l'œil, qui tenait lieu de récepteur. L'invention du photophone par Alexander Graham Bell et Charles Sumner Tainter a radicalement changé la nature de ces communications. En effet, ces deux inventeurs se sont appuyés sur le fait que la résistance du sélénium varie en fonction de l'intensité de la lumière et ont utilisé cette propriété en le reliant à un récepteur téléphonique pour envoyer des signaux audios. De nombreuses améliorations ont été apportées à ces systèmes jusqu'aux années 50, mais la plupart des matériaux employés pour la détection présentent une plus grande sensibilité au rayonnement infrarouge, ce qui empêche d'utiliser la lumière visible comme support de transmission. L'arrivée sur le marché des diodes électroluminescentes (LED) a suscité un regain d'intérêt pour l'utilisation des communications VLC. L'avènement des diodes LED à l'arséniure de gallium (GaN) et des luminophores émettant du blanc, en particulier, a permis de disposer des sources de lumière visible pouvant être modulées à des débits plus élevés, sans que leur fonction principale d'éclairage en pâtisse. En 2004, les premières démonstrations de communication à haut débit à l'aide de diodes LED ont été effectuées au Japon au moyen de photodiodes.

En général, les systèmes VLC sont déployés au moyen du système d'éclairage LED (existant), alors que les diodes LED par lumière visible sont modulées en intensité afin de transmettre les informations de données par voie hertzienne aux dispositifs. Ces systèmes d'éclairage sont généralement conçus pour desservir une zone étendue et assurent en conséquence des connexions de données avec plusieurs dispositifs

à l'intérieur de cette zone. L'objectif de ce travail est de donner un aperçu sur les différents système VLC à haut débit (multiporteuse) et bien précisément le système DCO-OFDM. Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons décrire comment le monde est arrivé aux communications optiques sans fil (OWC); le problème de la saturation du spectre, les motivation ; les applications et technologies envisagées pour les systèmes OWC etc.

Le deuxième chapitre introduit les différents types de systèmes de communication VLC multiporteuse. La modélisation de système DCO-OFDM sera présenté en détail dans un canal VLC-LOS.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation d'un système DCO-OFDM proposé pour les communications VLC. En premier lieu, la chaine de transmission sera implémentée en MATLAB. Par la suite les performances du système sont évaluées en fonction de l'ordre de constellation utilisée, le niveau de DC-Bias et le type du canal de transmission.

Par suite le manuscrit sera terminé par une conclusion générale avec des perspectives.

---

# *Chapitre I*

*État de l'Art sur les Communications  
l'Optique Sans Fil*

# Chapitre I

## *État de l'Art sur les Communications l'Optique Sans Fil*

### I.1 Introduction

Aujourd'hui, la majorité des appareils électroniques et la quasi-totalité des appareils « mobiles » (tels que les téléphones portables, microordinateurs...) disposent de moyens de connexion à un ou plusieurs types de système de communication sans fil comme le Wifi, le Bluetooth ou l'infrarouge. Le terme de communication sans fil a été introduit au 19<sup>ème</sup> siècle et la technologie de communication sans fil s'est développée au cours des années suivantes.

C'est l'un des moyens les plus importants de transmission d'informations d'un appareil à d'autres appareils. Dans cette technologie, les informations peuvent être transmises par voie aérienne sans nécessiter de câble ou de fils ou d'autres conducteurs électroniques, en utilisant des ondes électromagnétiques comme IR, RF, satellite, etc. De nos jours, la technologie de communication sans fil fait référence à une variété de dispositifs et technologies allant de téléphones intelligents aux ordinateurs, onglets, ordinateurs portables, technologie Bluetooth, imprimantes. Ce chapitre donne un aperçu sur les systèmes de communications sans fils dans le domaine VLC et le développement de la technologie Li-Fi [I.1].

## **I.2 Aperçu sur les Systèmes de Communication Optique sans Fil :**

Le terme « sans fil » désigne généralement les technologies de radiofréquence (RF), car la plupart des technologies utilisées sont basées sur des dispositifs et des systèmes RF. Le spectre RF de 3 kHz à 300 GHz est une ressource naturelle qui est exclusivement surveillée et contrôlée par l'État qui s'approprie les privilèges et optimise l'utilisation du spectre. Plusieurs applications, par exemple, la radiodiffusion analogique et numérique, la radiodiffusion télévisuelle (TV), les radars, les communications par satellite, les communications mobiles, les réseaux locaux sans fil (WLAN), différentes applications gouvernementales, industrielles et publiques, etc., nécessitent un spectre RF. Au cours des deux dernières décennies, avec la demande croissante d'applications sans fil gourmandes en données, une énorme quantité de spectre RF est consommée. La majeure partie du spectre RF a été attribuée et la tendance actuelle entraînerait une congestion spectrale. Cette menace peut faire des ravages et laisser un écart considérable entre les potentiels livrables des systèmes existants et les exigences d'un trafic réseau en augmentation exponentielle. Entre 2011 - En 2016, le trafic sur le réseau mondial a été multiplié par environ 18, ce qui confirme que la rareté du spectre est en train de devenir une réalité. Par conséquent, la gestion spectrale pour éviter l'épuisement spectral est impérative. Diverses solutions ont été suggérées pour résoudre ce problème, certaines solutions de premier plan sont :

- La première solution est d'être spectralement plus efficace avec les systèmes en vigueur. Cela a été accompli au cours de la dernière décennie en introduisant des techniques, telles que les entrées multiples et les sorties multiples (MIMO), qui augmentent la capacité du système. Ces approches tentent d'améliorer l'efficacité spectrale bits/s/Hz, cependant, cette solution est proche de la saturation.
- Une autre méthode consiste à être plus vigoureux temporellement et spatialement en réutilisant le spectre. Cette approche est exploitée par l'utilisation de la

radio cognitive, où le spectre est alloué dynamiquement pour éviter les interférences entre différents utilisateurs et pour éviter la congestion.

En outre, il existe un concept de déchargement dans lequel une densité élevée de petites cellules est utilisée en réduisant la zone de couverture cellulaire. Le concept de femtocells et d'attocells est étudié à cet égard, cependant, un inconvénient de cette approche est une interférence accrue entre les nœuds d'accès. Le but de ces méthodes est d'améliorer les bits/s/Hz/m<sup>2</sup>.

- La troisième approche consiste à utiliser les parties du spectre qui ne sont généralement pas utilisées à des fins de communication. Dans ce contexte, le concept de communication par ondes millimétriques (mmWave) a suscité un intérêt considérable. Dans les communications mmWave, les parties non conventionnelles du spectre de 28 GHz à 250 GHz sont utilisées à des fins de communication [I.2]. Cependant, la conception des émetteurs et récepteurs THz est le problème majeur.
- Au-delà du spectre RF de 3 kHz à 300 GHz, il existe un spectre optique qui comprend le spectre infrarouge (IR), de lumière visible (VL) et ultraviolet (UV), qui varie entre 300 GHz et 30 pétahertz (PHz) comme le montre la Figure I.1. Ce spectre optique peut être exploité pour la communication principalement en raison de l'énorme bande passante non réglementée et sans licence. La communication optique sans fil (OWC) utilise le spectre optique qui est des milliers de fois et plus large que le spectre RF. Néanmoins, les systèmes OWC viennent avec ses propres défis, tels que la sensibilité réduite en raison d'obstacles et une puissance optique transmise limitée, etc.

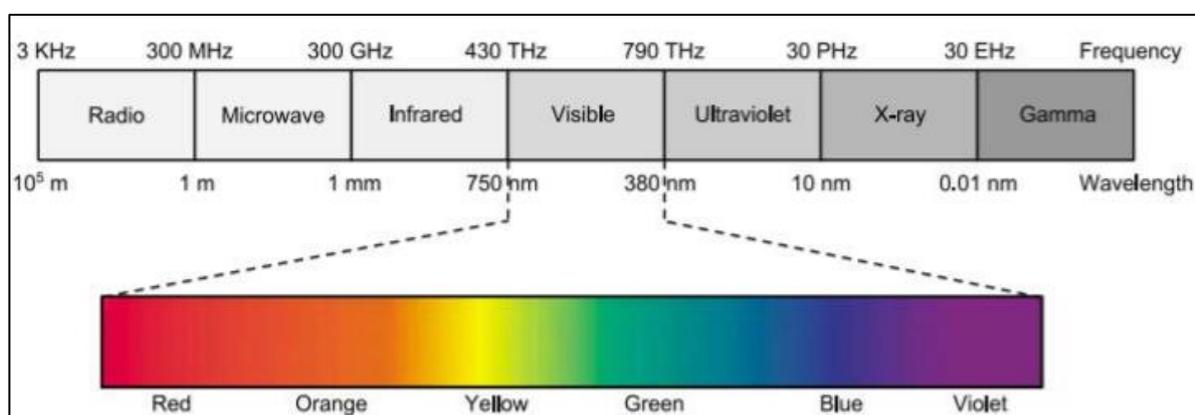


Figure I.1 : Le Spectre Électromagnétique (EM)

En OWC, le message peut être transmis par des méthodes de modulation d'intensité et de détection directe (IM-DD), dans lesquelles les données sont modulées sur l'enveloppe du rayonnement électromagnétique qui est photo détectée au niveau du récepteur [I.2] [I.3]. IM-DD repose sur l'utilisation d'émetteurs-récepteurs électriques-optiques, tels que des diodes électroluminescentes (LED) et des diodes laser (LD) au niveau de l'émetteur, et des émetteurs-récepteurs optiques-électriques tels que des photodiodes (PD) au niveau du récepteur. Outre la disponibilité d'un spectre énorme non réglementé disponible pour l'OWC, plusieurs autres facteurs de motivation sur les raisons pour lesquelles l'OWC doit être utilisé sont fournis dans la section suivante.

### I.3 Motivations Pour les Communications OWC

Les technologies OWC sont considérées comme une solution potentielle au problème du dernier kilomètre et peuvent combler le fossé entre les utilisateurs finaux et l'infrastructure de la dorsale de fibre optique [I.4]. L'intérêt pour l'utilisation d'OWC est motivé par les facteurs suivants :

- **Efficacité énergétique :**

Les systèmes OWC ne nécessitent pas de ressources énergétiques exclusives car l'énergie utilisée pour l'éclairage (pour les communications en lumière visible (VLC)) peut également être utilisée pour la communication.

- **Sécurité des données :**

le signal d'intensité lumineuse utilisé pour OWC ne peut pas pénétrer à travers les murs ou tout autre obstacle, ce qui en fait une option plus sûre pour la communication, car l'espionnage peut être évité.

- **Sécurité :**

L'utilisation de luminaires pour OWC ne présente aucun risque apparent pour la santé et est conforme aux règles de sécurité oculaire et cutanée, ce qui la rend sûre dans des scénarios de communication pratiques [I.5]

- **Interférences :**

L'utilisation d'un signal d'intensité lumineuse pour OWC est intrinsèquement sûre et n'offre aucune interférence avec les signaux RF ou les équipements sensibles aux RF [I.6].

- **Réutilisation spatiale et direction du faisceau :**

Dans les systèmes OWC intérieurs, le signal d'intensité lumineuse est confiné en raison des réflexions des murs, du toit et du plafond. Par conséquent, ce faisceau lumineux hautement confiné et dirigé permet de créer plusieurs faisceaux non interférents à proximité immédiate. Cela permet une plus grande densité de données et la réutilisation de la bande passante de modulation dans les cellules adjacentes [I.7] [I.8] [I.9]. De plus, contrairement aux technologies sans fil RF qui nécessitent des équipements complexes et coûteux pour la direction du faisceau, la lumière peut être facilement dirigée à l'aide d'équipements optiques à faible coût [I.10].

- **Intégration facile à l'infrastructure existante et réutilisation du matériel :**

L'intégration des systèmes OWC à l'infrastructure existante est très simple car elle ne nécessite que l'ajout de composants frontaux à faible coût, tels que des LED et des pilotes associés, tels que des PD et des étages d'amplification associés [I.5] [I.11]. Pour les systèmes OWC intérieurs, l'infrastructure d'éclairage existante destinée à l'éclairage peut être exploitée pour intégrer les communications [I.12].

- **Faible coût récurrent :**

Les composants utilisés pour OWC entraînent des coûts récurrents très faibles car :

- (i) Ils sont généralement éco-énergétiques, ce qui entraîne un faible coût de facturation ;
- (ii) Contrairement aux RF, aucun équipement spécifique n'est nécessaire pour la transmission sans fil, ce qui réduit le coût du carburant pour maintenir les stations de base RF en état de fonctionnement. À titre d'exemple, les liaisons

RF avec une distance et un débit de transmission de 10 m et 1 Mbps dans la bande 2,4 GHz entraînent un coût de près de 5 dollars américains, tandis que l'OWC est capable d'atteindre 4 Mbps sur de courtes distances et coûte environ 1 dollar américain [I.5].

## I.4 Applications des Systèmes OWC

Les systèmes OWC a un large éventail d'applications potentielles [I.13][I.5][I.4]. Figure I.2 fournit une illustration graphique des plates-formes d'applications OWC potentielles. Certaines plates-formes d'applications potentielles comprennent les aéroports, les usines pétrochimiques, les maisons et les villes intelligentes, les gares, les soins de santé, les centres de données, les transports, la communication sous-marine, etc.

OWC peut être plus prospère dans une telle plate-forme, où les signaux RF peuvent interférer avec d'autres équipements sensibles, tels que les hôpitaux /les soins de santé et les usines pétrochimiques, etc. Un autre exemple pour OWC est lié à une stratégie de communication fiable pour les sous-marins militaires, où des communications internes peuvent être établies en mode silencieux.

Une considération fondamentale qui est requise pour le déploiement des technologies OWC est la distance de communication. En fonction de la distance de communication, les applications OWC peuvent être classées en ultra-courte portée, courte portée, moyenne portée, longue portée et ultra-longue portée comme le montre la Figure I.3.

Cela implique que les applications OWC vont des communications C2C avec une distance de quelques micromètres aux liaisons inter-satellites et dans l'espace lointain avec des distances de milliers de kilomètres. Voici quelques exemples :

- **Applications OWC à très courte portée :**

Les interconnexions optiques gagnent en importance en raison de leur bande passante élevée et de leur faible latence, et devraient éliminer les interconnexions électriques à base de cuivre qui sont encombrantes et s'avèrent être un goulot d'étranglement dans la conception du système [I.14]. OWC dans les interconnexions optiques peut être utilisé

pour la communication C2C qui peut être une solution flexible et moins encombrante que les homologues de fils électriques traditionnels.

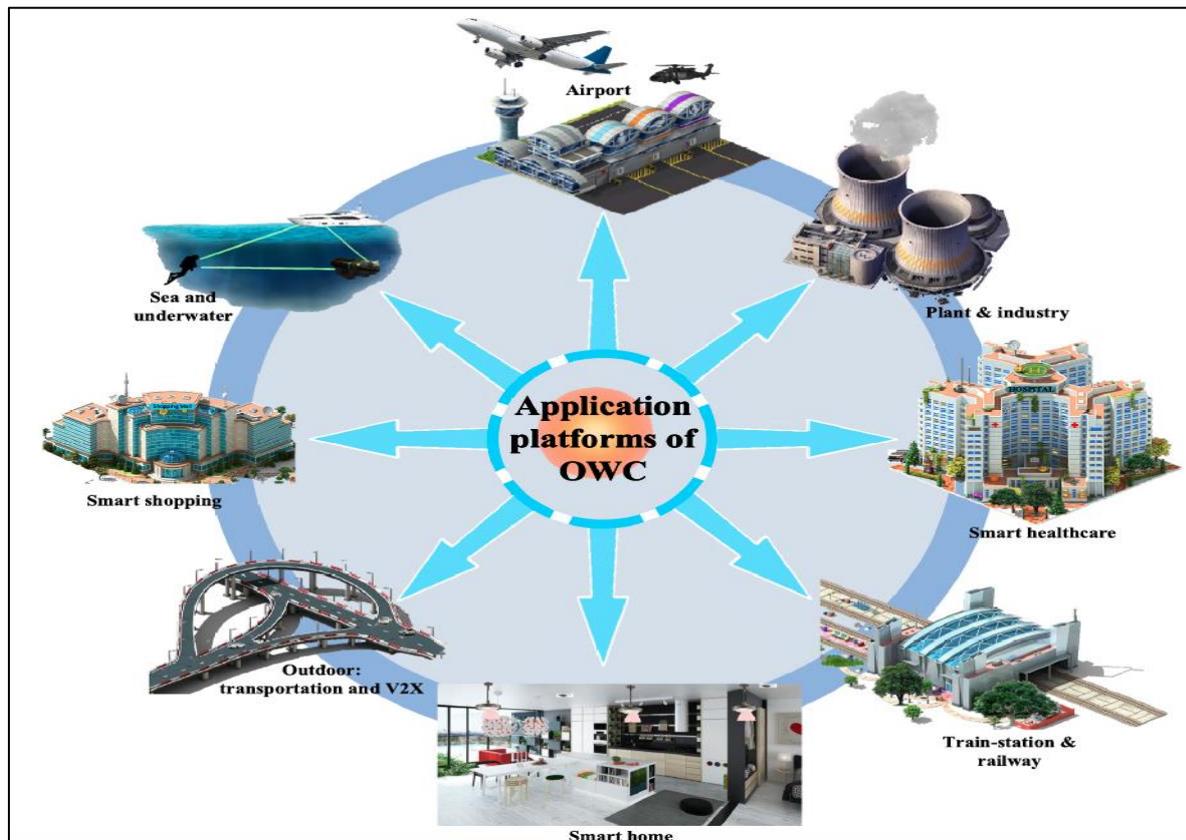


Figure I.2 : Applications potentielles de l'OWC

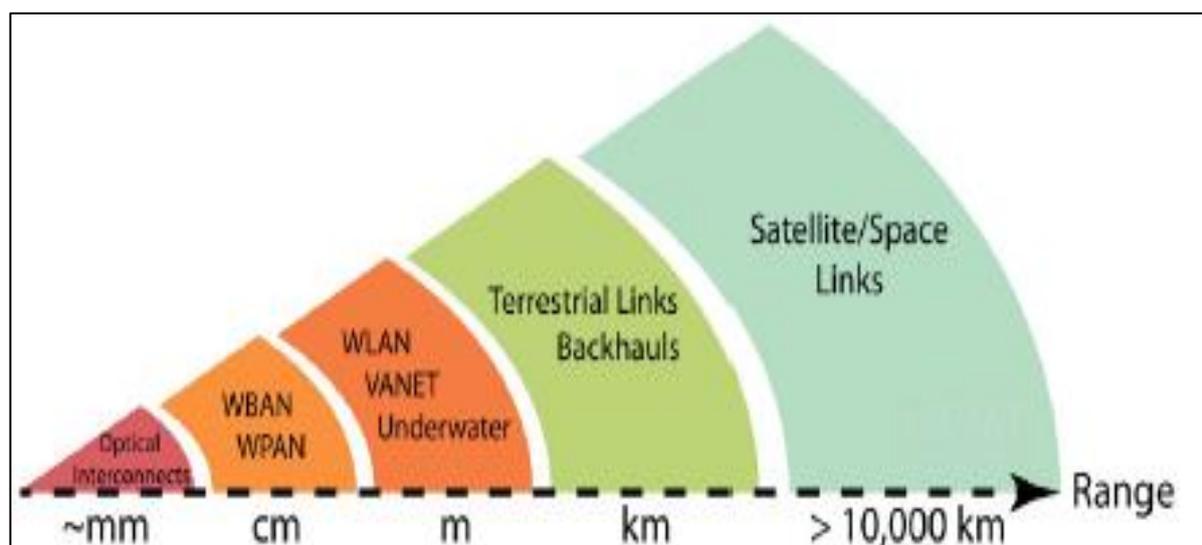
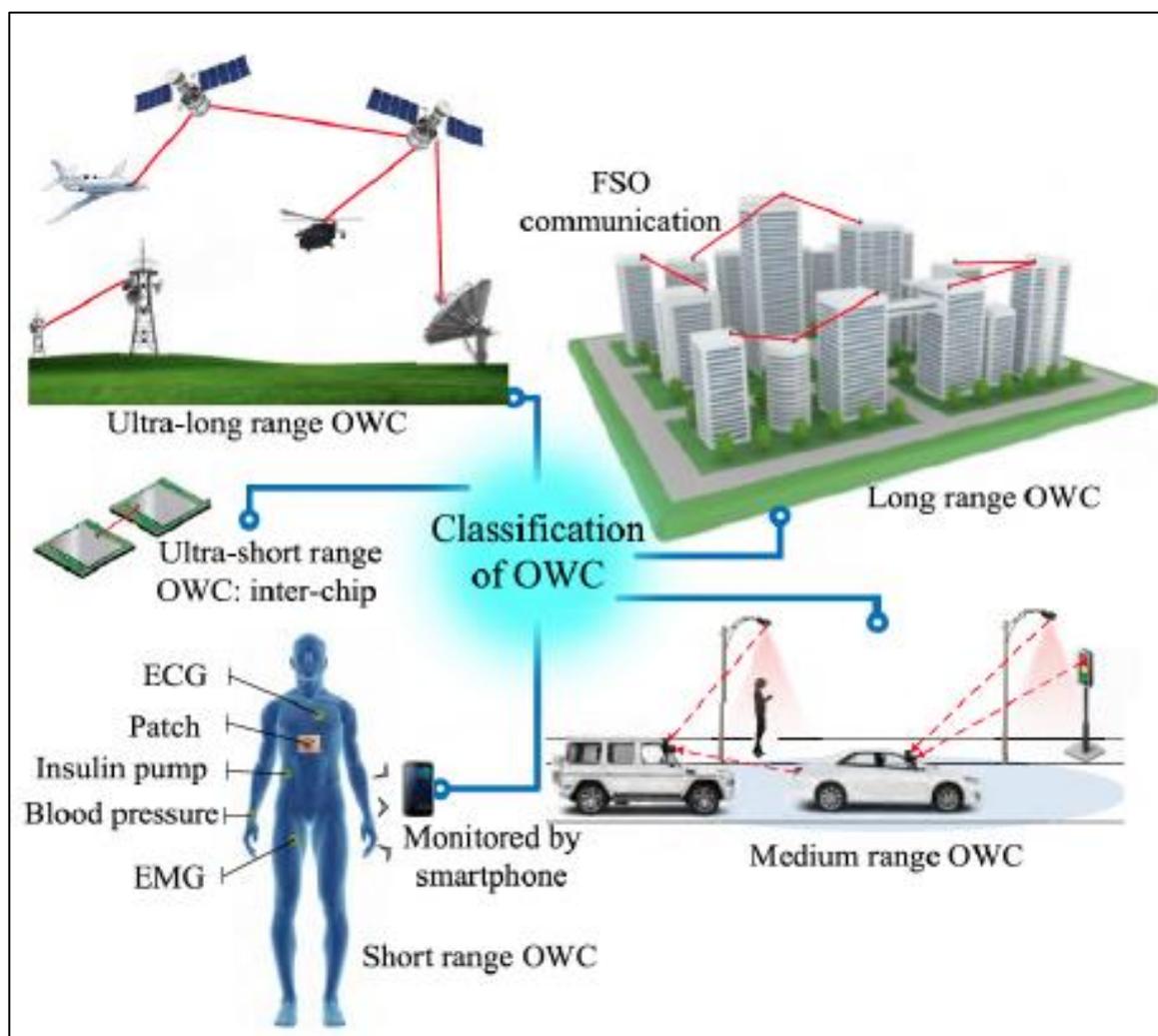


Figure I.3 : Les applications OWC en Fonction de la Portée de Transmission [I.15]

- Applications OWC à courte portée :

Pour un OWC à courte portée de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, des exemples typiques peuvent être le réseau corporel sans fil (WBAN) et le réseau personnel sans fil (WPAN) [I.16] [I.17]. Dans les WBAN, de nombreux capteurs / détecteurs peuvent être placés sur le corps pour surveiller les paramètres de santé, tels que la fréquence cardiaque, la pression artérielle, etc. Dans les WBAN basés sur OWC, des capteurs basés sur VL peuvent être incorporés dans des vêtements ou des appareils portables à partir desquels les signes vitaux peuvent être collectés sur un smartphone. Dans WPAN, tous les appareils rassemblés autour d'un individu sont liés les uns aux autres, ce qui est le concept principal de l'IoT.



**Figure I.4 :** Les Applications OWC basée sur la Distance de Communication. OWS : optique en espace libre, ECG : électrocardiographie et EMG : électromyographie.

- **Applications OWC à moyenne portée :**

Les WLAN sont une application courante de l'OWC pour les distances de transmission moyennes. Traditionnellement, les liaisons sans fil RF sont utilisées, cependant, comme mentionné ci-dessus, le spectre RF est pratiquement épuisé, par conséquent, l'OWC peut être un substitut possible. Avec le concept d'utilisation de LED pour l'éclairage et la communication, le développement de WLAN utilisant OWC peut devenir une réalité pour la connectivité sans fil inter-bâtiments. VLC peut également être utilisé pour des scénarios extérieurs, tels que les feux de circulation, les lampadaires, les affichages publicitaires, les phares/feux arrière de voiture. Cela peut conduire à des communications de véhicule à infrastructure (V2X), de véhicule à véhicule (V2V).

- **Applications OWC longue portée :**

Pour les applications à longue portée, OWC peut être utilisé pour connecter un WLAN à un autre WLAN. Les réseaux FSO (Free Space Optics) offrent une bande passante élevée, des débits de données élevés de l'ordre du Tbps et sont faciles à reconfigurer. Les liaisons OWC longue portée peuvent être utilisées comme connexions de liaison pour surmonter le goulot d'étranglement des câbles coaxiaux traditionnels. De nos jours, les liaisons optiques en espace libre sont également utilisées pour des applications aérospatiales [I.18].

- **Applications OWC à très longue portée :**

Pour des distances de plusieurs milliers de kilomètres, telles que les communications sol-satellite et inter-satellites, les liaisons optiques en espace libre peuvent être un puissant moyen de communication. Plusieurs liaisons optiques inter-satellites en espace libre ont été étudiées, par exemple [I.19][I.20] montre le potentiel de l'OWC pour les applications FSO à longue portée.

## I.5 Technologies Envisagées pour les Systèmes OWC

Il existe de nombreuses technologies envisagées pour l'OWC, telles que la communication en lumière visible (VLC), la fidélité à la lumière (LiFi), et l'optique en espace libre (FSO). Une architecture de base de l'équipement utilisateur (UE) au réseau central (CN) pour OWC à moyenne portée est présentée sur la Figure I.5. Le backhaul les connexions qui relient les points d'accès (AP) au CN peuvent être des liaisons FSO, des liaisons satellites ou des connexions à fibres optiques. Les émetteurs dans OWC peuvent être des LED ou des LD, tandis que le récepteur peut être des PD, une caméra ou un capteur d'image (IS). Ces technologies se distinguent principalement par le type de récepteur ou la région du spectre optique qu'elles utilisent.

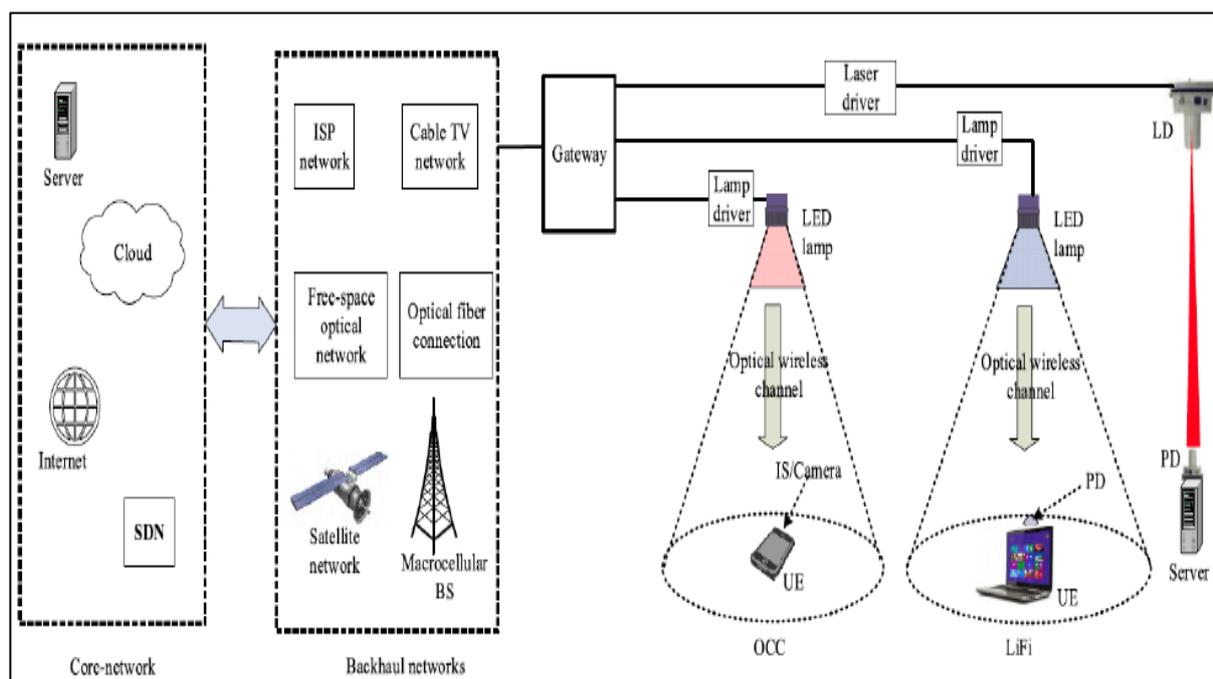


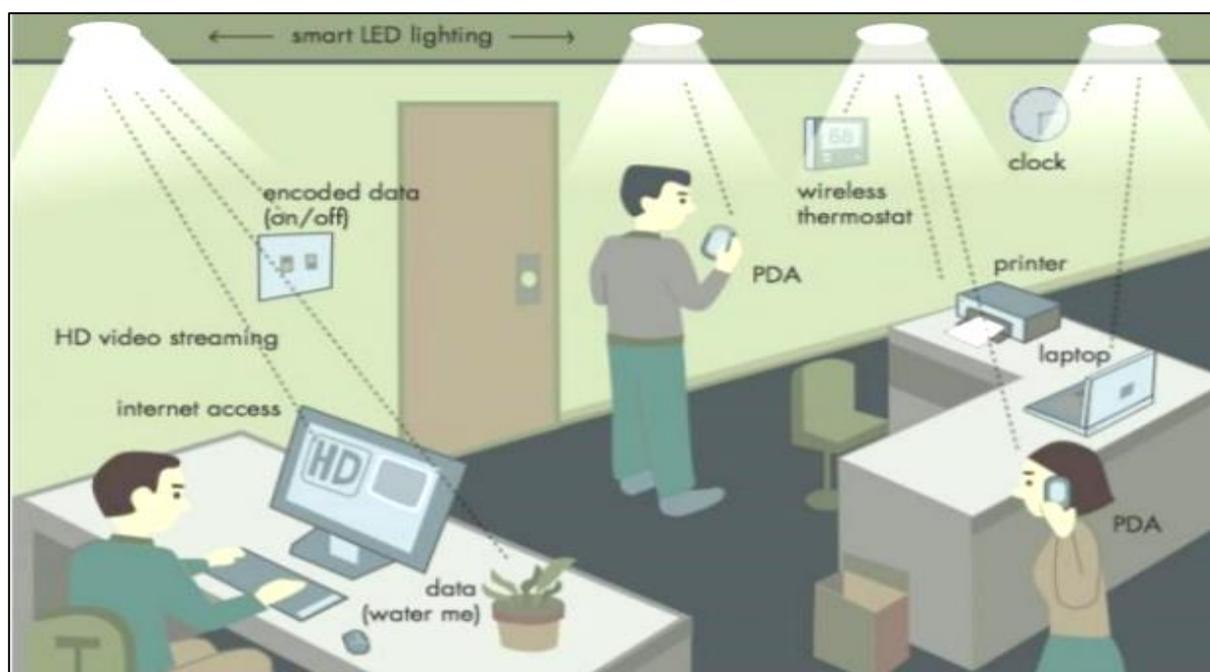
Figure I.5 : Architecture de base de l'équipement utilisateur (UE) vers le réseau central (CN) pour OWC [15].

### Communication de la Lumière Visible (VLC) :

La démocratisation des éclairages à LED depuis les années 2000 a donc permis d'envisager la combinaison des notions d'éclairage et de communication. Ces dernières années, de nombreuses recherches se sont axées autour de l'intégration

des VLC au sein de notre environnement et on peut trouver un grand nombre d'articles sur cette technologie [I.21] [I. 22].

Comme on peut l'observer sur l'illustration de la Figure I.6, un des objectifs est de s'inscrire dans le développement de l'interconnectivité des personnes avec leur environnement intérieur. Il s'agit du type d'application le plus couramment considéré car 70% des communications sont effectuées en intérieur. Mais de nombreuses utilisations en extérieur sont également possibles notamment dans le contexte des villes et des transports intelligents.



**Figure I.6 :** Illustration des Applications utilisant les VLC en milieu intérieur [I.23]

Comparées aux technologies RF, les communications par optique sans fil présentent de nombreuses caractéristiques très avantageuses [I.24] [I.25].

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

- Deuxièmement, du fait des valeurs des longueurs d'onde ( $\approx$ nm) par rapport aux dimensions des récepteurs ( $\approx$ cm) cette technologie n'est pas, contrairement aux RF, sujette aux évanouissements multi-trajets.
- Autre avantage : l'absence de génération de perturbations électromagnétiques. L'utilisation d'ondes lumineuses permet en effet de s'affranchir des problèmes de perturbation qui se posent dans le domaine RF, spécifiquement dans des environnements comme les avions, les trains ou encore les milieux hospitaliers.
- Aussi le fait que les rayons lumineux traversent mal la matière. Ils sont donc généralement confinés dans leur environnement. C'est un avantage qui permet d'améliorer la sécurité de l'information (interception des données impossible de l'extérieur), mais qui limite de manière évidente la couverture et rend aussi cette technologie très sensible aux phénomènes de blocages.
- Enfin, cette technologie permet de combiner les fonctions d'éclairage et de communication et donc s'appuie sur des émetteurs disséminés un peu partout dans l'environnement. Chaque lampe est en effet susceptible de transmettre à condition que l'ampoule soit à LED. Ainsi, les besoins en termes d'installation et de maintenance sont réduits

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

- Le fait que la lumière ne puisse pas traverser la matière opaque pose de graves problèmes de blocages. En effet, si le récepteur est bloqué par n'importe quel objet, aucun signal lumineux ne peut parvenir jusqu'à lui, rompant ainsi son lien avec le signal émis.
- D'autre part, l'impact de la puissance optique émise ne peut être négligé. Dans le domaine de l'infrarouge ou de l'ultraviolet, cela se manifeste par une limitation en puissance liée au danger de ce type de rayonnement sur la rétine ou sur la peau. Dans le domaine du visible, cette limitation est liée à la notion d'éblouissement car le signal émis dépend de l'éclairement fourni par la source. On note également que si on éteint totalement la source lumineuse, on ne peut émettre aucun signal.

- De plus, il existe certains cas pour lesquels la lumière visible peut aussi avoir un impact physiologique. En effet, il est possible de voir apparaître des effets de scintillements lors de l'envoi d'informations. Cet effet peut être dû, par exemple, à une longue suite d'états où la lumière est éteinte, créant ainsi une trop grande discontinuité du signal optique. Ceci a pour effet de rendre perceptible le changement d'état de la source, conduisant à un inconfort visuel et même parfois à des nausées. Il existe néanmoins de nombreuses méthodes au niveau de la modulation du signal permettant de résoudre ce problème.
- Enfin, on peut noter que cette technologie peut être parasitée par de nombreuses sources de bruits optiques ambiants comme le soleil, les lampes à incandescences ou n'importe quelle autre source lumineuse.

### ❖ Architecture d'un système VLC

Le système VLC est principalement composé d'émetteurs de lumière modulés Généré par des LED et des récepteurs basés sur des photodétecteurs pour extraire les signaux Lumière modulée. L'émetteur et le récepteur sont physiquement séparés l'un de l'autre, Mais connecté via le canal VLC , comme indiqué sur la figure I.7

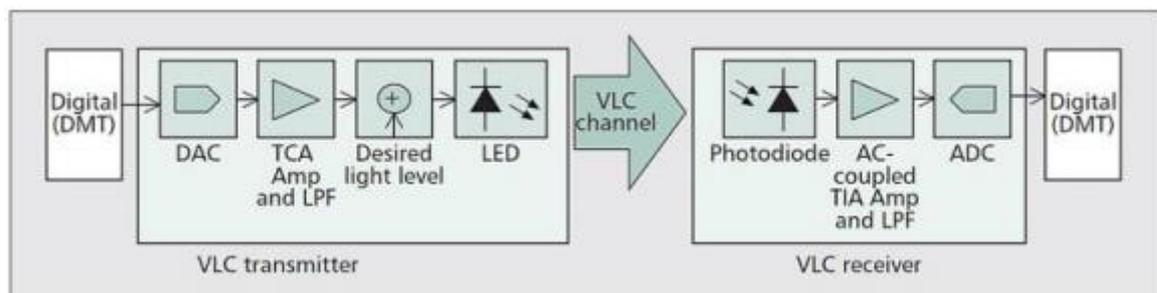


Figure I.7 : Schéma fonctionnel d'un système VLC

### Applications des Systèmes VLC en Milieu Intérieur :

- Liaison point à point : On appelle point à point le fait de transmettre une information entre une ou plusieurs sources fixes (ici les éclairages présents dans la pièce) à un ou plusieurs récepteurs, eux aussi immobiles dans l'environnement. Une illustration du concept est reportée en Figure I.6. L'objectif dans ce scénario est d'atteindre de très hauts débits (>Gbit/s) afin de proposer une alternative viable aux technologies Wi-Fi (concept du Li-Fi).

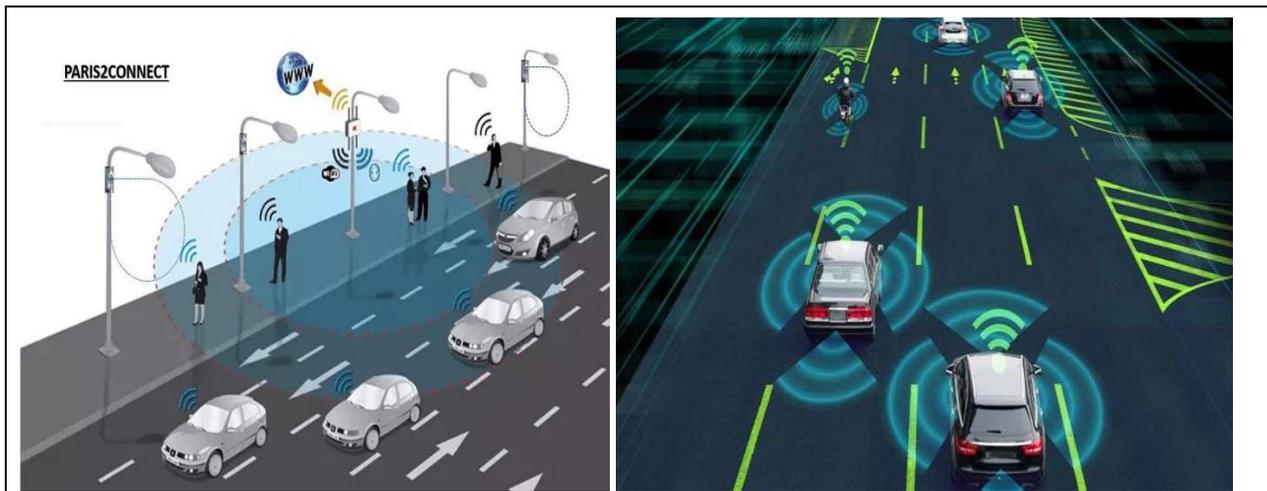
- De nombreuses recherches théoriques ont été menées, permettant par exemple de démontrer qu'il était possible d'atteindre des débits supérieurs à 10 Gb/s en utilisant des LED « Red-Green-Blue » (RGB) [I.26]. De plus, on voit ces dernières années émerger de plus en plus de démonstrations expérimentales [I.27][I.28]. Parmi les plus récents résultats, les auteurs dans [I.28] montrent qu'il est possible d'atteindre un débit de 2.5 Gbit/s entre un émetteur VLC constitué d'une diode laser et un récepteur situé à 12m.
- Enfin, on relève également des études cherchant à combiner la technologie VLC avec celle du courant porteur en ligne, ou « Power Line Communication » (PLC) afin d'optimiser le transfert d'information au sein d'une infrastructure [I.29].

### I.5.1.2 Applications des Systèmes VLC en Milieu Extérieur :

Les diverses applications en extérieur axées autour des VLC ont commencé à émerger lorsque l'industrie automobile s'est intéressée à la possibilité de faire communiquer deux voitures entre elles en utilisant l'éclairage de leurs phares. De cette idée découlent trois types d'applications complémentaires, chacune s'intégrant dans la dynamique de développement des transports intelligents, ou Intelligent Transport System (ITS) [I.30] [I.31] :

- La communication Véhicule à Véhicule (V2V)
- La communication Véhicule à Infrastructure (V2I)
- La communication Infrastructure à Véhicule (I2V)

L'objectif ici est de concevoir un écosystème dans lequel chaque véhicule peut devenir conscient des obstacles et dangers qui l'entourent, lui permettant ainsi d'agir en conséquence soit de manière autonome soit en avertissant les utilisateurs alentours (Figure I.7). Les principales problématiques liées à ces applications concernent le haut niveau de bruit optique ambiant, généré par le soleil notamment, et les distances importantes mises en jeu (plusieurs mètres). A cela s'ajoute l'impact des conditions météorologiques (neige, pluie, température...) qui constituent un caractère imprévisible.



**Figure I.8 :** Illustration des Applications VLC en extérieur.

Actuellement, dans le cadre de communication V2V, il est expérimentalement possible d'établir une communication à 10 kbit/s entre deux véhicules distants de 30 mètres l'un de l'autre [I.32]. Dans cette configuration, on réalise une communication point à point entre chaque véhicule, c'est-à-dire que les véhicules sont considérés immobiles l'un par rapport à l'autre (ils vont donc à la même vitesse).

Les scénarios V2I fonctionnent de manière similaire aux communications V2V, si ce n'est que le véhicule diffuse des informations à destination de l'environnement alentour. Même si à l'heure actuelle les technologies visées s'orientent principalement autour du Wi-Fi ou du Bluetooth, on trouve dans la littérature des méthodes utilisant les VLC [I.33].

Concernant les communications I2V, on privilégie généralement la technique du « handover » : en considérant que des sources d'éclairages sont présentes dans les rues (exemple : lampadaire), il est possible d'utiliser le recouvrement de ces diverses zones d'éclairage afin de transmettre des informations en continu à un véhicule mobile [I.34].

Enfin, on peut aussi noter la démonstration expérimentale d'une communication VLC point à point permettant d'atteindre 1.8Gbit/s pour une distance de 50m [I.35].

Ce type d'application permet d'autre part d'ouvrir le champ des possibilités des communications Infrastructure - Usagers (I2X) et donc de venir compléter les technologies de communication RF utilisées en milieu extérieur.

❖ **Caractéristiques des émetteurs VLC : la Technologie LED**

Dans le domaine des communications par optique sans fil, les principaux composants utilisés en émission sont les diodes. Il en existe principalement deux types: les diodes électroluminescentes (LED) et les diodes laser (LD). En VLC, les LED sont privilégiées en raison de leur faible coût et de leur large surface d'émission, permettant de produire des faisceaux optiques plus diffus, facilitant ainsi le respect des contraintes d'éclairage ainsi que celles liées à la sécurité oculaire.

Les LD ont de meilleures performances que les LED en termes de bande passante et de rendement mais elles émettent généralement des faisceaux très étroits, devant alors respecter des contraintes de sécurité oculaire. Il est possible d'utiliser des diffuseurs afin de palier à cette limitation, cependant ces composants sont très onéreux. Les LD sont classiquement utilisées pour des applications plus spécifiques, par exemple point à point à très haut débit [I.27] [I.28] [I.29]. Le tableau II-1 propose un comparatif de ces deux composants.

**Tableau I.1 : Comparatif LED et LD**

Caractéristiques	LED	LD
Puissance optique	Faible	Importante
Largeur spectrale	(25-100)nm	(0.001-5)nm
Bande passante	Du KHz la cetaine de MHz	Du KHz la cetaine de GHz
Efficacité en puissance	(10-20)%	(30-70)%
Sécurité oculaire	Faible considération	Forte considération
Directivité	Diffuse	Directive

Le composant communément appelé LED consiste en un matériau semi-conducteur dopé avec des impuretés afin de créer une jonction p-n. Comme pour les diodes classiques, le courant circule facilement par le coté n, ou cathode, mais ne peut pas aller dans l'autre direction.

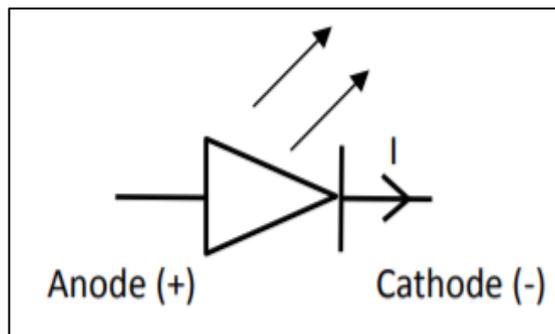


Figure I.9 : Représentation Standard d'un Composant LED

La puissance optique générée par ce composant dépend du courant  $I$  qui la traverse. Cependant, la relation n'est pas complètement linéaire. En effet, comme on peut le voir sur la Figure I.9, l'évolution de la puissance émise en fonction du courant est composée de parties non-linéaires. Généralement, on choisit d'utiliser les LED uniquement dans leur partie linéaire afin d'en faciliter l'étude. De ce fait, on ne tiendra pas compte dans ce cas du comportement non-linéaire du composant.

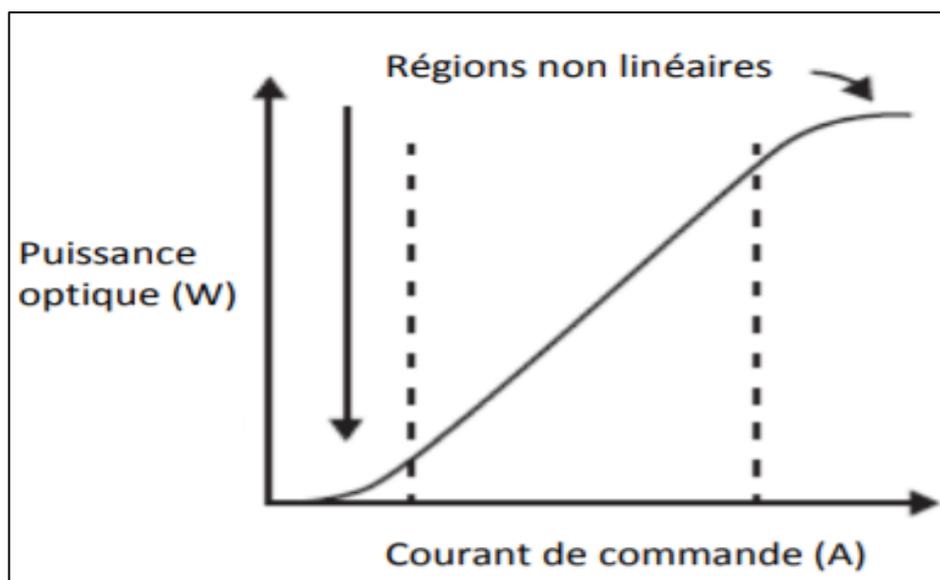


Figure I.10 : Exemple d'évolution de la puissance émise d'une LED en fonction du Courant de polarisation appliqué.

- **Les LED En Réception**

On trouve aussi dans la littérature des exemples d'application VLC utilisant une LED comme récepteur [I.36] [I.37]. On peut ainsi créer un système bidirectionnel à condition d'utiliser les mêmes LED en émission et en réception [I.36].

Pour fonctionner, la LED de réception doit être polarisée en inverse. Ainsi, elle se comporte comme un composant capacitif : selon l'intensité lumineuse reçue, la charge/décharge de la LED va s'effectuer à différentes vitesses. Plus la lumière induite est forte, plus la LED se décharge rapidement. Avec un circuit de réception adapté, il est ainsi possible de dissocier les différents symboles ON/OFF reçus.

Le premier inconvénient majeur en utilisant une LED comme récepteur est que celle-ci est beaucoup moins sensible qu'une photodiode standard, impactant ainsi fortement les distances de communication.

Le second est la limitation en débit : en effet, les LED étant utilisées à la fois pour recevoir et communiquer, cela impacte fortement la bande passante disponible. De ce fait, ce type de récepteur n'est employé que dans des applications très spécifiques, comme dans le domaine du jouet par exemple [I.37].

## I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini et expliqué les différents types de communications sans fil. Nous avons également présenté les avantages et les inconvénients de la communication sans fil ainsi que leurs différentes technologies et leurs applications. Dans ce mémoire de Master, nous sommes intéressés à la communication sans fil par la lumière visible (VLC) et la technologie Li-Fi. présente les principes de base des communications par lumière visible et l'architecture d'un tel système. Les avantages de cette technologie ont également été identifiés. Toutes ses caractéristiques avantageuses conduisent à considérer que la technologie de communication par lumière visible constitue un complément.

Les bases technologiques utilisées par ces nouveaux moyens de communication, comme la LED, arrivent à maturation. Cela permettra donc de bonnes performances

techniques et énergétiques ainsi qu'un coût de déploiement contenu. De nombreuses applications sont possibles : de la communication entre ordinateur à la géolocalisation, de la communication entre voitures en passant par le Li-Fi.

---

# *Chapitre II*

*État de l'Art sur les Systèmes  
VLC Multiporteuse*

# Chapitre II

## État de l'Art sur les Systèmes VLC Multiporteuse

### II.1 Introduction

Le concept d'utiliser une transmission de données parallèle au moyen de multiplexage de division de fréquences n'a été publié qu'à partir de la moitié des années 60. Certaines traces de cette technique étaient déjà présentes dès la fin des années 50 avec notamment la société Collins Radio Co. Kineplex System [I.38]. L'idée était d'utiliser des chaînes de données en parallèle et le multiplexage de divisions de fréquence avec le chevauchement de sous-canaux pour éviter l'utilisation d'égaliseur haut débit et combattre le bruit impulsif et la distorsion due aux multi trajets tout en utilisant toute la largeur de bande disponible [I.38]. Malheureusement cette découverte ne pouvait se contenir qu'au domaine militaire à cause de la complexité en termes de réalisation et de mise en œuvre. En 1979, avec l'apparition des "DSP" (Digital Signal Processing), la TFD pouvait être implémentée sur les circuits numériques rendant alors les systèmes OFDM beaucoup plus souples à réaliser et donc accessibles au monde civil [I.38]. Dans les années 80, l'OFDM a été étudiée pour les modems à haut débit, les communications mobiles numériques, avec

notamment en 1985 la radiophonie mobile proposée par L. J. Cimini et en 1987 la diffusion numérique proposée par M. Alard et R. Lassale [I.37]. Dans les années 90, l'OFDM fut exploitée pour les communications large bande. Les premières applications furent militaires. Le nom d'OFDM n'apparut qu'en 1989 [I.38]. Aujourd'hui la modulation OFDM est très utilisée dans beaucoup de standards de communications par câble et sans fil comme l'ADSL et le LTE [I.38].

## **II.2 Les modulations dans le domaine des VLC**

Il existe plusieurs techniques de modulations associées aux communications par optique sans fil. Dans le cadre des VLC:

### **II.2.1 La modulation OOK**

Comme le montre la figure II.1 , OOK est une technique de modulation simple dans laquelle le "1" numérique est représenté par la présence d'un signal, correspondant à l'état "ON", et la donnée "0" est représentée par un signal de valeur zéro, ou l'état "off". "ON" et "OFF" représentent deux niveaux d'amplitude différents nécessaires à la communication, et ne signifient pas nécessairement que la source lumineuse est complètement éteinte. Pour OOK, la norme IEEE 802.15.17 mentionne l'utilisation de codes Manchester pour s'assurer que la période de l'impulsion positive est la même que la période de l'impulsion négative, mais elle double également la bande passante requise pour la transmission OOK. Cinq débits binaires différents sont utilisés, à savoir 11,67 kbit/s, 24,44 kbit/s, 48,89 kbit/s, 73,3 kbit/s et 100 kbit/s.

Ou, pour des débits binaires plus élevés, utilisez le codage de longueur limitée (RLL, Run Length Limited ) plus efficace du point de vue spectra . La gradation est

prise en charge en ajoutant une extension OOK qui ajuste la sortie agrégée au niveau correct [I.39]

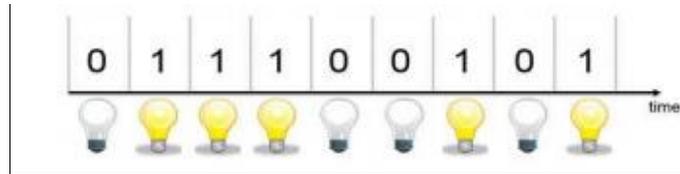


Figure II.1 : Schéma de modulation OOK

### II.2.2 La modulation VPPM

La modulation VPPM est une variante de la modulation de position d'impulsion (PPM), spécialement développé pour VLC. En modulation PPM, l'information est exprimée sous la forme Passez la position d'impulsion dans le temps. Les variantes VPPM introduisent également des variantes Largeur d'impulsion (PWM), en fonction du niveau d'intensité Lueur (voir Figure II.2). C'est la modulation Manchester OOK que nous avons appliquée Cycle de service variable. La modulation VPPM élimine Le scintillement est dû à l'élimination de la longue série de symboles "0" et la technologie PWM permet Contrôler l'intensité lumineuse [I.39].

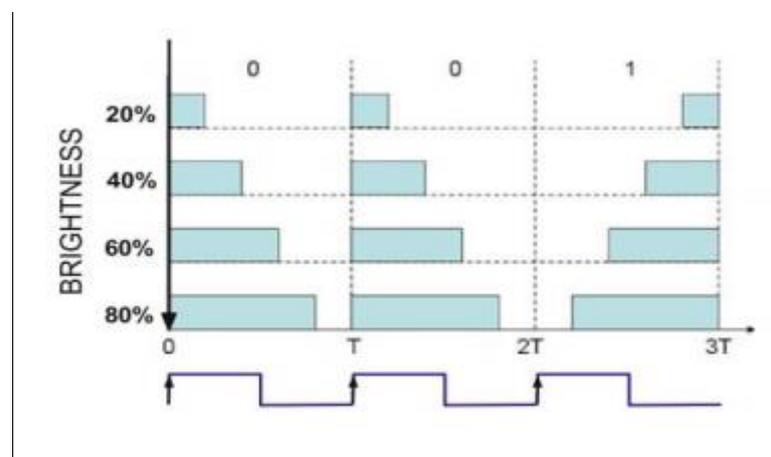


Figure II.2 : Modulation VPPM.

### II.2.3 La modulation CSK

Comme la modulation VPPM, la modulation "color shift keying" est spécifique à VLC. La norme IEEE propose d'augmenter le débit de données inférieur dans d'autres types de modulation. La capacité de commutation ralentit car Utilisez du phosphore jaune et une LED bleue pour produire une lumière blanche. et donc, Une autre façon de générer de la lumière blanche consiste à utiliser trois LED distinctes, verte, Bleu et rouge. Il est spécifiquement défini en utilisant l'intensité de trois couleurs Source de lumière LED RVB. La modulation CSK dépend du diagramme de chromaticité de l'espace colorimétrique. Contrairement aux autres modulations, le symbole est ici Choisissez de garder l'émission lumineuse constante, mais différente Les composantes de chromaticité associées à chaque couleur sont différentes. Cette modulation mappe tous La couleur des deux paramètres de chromaticité (tels que x et y) perceptibles à l'œil nu.

La figure I.12 illustre les sept bandes de longueur d'onde visibles par l'œil présentées dans un tableau avec leurs centres représentés sur le diagramme.[I.39]

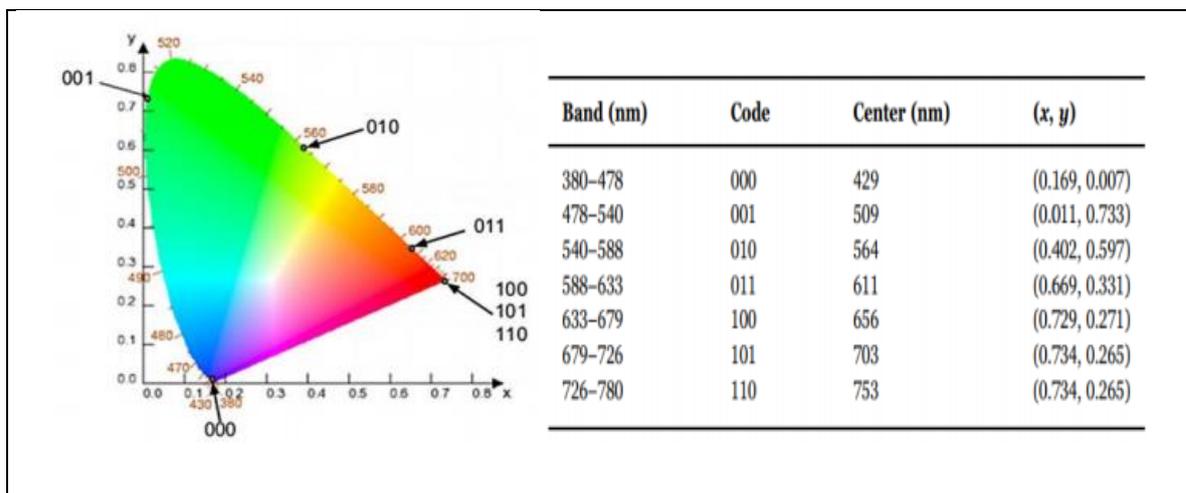


Figure II.3 : Modulation CSK

Cette technique élimine complètement le problème de scintillement. De plus, comme le flux lumineux émis est constant, le courant de commande reste également constant. En même temps, cela réduit considérablement les restrictions sur la source. Les limitations de cette modulation sont liées à la complexité de la réception et au besoin de pouvoir recevoir chaque couleur [I.39].

### **II.3 Principe de la Modulation Multiporteuse**

Le concept de transmission en OFDM est simple : les données sont transmises en parallèle à des fréquences différentes résultant en une période de symbole plus long que l'obtenus en modulations en série à la même vitesse. De cette façon, l'Interférence entre symboles (ISI) est réduite presque complètement et en cas d'ISI résiduel, il est facilement éliminé par l'utilisation d'un intervalle de garde appelé code cyclique. Il est à noter que l'OFDM présente des différences avec les modulations qui utilisent également la transmission de données à différentes fréquences simultanément. Modulations comme FDM (Multiplexage par division de fréquence) ou WDM (Division de longueur d'onde multiplexing) ils utilisent des gardes entre les sous-porteuses. Cependant, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales. Cette propriété ne permet aucune séparation entre eux est nécessaire et la reconstruction du signal au niveau du récepteur est simple. L'OFDM permet donc la transmission à des vitesses élevées et une efficacité élevée dans l'utilisation de la bande passante. Ces avantages, cependant, ils ne sont pas offerts par les modulations série conventionnelles comme QAM (Modulation d'amplitude en quadrature).

### II.3.1. Les Systèmes VLC Multiporteuse

Dans les systèmes OWC, la conversion des signaux électriques en signaux optiques est réalisée par l'utilisation de LED ou de LD. Les LD produisent une lumière cohérente, par conséquent, toutes les ondes lumineuses se déplacent de manière analogue, dans une même direction et avec une même phase. Cela augmente la possibilité d'exploiter efficacement le spectre électromagnétique en formant des cellules plus petites et en réutilisant la fréquence, etc. En raison d'un comportement cohérent, la lumière émise par les LD peut voyager sur de plus longues distances et souffrir de moins d'interférences dans le même canal. De plus, les LD ont une bande passante de modulation plus grande que les LED [I.39].

Cependant, les LED qui fonctionnent dans le spectre VL sont les candidats les plus appropriés pour les frontaux d'émetteur dans OWC en raison d'un déploiement amélioré, d'une efficacité énergétique, d'une durée de vie plus longue, d'une production et de chaleur plus faible. De plus, les LED peuvent basculer rapidement entre différentes intensités lumineuses. Cette fonctionnalité fait des LED des émetteurs efficaces pour OWC à grande vitesse et des sources d'éclairage en même temps [I.39].

Il faut s'assurer que les LED fonctionnent avec un signal de valeur réelle non négatif.

### II.3.1.1 Le Système VLC DCO-OFDM :

Un moyen pratique d'assurer la non-négativité du signal OFDM est d'ajouter une polarisation continue pour garantir un signal unipolaire à l'extrémité de l'émetteur. Dans DCO-OFDM, toutes les sous-porteuses sont affectées sauf la première et la  $(N/2+1)$  ième sous-porteuses qui sont mises à zéro pour que le signal de sortie ne soit constitué que de valeurs réelles [II.10]. Comme mentionné précédemment, la symétrie hermitienne est fondamentale pour que la sortie du bloc IFFT soit constituée de signaux à valeur réelle. Le signal obtenu de valeur réelle, il est toujours bipolaire, donc une polarisation de courant continu (CC) doit être ajoutée pour convertir le signal bipolaire en un signal unipolaire prêt pour que la LED transmette les données respectives. La Figure II.4 montre un schéma de principe d'un système DCO-OFDM.

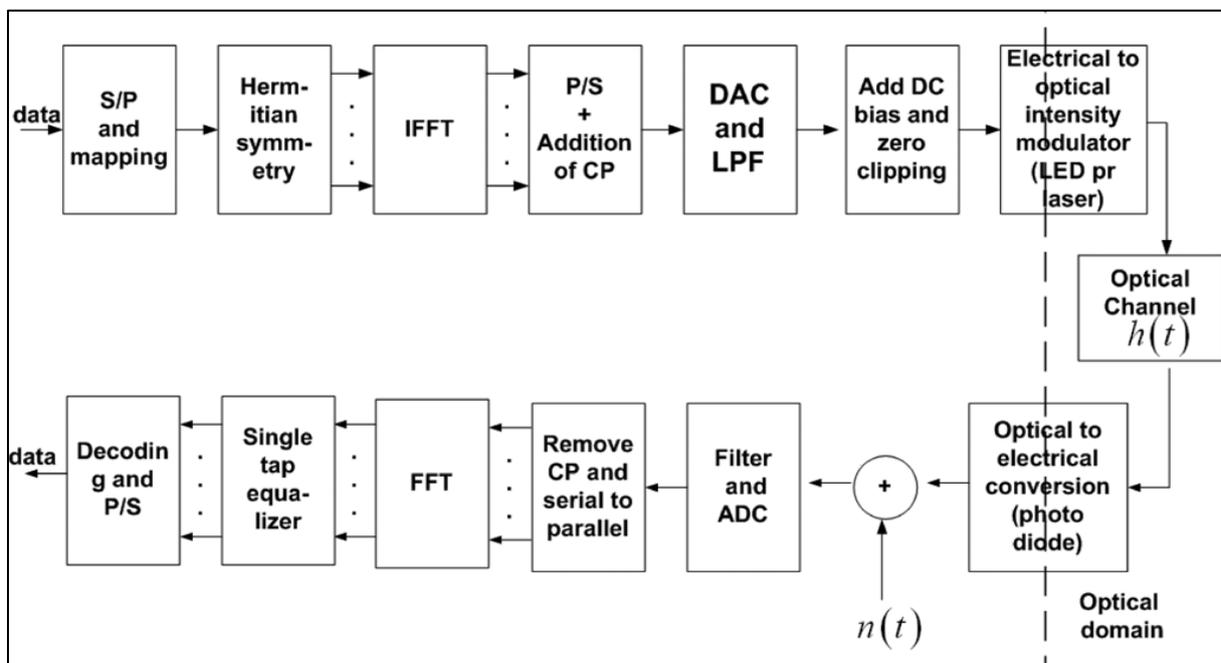


Figure II.4 : Schéma de Principe d'un Système DCO-OFDM.

### II.3.1.2 Le Système ACO-OFDM :

Le Système ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical OFDM) été proposée la première fois par J. Armstrong [I.39]. Dans un système ACO-OFDM, seules les sous-porteuses d'ordre impair sont utilisées pour la transmission des données.

La différence entre ACO-OFDM et DCO-OFDM, est qu'aucune composante continue additionnelle n'est nécessaire en ACO-OFDM. A l'émission, les sous-porteuses impaires sont modulées via un bloc IFFT. Le signal obtenu est réel est bipolaire grâce à la symétrie hermitienne. Ce signal bipolaire est simplement « zéro-clippé », ainsi un signal unipolaire ACO-OFDM est obtenu. La Figure II.2 présente le schéma d'une liaison ACO OFDM dans sa conception, sous forme de blocs émetteur et récepteur. Les symboles à l'entrée du bloc IFFT sont sous la forme d'un vecteur  $X = [0, X_1, 0, \dots, X_{N-1}]$  composé uniquement de composantes impaires avec une symétrie hermitienne. Le signal obtenu après l'IFFT est réel bipolaire.

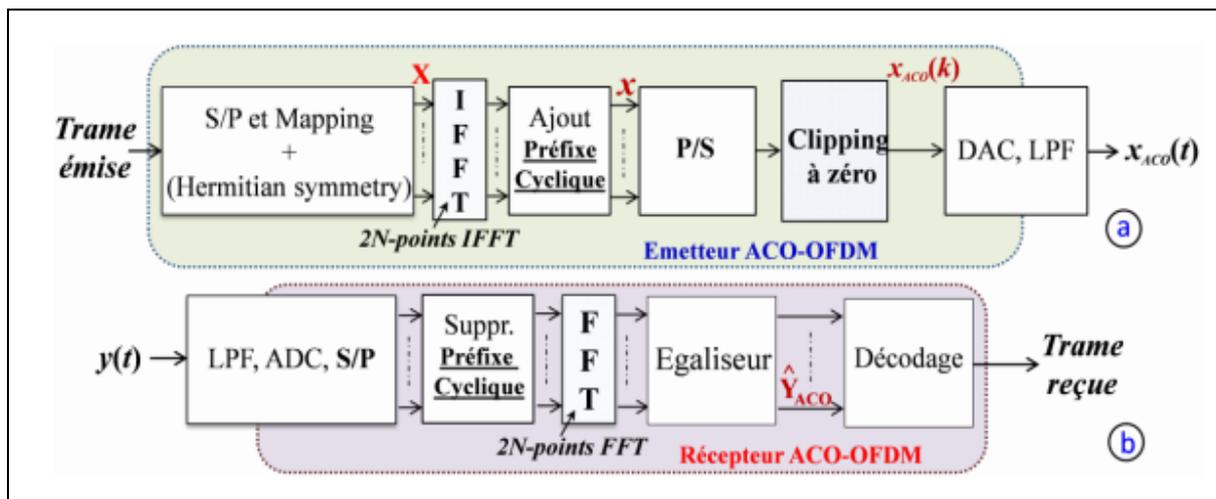


Figure II.5 : Schéma Blocs d'un Système ACO-OFDM : (a) Emetteur, (b) Récepteur

Pour chaque échantillon positif, on a un échantillon négatif correspondante de même amplitude, Le signal obtenu est sérialisé puis converti en signal analogique via un DAC suivi d'un filtre passe-bas.

Le signal analogique résultant est ensuite zéro-clippé, générant un signal réel unipolaire. De par la propriété d'antisymétrie, le processus de zéro-clipping n'occasionne aucune perte d'informations sur les sous-porteuses impaires.

### II.3.1.3. Le Système ADO-OFDM :

Le Système ADO-OFDM (Asymmetrically Clipped DC-biased Optical OFDM) est proposé dans le but d'améliorer l'efficacité en puissance optique de DCO-OFDM et l'efficacité spectrale du système ACO-OFDM [I.40]. Les deux modulations ACO-OFDM et DCO-OFDM sont associées afin d'optimiser la transmission. La Figure II.6 illustre le schéma descriptif d'un émetteur ADO-OFDM.

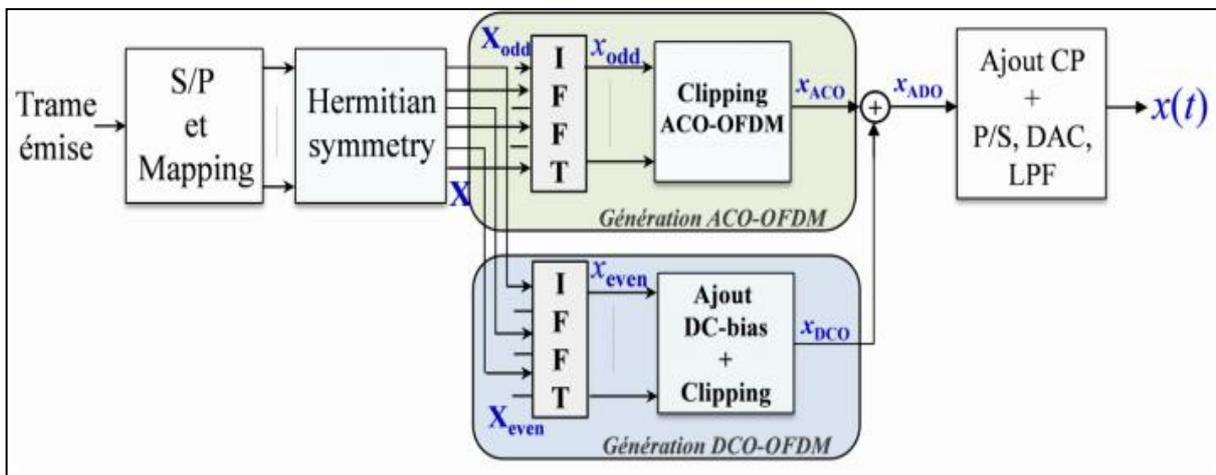


Figure II.6 : Schéma de Principe d'un émetteur ADO-OFDM

Au niveau de récepteur via à un processus d'annulation d'interférence, les sous-porteuses paires  $Y_{even}$  sont ensuite démodulées. Pour ce faire, les symboles  $Y_{odd}$  sont ramenés dans le domaine temporel via IFFT. Ensuite, le bruit d'écrêtage (clipping) est estimé localement pour permettre la reconstruction du signal de référence  $y_{ACO}$ . En soustrayant ce signal  $y_{ACO}$  du signal reçu  $y$ , on retrouve l'estimée du signal discret

*yeven* qui correspond aux sous-porteuses paires. Par suite en appliquant une FFT au signal *yeven*, on démodule en DCO-OFDM, en considérant uniquement les sous-porteuses paires à la sortie du bloc FFT [I.40].

### II.3.1.4 Le Système Flip OFDM

Est utilisé pour garantir que les signaux non négatifs dans les systèmes de communication optique sans fil (OWC) et le multiplexage par répartition orthogonale inverse de la fréquence (Flip OFDM) transmettent les parties positives et négatives du signal sur deux sous-trames OFDM consécutives.

Un récepteur itératif est alors proposé pour améliorer les performances de transmission de Flip-OFDM en exploitant les signaux dans les deux sous-trames. Les résultats de la simulation montrent que le récepteur itératif proposé offre un gain de rapport signal/bruit (SNR) significatif par rapport au récepteur conventionnel. De plus, le récepteur itératif surpasse également le récepteur avancé existant.

Un récepteur itératif est proposé pour Flip OFDM dans OWC IM / DD Based System. Afin d'améliorer les performances du récepteur, le récepteur itératif obtient

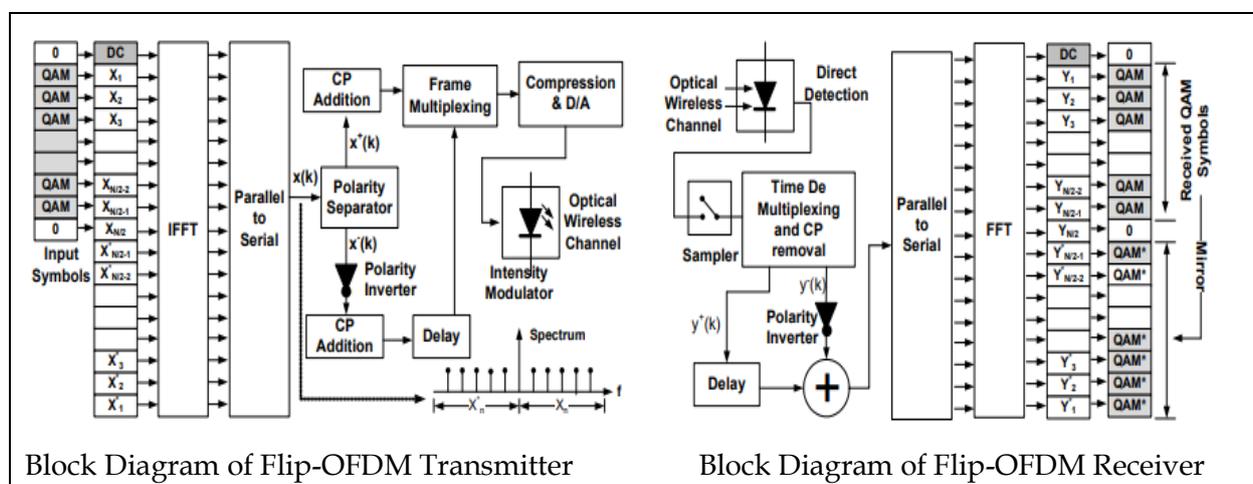


Figure II.7 : Schéma de Principe d'un Système Flip-OFDM

### II.3.2. Comparaison entre les Systèmes VLC multiporteuse

Les caractéristiques des modulations les plus importantes sont présentées dans le tableau

Tableau II.1 : Comparaison des Systèmes VLC OFDM Multiporteuse

MCM	OFDM	Excellent pour les situations dans lesquelles plusieurs émetteurs sont utilisés simultanément ; évite les effets d'ombre, les interférences peuvent être atténuées en déplaçant la bande passante du système vers une fréquence plus élevée.
	DCO-OFDM	Dissipation d'énergie substantielle due à la polarisation.
	ACO-OFDM	Efficace en termes de puissance optique pour une valeur de SNR inférieure pour le canal IM/DD.
	ADO-OFDM	Améliorer l'efficacité en puissance optique de l'OFDM
	Flip-OFDM	Équivalent à l'ACO-OFDM en termes d'efficacité spectrale et de performance d'erreur

### II.4 Modélisation du Système DCO-OFDM

L'approche de modulation DCO-OFDM est la plus étudiée pour les systèmes de communications OWC. La figure II.8 illustre un schéma fonctionnel d'un émetteur DCO-OFDM.

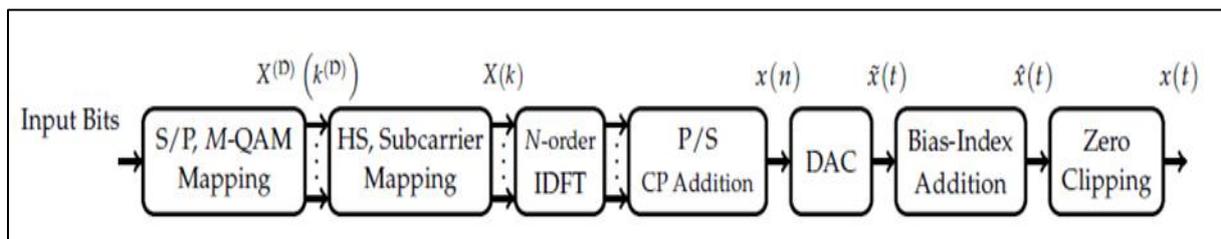


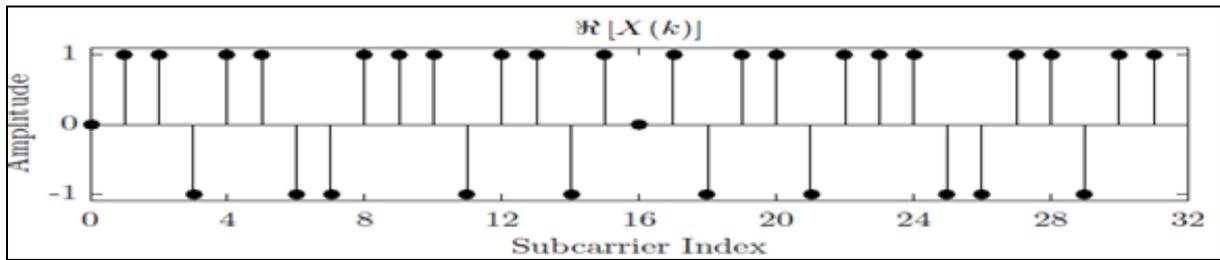
Figure II.8 : Schéma Fonctionnel de l'Émetteur DCO-OFDM

Les bits entrants en série sont analysés en  $(N/2 - 1)$  flux parallèles. Ces bits sont modulés en  $M$ - alphabets complexe en utilisant une modulation d'amplitude en quadrature (QAM). Les symboles obtenus en domaine fréquentiel sont affectés à un  $N$ - signal dimensionnel,  $X(k), k = 0, 1, \dots, N - 1$  obéir à une symétrie Hermitienne (HS) comme :

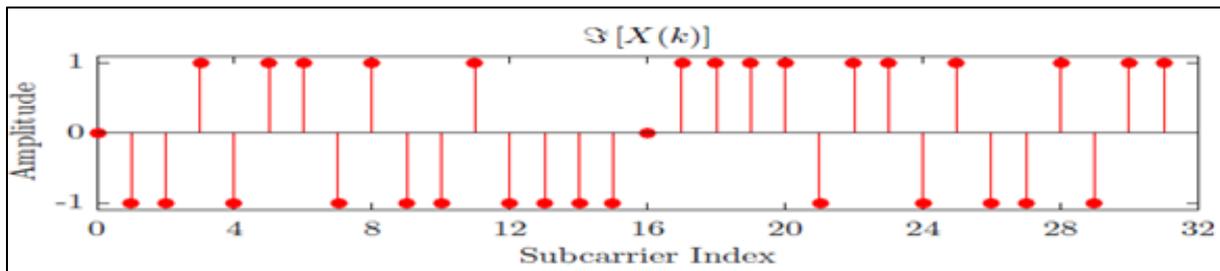
$$X(k) = \begin{cases} X^{(D)}(k^{(D)}), & k = k^{(D)} + 1 \\ X^{*(D)}(k^{(D)}), & k = N - (k^{(D)} + 1) \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où  $(\cdot)^*$  représente l'opération conjuguée. Pour éviter toute composante complexe résiduelle dans le signal TD,  $X(0)$  et  $X(N/2)$  sont mis à zéro. Notez que HS est incorporé pour obtenir un signal temporel à valeur réelle. Une illustration graphique des composants réels et imaginaires de  $X(k)$ , c'est-à-dire,  $\text{Ré}[X(k)]$  et  $\text{Im}[X(k)]$  est présenté à la Figure II.5 (a) et Figure II.5 (b), respectivement pour signifier l'impact du HS sur la génération du signal.

Il peut être observé à partir de la Figure II. 6 (a) que les composants réels de la seconde moitié des sous-porteuses sont l'image en miroir de la première moitié des sous-porteuses. De plus, à partir de la Figure II.6 (b), on peut remarquer que les composantes imaginaires de la seconde moitié de  $X(k)$  sont une image miroir inversée des composantes imaginaires de la première moitié.



(a)



(b)

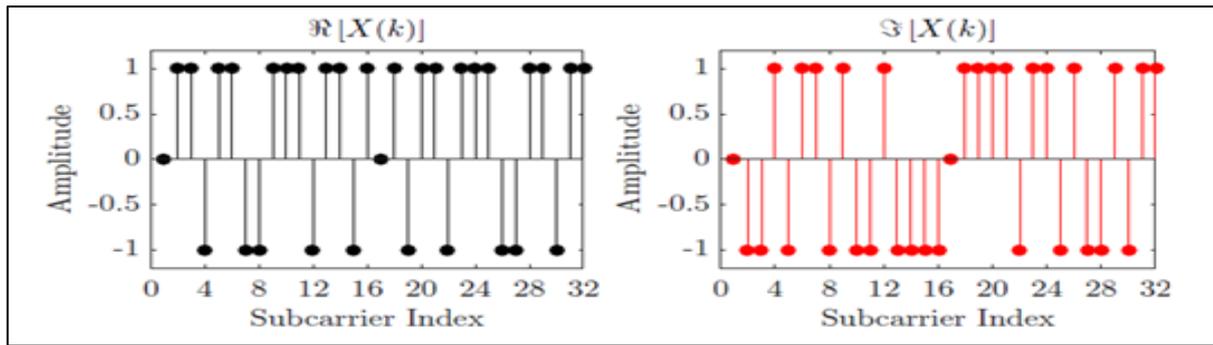
**Figure II.9 :** Illustration de la Symétrie Hermitienne dans un Système DCO-OFDM pour une Modulation 4-QAM. (a)  $Re [X (k)]$  (b)  $IM [X (k)]$

Les symboles fréquentiels symétriques Hermitiens,  $X(k)$  sont nourris à  $N$ -ordonner à IDFT de multiplexer les sous-porteuses orthogonales qui résulte d'un signal temporel donné par :

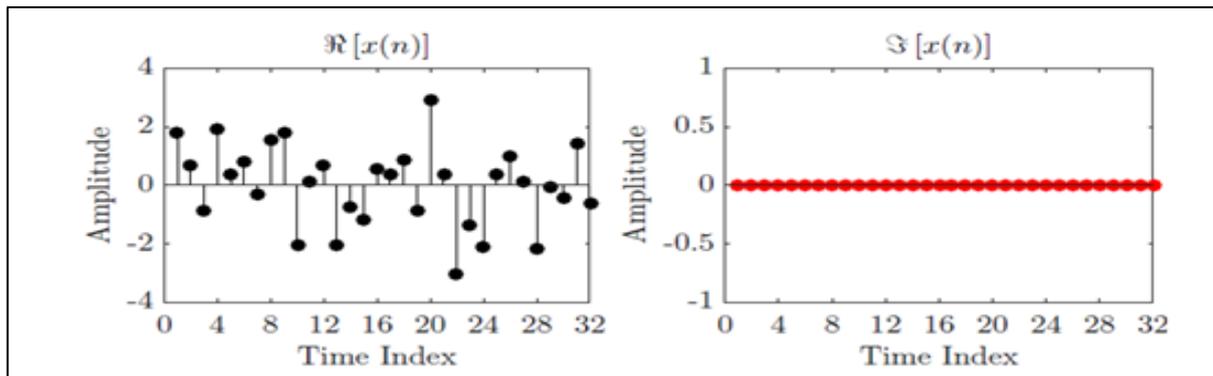
$$x(n) = \text{IDFT} [X(k)] \quad (\text{II.2})$$

Il est souligné qu'en raison de la HS,  $x(n)$  a une valeur réelle mais bipolaire. Un exemple de conversion d'un symbole complexe incorporant HS en signal domaine temporel à valeur réelle est illustré sur la Figure II. 10

Il est démontré que si HS est appliqué dans le domaine fréquentiel, le signal de sortie domaine temporel aurait une valeur réelle.



(a)



(b)

Figure II.10 : Un exemple de conversion de signal DCO-OFDM de FD en TD avec HS.

Un signal TD continu  $\tilde{x}(t)$  s'obtient en nourrissant  $x(n)$  à un convertisseur numérique-analogique (DAC) et ajout d'un préfixe cyclique (CP) de longueur  $N_{cp}$  qui est, au moins, égal à l'étalement du délai moyen quadratique (rms) du canal. Afin de convertir le signal bipolaire en un signal unipolaire, une approche directe consiste à ajouter un indice de biais approprié,  $\beta_{DC}^{(D)}$ .  $\beta_{DC}^{(D)}$  est prescrit par rapport à l'écart type de  $\tilde{x}(t)$  comme :

$$\beta_{DC}^{(D)} = \zeta_{(D)} \sqrt{E(|\tilde{x}(t)|^2)}, \zeta_{(D)} > 0, \quad (\text{II.3})$$

Où  $\zeta_{(D)}$  est la constante de proportionnalité. L'indice de polarisation sur l'échelle des décibels (dB) est défini comme  $10 \log_{10} (\zeta_{(D)} + 1)$  dB.

Le signal TD après l'ajout de  $\beta_{DC}^{(D)}$  est :

$$\hat{x}(t) = \tilde{x}(t) + \beta_{DC}^{(D)}, \quad (\text{II.4})$$

De nombreux niveaux d'indice de polarisation peuvent être incorporés dans le signal bipolaire. L'approche la plus pratique c'est adopter polarisation suffisante, dans lequel,  $\zeta_{(D)}$  est ajusté de telle sorte que toutes les excursions négatives de  $\hat{x}(t)$  après l'addition de  $\beta_{DC}^{(D)}$  sont éliminés. Cependant, dans ces cas, la valeur de  $\beta_{DC}^{(D)}$  est relativement grande, ce qui rend le DCO-OFDM inefficace en termes de puissance optique. Par conséquent, une meilleure option peut être d'employer une valeur modérée de  $\beta_{DC}^{(D)}$  et éliminer les pics négatifs restants par écrêtage dur  $\hat{x}(t)$  comme :

$$x(t) = \begin{cases} \hat{x}(t), & \hat{x}(t) \geq 0 \\ 0, & \hat{x}(t) \leq 0 \end{cases} = \hat{x}(t) + n_c(\beta_{DC}^{(D)}) \quad (\text{II.5})$$

Où  $n_c(\beta_{DC}^{(D)})$  est le bruit d'écrêtage dépendant de  $\beta_{DC}^{(D)}$ , qui peut avoir un impact important sur les performances du système. Une illustration graphique du biais exprimé en (II.8) et le processus de découpage après l'ajout l'indice de biais est donnée dans la Figure II.11.

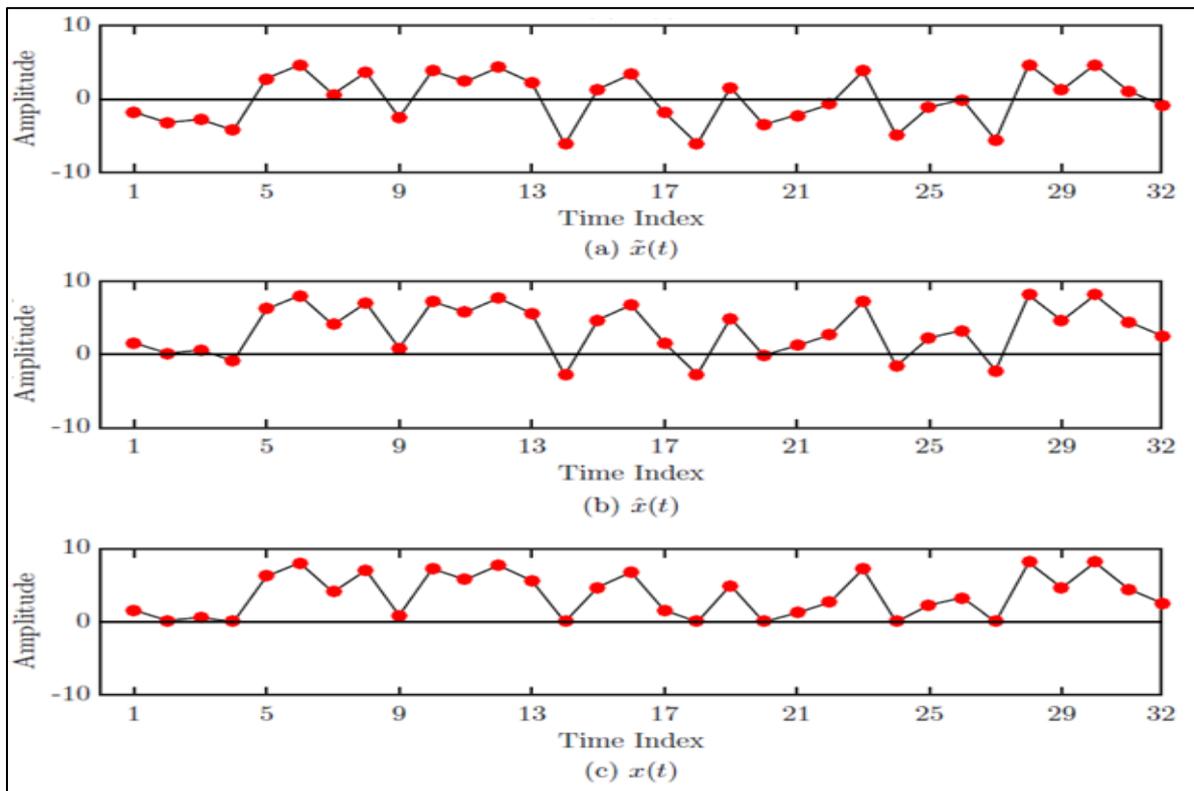


Figure II.11 : Représentation Temporelle du signal DCO-OFDM (a) avant polarisation,  $\hat{x}(t)$  (b) biaisé signal,  $\hat{x}(t)$  (c) signal polarisé après écrêtage,  $x(t)$ .

### II.4.1. Modélisation du Récepteur VLC-DCO-OFDM :

Au niveau du récepteur (Figure II.12),  $y(n)$  est obtenu en heurtant le signal photo-défecté,  $y(t)$ , sur le convertisseur analogique-numérique (ADC) suivi de la conversion S/P et de la suppression du CP. Les symboles FD reçus,  $Y(k)$  sont obtenus par  $N$ - ordre DFT :

$$Y(k) = \text{DFT}[y(n)] = H(k)X(k) + W(k) \quad (\text{II.6})$$

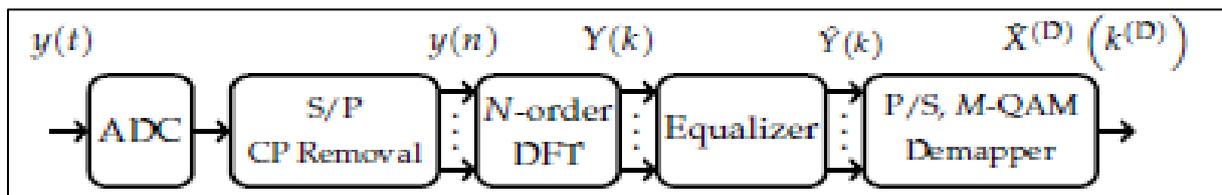


Figure II.12: Schéma fonctionnel du récepteur DCO-OFDM

Où  $H(k)$  est la réponse en fréquence du canal pour le  $k$ -ième sous-porteuse. Par la suite, une égalisation à une seule prise est effectuée dans le domaine fréquentiel, ce qui se traduit par :

$$\hat{Y}(k) = \hat{X}(k) + Z(K) \quad (\text{II.7})$$

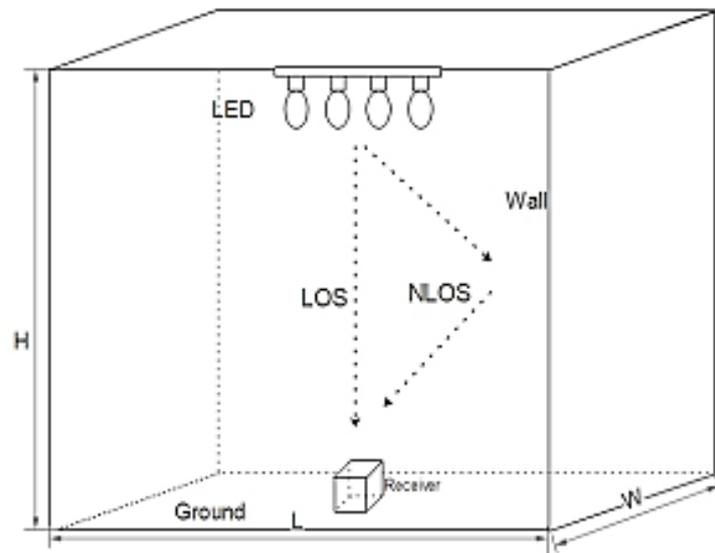
Où  $\hat{x}(k)$  sont les symboles FD reçus estimés après l'égalisation (sans forcer) et  $Z(k) = W(k) / H(k)$ . Les données transmises sont détectées comme :

$$\hat{X}^{(D)}(k^{(D)}) = \arg \min \| \hat{Y}(k^{(D)} + 1) - X_Q \|$$

Où  $X_Q$  représente tous les éléments de  $Q$ .

## II.5 Modélisation du canal VLC :

Un canal VLC réaliste est déterminé par de nombreux facteurs, la source lumineuse, différents types de réflexions et la longueur d'onde lumineuse. Dans un environnement domestique, la réponse LOS dépend de la longueur du LOS et sa puissance est plus grande que celle des composants NLOS causée par un grand nombre de réflexions sur les murs, le sol et d'autres objets tels que le verre indiqué dans Figure II.13



**Figure II.13 :** Modèle de distribution géométrique intérieure du système

Le retard de chemin maximal dans l'environnement domestique est d'environ 60ns et il y a souvent une réponse LOS alors que les réponses NLOS sont extrêmement petites. Pourtant dans l'environnement de la cellule de fabrication, le maximum de retard de chemin peut dépasser 80 ns. Également, il y a des réponses LOS plus fortes autant de traces lumineuses sont réfléchies par les matériaux métalliques et les réponses NLOS ne peut être négligée.

Dans l'ensemble, nous pouvons modéliser le canal VLC comme un canal à trajets multiples. Le VLC canal peut être modélisé comme :

$$h(\tau) = \sum_{l=0}^{L-1} g(l)(\tau - \tau_l) \quad (\text{II. 8})$$

Où  $g(l)$  et  $\tau_l$  dénotent le gain et le retard du  $l$ -ième chemin de transmission,  $\delta(\tau)$  désigne la fonction Dirac et  $L$  représente le nombre de chemin.  $h(\tau)$  peut être rendu discret à une vitesse d'échantillonnage. Pour simplifier, nous supposons que  $\tau_l$  est un entier. Étant donné que les systèmes VLC ne peuvent transférer que des signaux d'intensité,  $g(l) \geq 0$ . Au niveau du récepteur, la lumière reçue est concentrée sur le photodétecteur via un concentrateur optique. Des filtres optiques peuvent être utilisés pour confiner le spectre de la lumière, affaiblir l'impact des sources de lumière ambiante et pour filtrer le bleu (pour limiter la lumière lente de la conversion de couleur du phosphore jaune). Le gain du filtre optique,  $G_{OC}(\psi)$ , est fonction de l'angle d'incidence au niveau du récepteur,  $\psi$ .

Le concentrateur optique concentre la lumière reçue du champ de vision large (FoV) vers une photodiode (PD). Le gain optique d'un concentrateur est exprimé par :

$$G_{OC}(\psi) = \begin{cases} \frac{n_{ref}^2}{\sin^2(\psi_{FoV})}, & |\psi| \leq \psi_{FoV} \\ 0, & |\psi| > \psi_{FoV} \end{cases} \quad (\text{II. 9})$$

Où  $n_{ref}$  est l'indice de réfraction effectif du matériau optique,  $\psi$  est l'angle

Par rapport à l'angle d'incidence du récepteur,  $\psi_{FoV}$  est le  $\psi_{FoV}$  du récepteur, c'est-à-dire l'angle d'incidence que le récepteur ne permet à aucune lumière de dépasser. De

nombreux types de photodétecteurs/photodétecteurs peuvent être utilisés, tels que des capteurs d'images, des panneaux solaires et même des LED. Cependant, divers facteurs limitatifs, tels qu'une réponse à basse fréquence et une faible efficacité de communication à grande vitesse, rendent les composants ci-dessus inappropriés pour une utilisation en tant que photodétecteurs. Le photodétecteur (LD) convertit le signal optique reçu en un signal électrique, qui est amplifié par un amplificateur à transimpédance (TIA), puis effectue une conversion analogique-numérique et un traitement du signal pour la récupération des données.

Les performances du récepteur sont affectées par la bande passante, la sensibilité et la zone du PD. La quantité de lumière que PD peut focaliser est liée à sa zone ; APD. Cela signifie que si vous amplifiez l'APD, vous pouvez augmenter la puissance reçue, augmentant ainsi la sensibilité, de sorte que le système soit plus adapté à la mobilité. Cependant, un APD plus grand ralentira la vitesse de commutation de l'appareil, réduisant ainsi la courbe de réponse en fréquence. On peut remarquer que GOF ( $\psi$ ) et GOC ( $\psi$ ) dépendent de l'angle d'incidence de la lumière au niveau du récepteur, donc l'angle d'incidence de la lumière au niveau du récepteur va changer la surface effective  $A_{\text{eff}}$  du photodétecteur. Selon cela, le changement de  $A_{\text{eff}}$  correspond à  $\cos(\psi)$ , par conséquent,  $A_{\text{eff}}$  peut être calculé comme :

$$A_{\text{eff}}(\psi) = \begin{cases} A_{PD} G_{OF}(\psi) G_{OC}(\psi) \cos(\psi), & |\psi| \leq \psi_{FOV} \\ 0, & |\psi| > \psi_{FOV} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Un autre paramètre critique qui influe sur les performances du système est la réactivité du PD,  $v$  (Ampère / Watt) qui quantifie la quantité de courant induit pour une puissance optique donnée.  $v$  varie avec la longueur d'onde de la lumière, par

conséquent, il peut être évalué en l'intégrant pour des longueurs d'onde individuelles sur tout le spectre de la lumière transmise atteignant le PD .

## **II.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons parlé des différentes architectures OFDM optiques. Une mention particulière a été faite pour l'architecture IM/DD car simple et moins coûteuse en termes de réalisation et de fonctionnement. Nous avons également présenté les différentes modulation comme l'OOK, VPPM ,et en suit la modulation CSK est spécifique aux VLC. Puis ca on va voir le Principe de la modulation multipoteus c'est le concept de transmissions en OFDM .on parle sur les systèmes VLC comme DCO-OFDM ,ACO-OFDM ,ADO-OFDM, Flip-OFDM on fait un petit comparaison sur eux . Nous avons intéressé Just sur la modélisation da la DCO-OFDM leur Emetteur et Récepteur et la distribution géométrique intérieure du système VLC.

---

# *Chapitre III*

*Simulation d'un Système DCO-OFDM*

# Chapitre III

## Simulation d'un Système DCO-OFDM

### III.1 Introduction

Après avoir finalisé la partie théorique, nous passons dans ce chapitre à l'implémentation de notre application, L'objectif est d'examiner les performances de transmission pour un système VLC DCO-OFDM. Dans ce contexte nous décrivons en premier lieu l'effet de certains paramètres (nombre d'état de modulation, valeur de DC-bias et nombre de FFT) sur les performances du système DCO-OFDM pour les deux canaux de transmission AWGN et VLC-LOS. Les résultats des simulations réalisées pour évaluer le système DCO-OFDM sont présentés en termes de taux d'erreur binaire (BER).

### III.2 Environnement Utilisé

Le choix du bon environnement de programmation /simulation est très important pour le développement des projets. Cela se fait suivant plusieurs facteurs : la puissance de compilation, la facilité d'utilisation, la disponibilité de plusieurs fonctionnalités et la communication avec d'autres environnements, etc. Afin de réaliser les différentes simulations de notre système, nous avons choisi l'environnement MATLAB. Ce dernier est un outil de calcul scientifique de haut niveau et interactif pour le développement

d'algorithmes, la visualisation et l'analyse des données, ou encore le calcul. En utilisant MATLAB, nous pouvons résoudre des problèmes de calcul scientifique plus rapidement qu'avec les langages de programmation traditionnels (de bas niveau).

### III.3. Evaluation de la Constellation M-QAM

L'objectif de cette partie est l'évaluation de performances d'un système DCO-OFDM en termes de BER pour différents états de modulation M-QAM dans deux types de canaux de transmission :

- Canal AWGN : Canal à bruit additif Gaussien
- Canal VLC-LOS : Visible Light Communication -Light Of Sight

Les Figures III.1 et III.2 présentent la variation de BER en fonction de SNR pour différents états de constellation M-QAM dans un canal AWGN et un canal VLC-LOS respectivement.

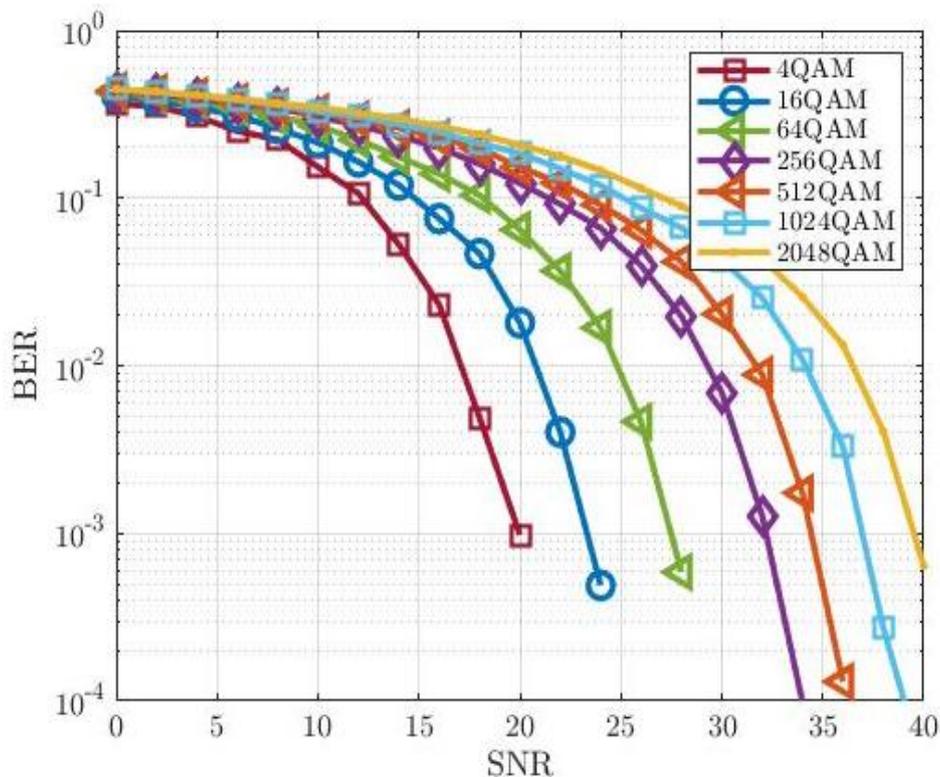
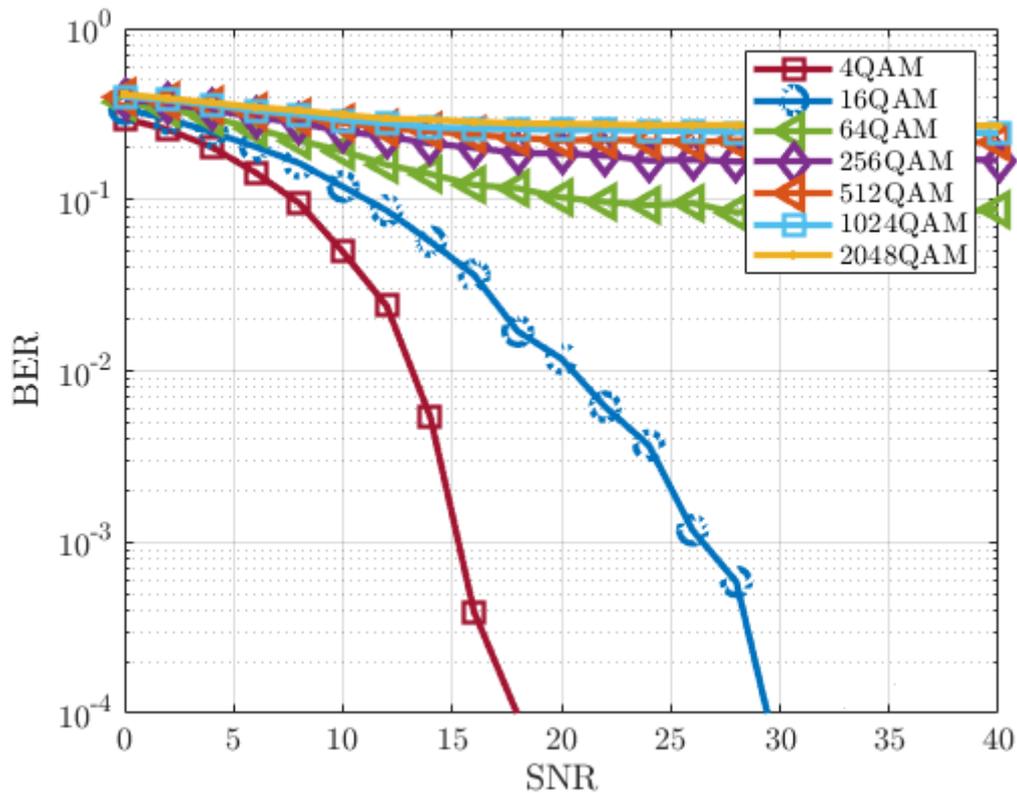


Figure III.1 : Effet de Nombre d'Etat de Constellation M-QAM pour un Système DCO-OFDM dans un Canal AWGN avec un DC-Bias = 7dB



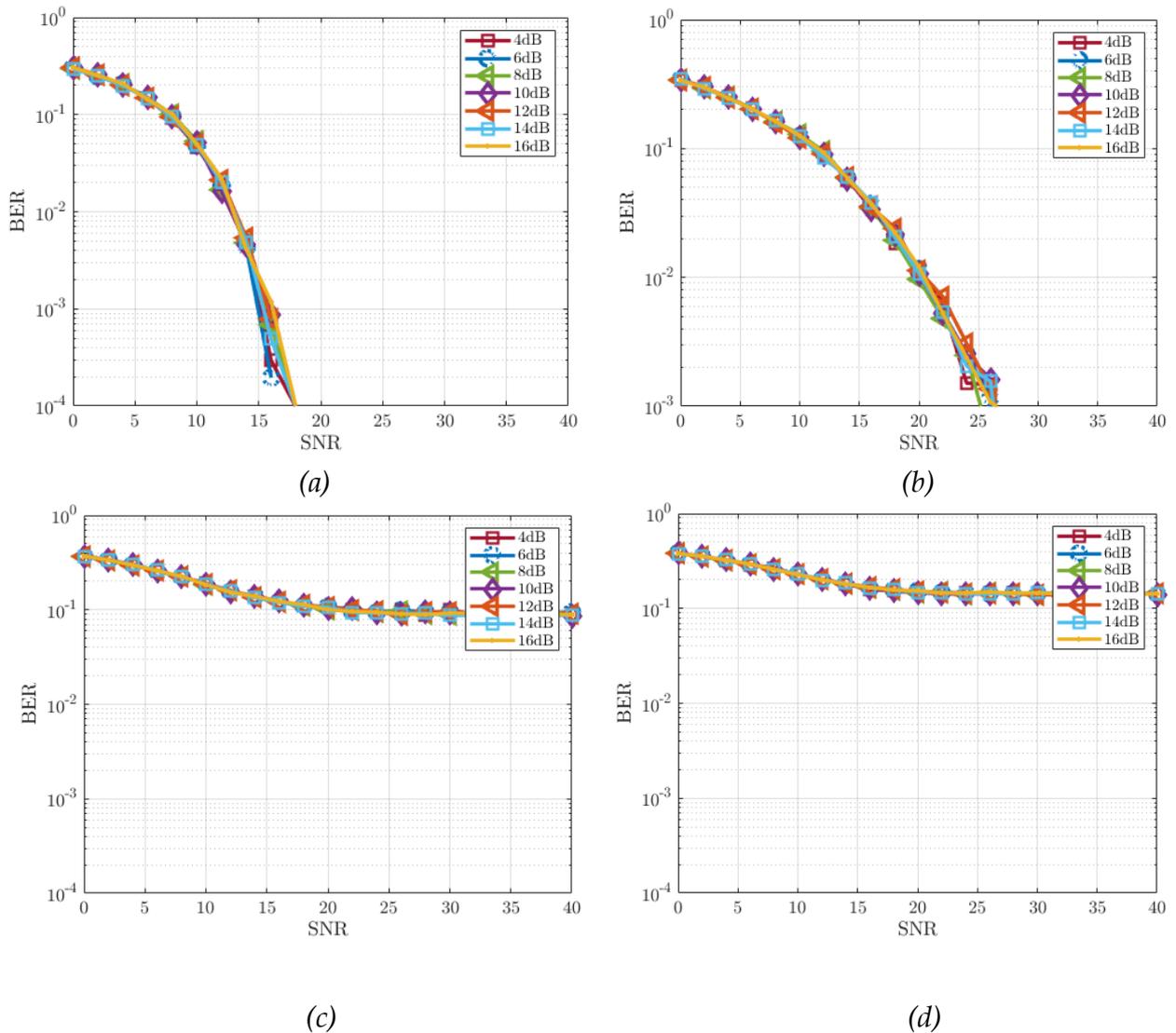
**Figure III.2 :** Effet de Nombre d'Etat de Constellation M-QAM pour un Système DCO-OFDM dans un Canal VLC-LOS avec un DC-Bias = 7dB

A partir de Figures III.1 et III.2 on remarque la dégradation de BER en fonction de nombre d'état de la constellation M-QAM. Dans le canal AWGN cette dégradation est lentement proportionnel au nombre d'état. Avec des valeurs de SNR  $\geq 40$ dB toutes les modulations s'améliorent. Par contre dans canal VLC-LOS uniquement les modulations 4QAM et 16QAM s'améliorent en fonction de SNR. On note que ces dégradations sont dues au bruit d'écrêtage qui devient très pénalisant au stade, des constellations d'ordre supérieurs ( $\geq 64$ QAM).

### III.4. Evaluation de la Valeur de DC-Bias

L'objectif de cette partie est l'évaluation de performances d'un système DCO-OFDM en termes de BER pour différents états de modulation M-QAM dans un canal de transmission : VLC-LOS.

Les Figures III.3(a), III.3(b), III.3(c) et III.3(d) présentent la variation de BER en fonction de SNR pour différents DC-bias dans un canal VLC-LOS. Quatre types de constellation M-QAM ont été simulés.



**Figure III.3 :** Effet de la Valeur de DC-Bias pour un Système DCO-OFDM dans un Canal VLC-LOS (a)4QAM, (b)16QAM, (c)64QAM et (d)128QAM

Les Figures III.3(a), III.3(b), III.3(c) et III.3(d) montrent que dans un canal VLC-LOS uniquement les constellations 4QAM et 16QAM fonctionnent correctement. L'augmentation de SNR ou de DC-Bias n'a aucune influence sur l'amélioration des performances du système pour les constellations d'ordre supérieur ( $\geq 64$ QAM).

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons évalué les performances d'un système DCO-OFDM pour les communications intérieures VLC. En premier lieu la chaîne de transmission (modulateur, démodulateur et canal) est implémentée sous MATLAB. Par la suite les performances BER en fonction de SNR de système DCO-OFDM avec l'effet de constellation et de DC-Bias dans un canal AWGN et un canal VLC-LOS sont évalués. On a trouvé que dans un canal AWGN les constellations d'ordre supérieur fonctionnent bien en augmentant le SNR et /ou le DC-Bias. Dans un canal VLC-LOS uniquement les constellations 4QAM et 16QAM fonctionnent correctement. On note dans le canal VLC-LOS c'est inutile d'augmenter le SNR ou le DC-Bias afin d'améliorer les performances du système avec pour les constellations d'ordre supérieur.

# *Conclusion Générales*

## *Conclusion Générale*

Le travail mené dans ce projet de fin d'étude est relatif aux études d'un système de communication VLC DCO-OFDM. Nous rappelons que Le DCO-OFDM «Direct Current biased Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing », Le système VLC utilise le système d'éclairage à LED (existant) pour le déploiement, tandis que la LED de lumière visible est modulée en intensité pour transmettre des informations de données à l'appareil par voie aérienne. Ces systèmes d'éclairage sont généralement conçus pour des services de grande surface et fournissent donc des connexions de données à plusieurs appareils. Dans cette zone. Le but de ce travail est de décrire différents systèmes VLC à grande vitesse (multi-porteuses), en particulier les systèmes DCO-OFDM

Dans le premier chapitre, nous allons dans le premier temps présenter un décrire comment le monde est arrivé aux communications optiques sans fil (OWC); le problème de la saturation du spectre, les motivation ; les applications et technologies envisagées pour les systèmes OWC etc.

Dans le deuxième chapitre, Dans ce chapitre, nous avons discuté de différentes architectures optiques OFDM. Une mention spéciale est faite à l'architecture IM/DD en raison de sa simplicité et de son faible coût en termes de construction et d'exploitation. Nous avons également introduit différentes modulations, telles que OOK, VPPM et les modulations CSK ultérieures propres à VLC. Ensuite nous verrons que le principe du multiplexage est la notion de transmission en OFDM. Nous avons parlé des systèmes VLC, tels que DCO-OFDM, ACO-OFDM, ADO-OFDM, Flip-OFDM, et nous avons fait une petite comparaison entre eux. Nous nous intéressons à la modélisation de l'émetteur et du récepteur DCO-OFDM et à la distribution géométrique interne du système VLC

Le troisième chapitre est consacré à la simulation d'un système DCO-OFDM proposé pour les communications VLC. En premier lieu, la chaîne de transmission sera implémentée en MATLAB. Par la suite les performances du système sont évaluées en fonction de l'ordre de constellation utilisée, le niveau de DC-Bias et le type du canal de transmission

On a trouvé que dans un canal AWGN les constellations d'ordre supérieur fonctionnent bien en augmentant le SNR et /ou le DC-Bias. Dans un canal VLC-LOS uniquement les constellations 4QAM et 16QAM fonctionnent correctement. On note dans le canal

VLC-LOS c'est inutile d'augmenter le SNR ou le DC-Bias afin d'améliorer les performances du système avec pour les constellations d'ordre supérieur.

# *Annexes*

# Annexes

## ANNEXE -A

### A.2 : Exemple 1 : MAIN\_1\_EFFET\_modulation\_7dB

```

%%
%% DC-BIAS OPTICAL ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (DCO-OFDM)
%%
clc; clear; close all
%%
%% SIMULATION PARAMETERS
P.NFFT      = 1024;          % FFT-SIZE
P.CP        = 0;           % LENGTH OF CP
P.SNR_dB    = 0:2:40;      % SNR VECTOR IN [dB]
P.NMCruns   = 5;          % NUMBER OF MONTE-CARLO RUNS
P.DC_Bias   = '7dB';      % DC-BIAS '7dB' OR '13dB'
%%
%%
PARAMETER   = [ 4 16 64 256 512 1024 2048];
P.MQAM      = PARAMETER(1); [BER(1,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(2); [BER(2,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(3); [BER(3,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(4); [BER(4,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(5); [BER(5,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(6); [BER(6,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(7); [BER(7,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
%%
%%
%% PLOT
COLORS(1,:) = [0.6350, 0.0780, 0.1840]; % RED
COLORS(2,:) = [0, 0.4470, 0.7410]; % BLUE
COLORS(3,:) = [0.4660, 0.6740, 0.1880]; % GREEN
COLORS(4,:) = [0.4940, 0.1840, 0.5560]; % MOVE
COLORS(5,:) = [0.8500, 0.3250, 0.0980]; % ORANGE
COLORS(6,:) = [0.3010, 0.7450, 0.9330]; % CYAN
COLORS(7,:) = [0.9290, 0.6940, 0.1250]; % YELLOW
COLORS(8,:) = [0.4940, 0.0780, 0.0980]; %
MARKERS(1)  = 's'; MARKERS(2)='o'; MARKERS(3)='<'; MARKERS(4)='d';
MARKERS(5)  = '<'; MARKERS(6)='s'; MARKERS(7)='.'; MARKERS(8)='*';
%%
%% BER
figure(1);
for i_p      = 1 : length(PARAMETER)
    MARKER    = [MARKERS(i_p) '-'];
    semilogy(P.SNR_dB,BER(i_p,:),MARKER, ...
        'linewidth', 2.5,...
        'color',COLORS(i_p,:),...
        'MarkerEdgeColor',COLORS(i_p,:),...
        'MarkerSize',10); hold on
end
xlabel('SNR','Interpreter','latex')
ylabel('BER','Interpreter','latex')
axis([P.SNR_dB(1) P.SNR_dB(end) 10^-4 10^0])
set(gca,'FontSize',12,'FontName','mwa_cm10');
legend('4QAM', '16QAM', '64QAM', '256QAM', '512QAM', '1024QAM', '2048QAM')
grid on;
%

```

## A.3 : Exemple 2 : MAIN\_2\_EFFET\_modulation\_13dB

```

%%
%% DC-BIAS OPTICAL ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (DCO-OFDM)
%%
clc; clear; close all
%%
%% SIMULATION PARAMETERS
P.NFFT      = 1024;          % FFT-SIZE
P.CP        = 0;           % LENGTH OF CP
P.SNR_dB    = 0:2:40;      % SNR VECTOR IN [dB]
P.NMCruns   = 5;          % NUMBER OF MONTE-CARLO RUNS
P.DC_Bias   = '13dB';     % DC-BIAS '7dB' OR '13dB'
%%
%%
PARAMETER   = [ 4 16 64 256 512 1024 2048];
P.MQAM      = PARAMETER(1); [BER(1,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(2); [BER(2,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(3); [BER(3,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(4); [BER(4,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(5); [BER(5,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(6); [BER(6,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
P.MQAM      = PARAMETER(7); [BER(7,:),~] = BER_DCO_OFDM(P);
%%
%%
%% PLOT
COLORS(1,:) = [0.6350, 0.0780, 0.1840]; % RED
COLORS(2,:) = [0, 0.4470, 0.7410]; % BLUE
COLORS(3,:) = [0.4660, 0.6740, 0.1880]; % GREEN
COLORS(4,:) = [0.4940, 0.1840, 0.5560]; % MOVE
COLORS(5,:) = [0.8500, 0.3250, 0.0980]; % ORANGE
COLORS(6,:) = [0.3010, 0.7450, 0.9330]; % CYAN
COLORS(7,:) = [0.9290, 0.6940, 0.1250]; % YELLOW
MARKERS(1)  = 's'; MARKERS(2)='o'; MARKERS(3)='<'; MARKERS(4)='d';
MARKERS(5)  = '<'; MARKERS(6)='s'; MARKERS(7)='.';
%%
%% BER
figure(1);
for i_p      = 1 : length(PARAMETER)
    MARKER    = [MARKERS(i_p) '-'];
    semilogy(P.SNR_dB,BER(i_p,:),MARKER, ...
        'linewidth', 2.5,...
        'color',COLORS(i_p,:),...
        'MarkerEdgeColor',COLORS(i_p,:),...
        'MarkerSize',10); hold on
end
xlabel('SNR','Interpreter','latex')
ylabel('BER','Interpreter','latex')
axis([P.SNR_dB(1) P.SNR_dB(end) 10^-4 10^0])
set(gca,'FontSize',12,'FontName','mwa_cmr10');
legend('4QAM' , '16QAM' , '64QAM' , '256QAM' , '512QAM' , '1024QAM' , '2048QAM')
grid on;
%
```

*Références*

*Bibliographiques*

**Références Bibliographiques**

- [I.1] El Pro Cus :«Different Types of Wireless Communication with Applications», Disponible sur : <https://www.elprocus.com/types-of-wireless-communication-applications> , 06 sept 2020.
- [I.2] L.Hanzo, Harald Haas, Sa'ndor Imre, Dominic O'Brien, Markus Rupp, Laszlo Gyongyosi :« Wireless myths, realities, and futures: from 3G/4G to optical and quantum wireless », Proceedings of the IEEE vol 100, May 13<sup>th</sup>,2012.
- [I.3] JOSEPH M. KAHN, JOHN R. BARRY : «Wireless Infrared Communications», PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 85, NO. 2, p 265-298,FEBRUARY 1997.
- [I.4] Mohammad Ali Khalighi, Murat Uysal : «Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective», IEEE COMMUNICATION SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 16, NO. 4, FOURTH QUARTER 2014.
- [I.5] Dilukshan Ajith Karunatilaka, Fahad Zafar, Vineetha Kalavally, Rajendran Parthiban :« LED based indoor visible light communications: State of the art», In: *IEEE communications surveys and tutorials* vol 17.No 3 ,pp.1649–1678, 2015.
- [I.6] Shuze Zhao, Jiale Xu, Olivier Trescases :«A dimmable LED driver for visible light communication (VLC) based on LLC resonant DC-DC converter operating in burst mode», In: Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC) , pp.2144–2150, 2013.
- [I.7] Mauro Biagi, Tarik Borogovac ,Thomas D.C.Little :«Adaptive Receiver For Indoor Visible Light Communications».In: *Journal of Lightwave Technology*,Vol.31.23 ,pp.3676–3686,2013.
- [I.8] C.W. Chow , C.H. Yeh , Y.F. Liu, P.Y. Huang , Y. Liu: «Adaptive scheme for maintaining the performance of the in-home white-LED visible light wireless communications using OFDM », In: *Journal Optics Communications* 292 , pp. 49–52, 2013.
- [I.9] Y.Wangetal.“Demonstration of 575-Mb/s down link and 225-Mb/s up link bi-directional SCM- WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED” .In: *Optics express* 21.1 ,pp.1203–1208,2013.
- [I.10] Bilal A.Ranjha : « OFDM Based RF and optical wireless systems»,The Pennsylvania State University, December 2014.
- [I.11] Aleksandar Jovicic, Junyi Li, Tom Richardson, Qualcomm Research: «Visible Light Communication: Opportunities, Challenges and the Path to Market»,In: *IEEE Communications Magazine* Vol.51,No.12,pp.26-32, December 2013.
- [I.12] Dominic C. O'Brien, Lubin Zeng, Hoa Le-Minh, Grahame Faulkner, Joachim W. Walewski, Sebastian Randel:« Visible Light Communications: challenges and possibilities », Article IEEE, pp.1-5, 2018.
- [I.13] Mostafa Zaman Chowdhury, Md. Tanvir Hossan, Amirul Islam, Yeong Min Jang : « A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications» ,In: *IEEE Access* , pp.1-21, Jan 2018.
- [I.14] C. Kachris,K.Bergman,andI.Tomkos. *Optical interconnectsforfuturedatacenternetworks*. Springer Science andBusinessMedia,2012.
- [I.15] M.UysalandH.Nouri.“Opticalwirelesscommunications – Anemergingtechnology”.In: *IC-TON* (2014), pp.1-7.
- [I.16] P.Toumieuxetal.“Opticalwirelessconnectedobjectsforhealthcare”.In: *Healthcaretechnology letters* 2.5 (2015),pp.118–122.
- [I.17] L.Chevalier,S.Sahuguede,andA.Julien-Vergonjanne.“Optical wireless link sasan alternative to radio-frequency for medical body area net works”.In: *IEEE JournalonSelectedAreasinCom- munications* 33.9 (2015),pp.2002–2010.

- [I.18] H. Haan, M. Gerken, and M. Tausendfreund. "Long range laser communication terminals: Technically interesting, commercially in calculable". In: *International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. IEEE, 2012, pp. 1-4.
- [I.19] T. Tolker-Nielsen and G. Oppenhauser. "In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX". In: *Free-Space Laser Communication Technologies XIV*. Vol. 4635. International Society for Optics and Photonics, 2002, pp. 1-16.
- [I.20] B. Smutny et al. "5.6 Gbps optical intersatellite communication link". In: *Free-Space Laser Communication Technologies XXI*. Vol. 7199. International Society for Optics and Photonics, 2009, p. 719906
- [I.21] M. Uysal, C. Capsoni, Z. Ghassemlooy, A. Boucouvalas, E. Udvary, "Optical Wireless Communication: An Emerging Technologie" Springer 2016 Page 10 **Communication de la Lumière Visible (VLC)**
- [I.22] S. Hranilovic, L. Lampe, S. Hosur and R. D. Roberts, "Visible light communications: the road to standardization and commercialization (Part 2) [Guest Editorial]," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 7, pp. 62-63, July 2014.
- [I.23] Source : <https://www.theengineer.co.uk>
- [I.24] A. C. Boucouvalas, P. Chatzimisios, Z. Ghassemlooy, M. Uysal and K. Yiannopoulos, "Standards for indoor Optical Wireless Communications," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 24-31, March 2015.
- [I.25] A. Belle et al., "Development of IEEE802.15.7 based ITS services using low cost embedded systems", in *Proc. 13th International Conference -ITS Telecommunications (ITST)*, 2013, vol. 5-7, pp. 419-425.
- [I.26] H. Chun et al., "LED Based Wavelength Division Multiplexed 10 Gb/s Visible Light Communications," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 13, pp. 3047-3052, July 1, 2016
- [I.27] Zunnan Liu et al., "Design and achievement of the visible light Audio communication system," 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, 2016, pp. 1770-1773.
- [I.28] B. Fahs, A. J. Chowdhury and M. M. Hella, "A 12-m 2.5-Gb/s Lighting Compatible Integrated Receiver for OOK Visible Light Communication Links," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 16, pp. 3768-3775, Aug. 15, 2016.
- [I.29] Wenbo Ding, Fang Yang, Hui Yang, Jintao Wang, Xiaofei Wang, Xun Zhang, Jian Song, "A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications", *Computers in Industry*, Volume 68, 2015, Pages 170-178, ISSN 0166-3615,
- [I.30] N. A. Abdulsalam et al., "Design and implementation of a vehicle to vehicle communication system using Li-Fi technology", in *Proc. International Conference on Information and Communication Technology Research (ICTRC2015)*, Abu Dhabi, 2015, pp. 136-139.
- [I.31] C. Premachandra et al., "Outdoor Road-to-Vehicle Visible Light Communication Using On-Vehicle High-Speed Camera", *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Springer US, pp. 1-9, 2014.
- [I.32] M. Y. Abualhoul, O. Shagdar and F. Nashashibi, "Visible Light inter-vehicle Communication for platooning of autonomous vehicles," 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Gothenburg, 2016, pp. 508-513.
- [I.33] S. J. Lee, J. K. Kwon, S. Y. Jung and Y. H. Kwon, "Simulation modeling of visible light communication channel for automotive applications," 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Anchorage, AK, 2012, pp. 463-468

- [I.34] Dang Quang Hien and Myungsik Yoo, "Handover in outdoor Visible Light Communication system," 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN), Da Nang, 2017, pp. 67-69.
- [I.35] Y. Wang, Xingxing Huang, Li Tao and Nan Chi, "1.8-Gb/s WDM visible light communication over 50-meter outdoor free space transmission employing CAP modulation and receiver diversity technology," 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Los Angeles, CA, 2015, pp. 1-3
- [I.36] P. Dietz, W. Yezazunis, and D. Leigh. Very low-cost sensing and communication using bidirectional leds. In UbiComp 2003: Ubiquitous Computing, pages 175{191. Springer, 2003
- [I.37] S. Schmid, G. Corbellini, S. Mangold and T. R. Gross, "An LED-to-LED Visible Light Communication system with software-based synchronization," 2012 IEEE Globecom Workshops, Anaheim, CA, 2012, pp. 1264-1268
- [I.38] PATRICE GEORGES MANGA :«ÉTUDE DE PERFORMANCE D'UNE LIAISON SANS FIL OFDM DANS UN CANAL COMPLEXE », MÉMOIRE, UNNERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TEMISCAMINGUE, OCTOBRE 2012.
- [I.39] CHERGUI Sofia, Mémoire de Master , :« Conception et réalisation d'un système de communication bureautique par lumière visible (Li-Fi) » , 6 juil2019.
- [I.40] Max Fréjus O. SANYA ,Thèse de Doctorat , :« Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans les métropoles de pays en développement : proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM», L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES ,22oct2015.