



République Algérienne Démocratique et
Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de
la Recherche scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Télécommunications

Spécialité: Systèmes de Télécommunications

Réalisé par :

AZIZI Haoua & BEN HAMDI Nada

Thème

Application de VLC-OFDM pour la technologie LIFI

Devant le jury composé de:

Dr. LAKHDAR Nacereddine

Dr. KHELIL Abdelatif

Dr. TOUHAMI Ridha

PROF

MCA

MAA

Président

Examineur

Rapporteur

Année Universitaire: 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DédicaCe

Cela me fait grand plaisir de dédier cet acte modeste : à la plus chère de
ma vie, **ma mère**.

A **mon père**, que Dieu lui fasse miséricorde.

A ma chère **sœur** et mes chers **frères**.

A mon cher fiancé, **FARES**.

A mes beaux amis **RABAB, SAFA** et **ICHRAK**.

A ma tante aimante et mon modèle de vie, **NACIRA**.

A ma chère binôme **NADA**

À tous **mes amis** de ma deuxième année de master en génie électrique, à
tous ceux qui ont une place dans mon cœur.

À toute ma famille et à tous ceux qui portent le nom d'**AZIZI** et **SAHRA**,
je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

Azizi Haoua

DédicaCe

Loué soit Dieu, qui nous a permis de faire cela, et à qui nous aurions atteint sans la grâce de Dieu sur nous. Après cela, je dédie cet humble travail à mon cher **père** et **mère**, que Dieu préserve eux pour moi, qui ont regardé et travaillé dur pour mon éducation

Et aux membres de **ma famille**, je suis mon soutien dans ce monde et je peux leur compter une faveur

A tous **mes proches** et à tous **mes amis** sans exception

A mes chers **professeurs** et à tous **les camarades** de classe

Toutes les sources de bonté, de joie et de sourire.

Ben Hamdi Nada

Remerciement

Nous remercions reviennent en premier lieu à **Allah**, le Tout Puissant, le Clairvoyant, pour tous ses indénombrables bienfaits; pour nous donner 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}

Nous tenons à remercier chacun **des membres** du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à nos recherches en acceptant d'examiner et de noter nos travaux.

Nous tenons également à exprimer notre sincère reconnaissance à notre tuteur de thèse, Dr **TOUHAMI Ridha** et au doyen du Collège de technologie, le Dr **CHEMSSA Ali**.

Ces remerciements seraient incomplets si nous ne parlions pas de toutes ces personnes qui ont été présentes par des conseils, par des encouragements ou encore par des invocations pour à nous voir réussir un jour. A toutes **nos familles**, à tous nos **mes amis**, merci.

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

Résumé

La communication par lumière visible (VLC) est une nouvelle technologie prometteuse dérivée du domaine de la communication optique sans fil (OWC) qui explore le spectre visible pour la transmission de données. Elle est apparue comme une solution pour les communications radio en raison de l'augmentation de la bande passante, du spectre visible non réglementé et de l'absence d'interférences électromagnétiques. Parallèlement, le multiplexage par répartition en fréquences orthogonales (OFDM) est utilisé dans les systèmes VLC pour sa capacité à transmettre avec des débits binaires élevés et une grande efficacité spectrale, en plus de réduire les interférences inter-symboles (ISI) et inter-porteuses (ICI).

Le but de ce projet, est d'appliquer de VLC-OFDM pour la technologie LIFI. Il s'agit d'un système de communication sans fil dans lequel la lumière est utilisée comme signal porteur au lieu des ondes traditionnelles comme dans le WiFi en étudiant l'OFDM et l'adaptation de cette modulation pour le système VLC de sorte qu'il utilise la modulation d'intensité/détection directe (IM/DD) combinée au signal OFDM qui module le courant des LEDs et des photodétecteurs par DC.

Mots clés: Li-Fi (Fidélité à la lumière), VLC (Communication par la lumière visible), LED (Diode électro-luminescente), OFDM (multiplexage par répartition en fréquences orthogonales).

Abstractk

Visible light communication (VLC) is a promising new technology derived from the field of optical wireless communication (OWC) that explores the visible spectrum for data transmission. It has emerged as a solution for radio communications due to the increased bandwidth, unregulated visible spectrum and lack of electromagnetic interference. At the same time, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is used in VLC systems for its ability to transmit with high bit rates and high spectral efficiency, in addition to reducing inter-symbol interference (ISI) and inter-carrier interference (ICI).

The aim of this project is to apply of VLC-OFDM for LIFI technology. It is a wireless communication system in which light is used as a carrier signal instead of traditional waves as in WiFi, studying OFDM and adapting this modulation for the VLC system so that it uses intensity modulation/direct detection (IM/DD) combined with the OFDM signal that modulates the current of the LEDs and the photo detectors by DC.

Keywords: Li-Fi (Light Fidelity), VLC (Visible Light Communication), LED (Light Emitting Diode), OFDM (orthogonal frequency division multiplexing).

ملخص

الاتصالات الضوئية المرئية (VLC) هي تقنية جديدة واعدة مشتقة من مجال الاتصالات اللاسلكية الضوئية (OWC) التي تستكشف الطيف المرئي لنقل البيانات. لقد ظهرت كحل للاتصالات اللاسلكية بسبب زيادة عرض النطاق الترددي والطيف المرئي غير المنظم ونقص التداخل الكهرومغناطيسي. في الوقت نفسه، يُستخدم تعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد (OFDM) في أنظمة VLC لقدرته على الإرسال بمعدلات بت عالية وكفاءة طيفية عالية، بالإضافة إلى تقليل التداخل بين الرموز (ISI) والتداخل بين الموجات الحاملة (ICI).

الهدف من هذا المشروع هو تطبيق VLC-OFDM لتقنية LiFi. إنه نظام اتصال لاسلكي يتم فيه استخدام الضوء كإشارة حاملة بدلاً من الموجات التقليدية كما هو الحال في WiFi ، ودراسة OFDM وتكييف هذا التعديل لنظام VLC بحيث يستخدم تعديل الكثافة / الكشف المباشر (IM / DD) جنباً إلى جنب مع إشارة OFDM التي تعدل تيار مصابيح LED وأجهزة الكشف الضوئية بواسطة التيار المستمر.

الكلمات المفتاحية : Li-Fi (دقة الضوء) ، VLC (اتصالات الضوء المرئي) ، LED (الصمام الثنائي الباعث للضوء) ، OFDM (مضاعفة تقسيم التردد المتعامد).

Sommaire

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
ملخص.....	iii
Sommaire.....	iv
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des abréviations	viii
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Modulation multiporteuses OFDM

I.1 Introduction	4
I.2 Histoire de l'OFDM	4
I.3 Définition de l'OFDM	8
I.4 Principe de l'OFDM	8
I.5 Modulation multiporteuse	9
I.5.1 Principe.....	9
I.5.2 Porteuses orthogonales.....	10
I.5.3 Intervalle de garde	10
I.5.4 Implantation numérique	11
I.6 Avantages et Inconvénient de l'OFDM	13
I.6.1 Les Avantages.....	14
I.6.2 Inconvénient de l'OFDM.....	14
I.7 Paramètres du système	14
I.7.1 Modulation.....	15
I.7.2 Point de fonctionnement	16
I.8 Application de l'OFDM	15
I.9 Conclusions	18

Chapitre II : Communications en lumière visible (VLC)

II.1 Introduction	21
II.2 Historique des communications par lumière visible	21
II.3 Définition de VLC	23
II.4 L'architecture d'un système VLC	23
II.4.1 L'émetteur VLC	25
II.4.2 Le récepteur VLC	25
II.4.3 Le canal VLC	26
II.5 Les modulations dans le domaine des VLC	26

II.5.1 La modulation OOK	28
II.5.2 La modulation VPPM	28
II.5.3 La modulation CSK	29
II.6 Avantages et inconvénients du VLC	29
II.6.1 Avantages VLC.....	31
II.6.2 Les points faibles de VLC.....	32
II.7 Applications du VLC	32
II.9 Conclusions	34
Chapitre III : Simulation et résultats	
III.1 Introduction	38
III.2 Description du système VLC basé sur l'OFDM	38
III.2.1 Direct-Current (DC) biased O-OFDM (DCO-OFDM)	40
III.3 La technologie Li-Fi	41
III.3.1 Définition de Li-Fi.....	42
III.3.2 Architecture d'un réseau Li-Fi.....	43
III.3.3 Différence entre LiFi et WiFi.....	43
III.4 Résultats de simulation et analyse	44
III.5 Conclusion	47
Conclusion générale	48
Bibliographies	49

Liste des figures

Figure I.1 : Concept du signal OFDM : (a) technique multi porteuse classique, et (b) technique de modulation multi porteuse orthogonale.....	6
Figure I.2 : Spectres de (a) un sous-canal OFDM, et (b) un signal OFDM.....	7
Figure I.3 : Interprétation temps-fréquence d'un signal OFDM.....	9
Figure I.4 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM.....	10
Figure I.5 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.....	11
Figure I.6 : Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM, décomposé sur chaque porteuse.....	12
Figure I.7 : Schéma de principe du modulateur OFDM numérique.....	13
Figure I.8 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM numérique.....	13
Figure II.1: Dispositifs d'émission et de réception du photophone.....	22
Figure II.2 : Spectre électromagnétique.....	24
Figure II.3: architecture d'un système VLC: a. Émetteur; b. Récepteur.....	24
Figure II.4 : Schéma de modulation OOK	28
Figure II.5 : Modulation VPPM.	29
Figure II.6 : Modulation CSK.	30
Figure II.7: utilisation de VLC pour l'internet sans fil (Li-Fi).....	35
Figure III.1 : Illustration du schéma fonctionnel du système de base OFDM-VLC.....	39
Figure III.2 : La structure du système DCO-OFDM.....	41
Figure III.3:Architecture d'un système Li-Fi.....	43
Figure III.4 : BER vs SNR pour différentes QAM pour un système DCO-OFDM basé sur le Li-Fi (N=128).....	45
Figure III.5 : BER vs SNR pour différentes QAM pour un système DCO-OFDM basé sur le Li-Fi (N=256).....	46
Figure III.6 : BER vs SNR pour différentes QAM pour un système DCO-OFDM basé sur le Li-Fi (N=512).....	46
Figure III.7 : CCDF du PAPR pour le signal DCO-OFDM avec ajout d'un biais DC (N=128).....	47
Figure III.8 : CCDF du PAPR pour le signal DCO-OFDM avec ajout d'un biais DC (N=256).....	47
Figure III.9 : CCDF du PAPR pour le signal DCO-OFDM avec ajout d'un biais DC (N=512).....	48

Liste des tableaux

Tableau I.1 : les paramètres et modes DAB.....	17
Tableau I.2 : les deux modes définis dans l'DVB-T.....	18
Tableau III.1 : Différence entre le Li-Fi et le Wi-Fi.....	43
Tableau III.2 : Paramètres de simulation.....	45

Liste des abréviations

4G: Quatrième Génération

A**CO:** Asymmetrically Clipped Optical

ADC: Analogue-to-Digital Converter

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line

AF: Amplitude Frequency

AM: Amplitude Modulation

AWGN: Additive White Gaussian Noise

B**ER:** Bit Error Rates

C**CDF:** Complementary Cumulative

Distribution Function

CSK: Color Shift Keying

D**AB:** Digital Audio Broadcasting

DAC: Digital-to-Analogue Converter

DC: Direct Courent

DCO-OFDM: Direct Current-biased Optical

DFS: Digital Financial Services

DFT: Discret Fourier Transform

DMT: Discrete Multi Tone

DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum

DVB: Digital Video Broadcasting

DVB-S: Digital Video Broadcasting –
Satellite

DVB-T: Terrestrial Digital Video
Broadcasting

E**MI:** Electro Magnetic Interférence

ETSI: European Telecommunications
Standards Institute

F**DM:** Frequency Division Multiplexing

FFT: Fast Fourier Transform

FM: Frequency Modulation

FOV: Field Of View

FPGA: Field Programmable Gate Array

G**PS:** Global Positioning System

GSM: Global System for Mobile
communication

H**I-FI:** High Fidelity

HDSL: High-Bit-Rate Digital Subscriber
Loop

HDTV: High-Definition Television

I**CI:** Inter-Carrier Interference

IEEE: Institute of Electrical and Electronics
Engineers

IFFT: Inverse Fast Fourier Transform

IM/DD: Intensity Modulation and Direct
Detection

IR: Infra Red

IRDA: Infra Red Data Association

ISI: Inter-Symbol Interference

ISM: Industrial, Scientific, Medical

L**AN:** Local Area Network

LCD: Liquid Crystal Display

LED: Light Emitting Diode

LI-FI: Light Fidelity

LOS: Line Of Sight

LTE: Long-Term Evolution

M**RF:** MAC Footer

O**-OFDM:** Optical-OFDM transmission
system

OFDM: Orthogonal Frequency Division
Multiplexing

OCC: Optical Camera Communication

OOK: On-Off Keying

OWC: Optical Wireless Communications

P**APR:** Peak-to-Average Power Ratio

PHY: Physical layer

PPM: Pulse Position Modulation

P/S: Parallel-to-Serial convert

PSK: Phase Shift Keying

PWM: Pulse Width Modulation

Q**AM:** Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadratur Phase Shift Keying

R**F:** Radio Frequency

RGP: Resources Global Professionals

RLL: Run Length Limited

RVP: Reid Vapor Pressure

S**C:** Suffixe Cyclique

SNR: Signal to Noise Ratio

S/P: Serial-to-Parallel converter

SSL: Solid State Lighting

T**FD:** Discrete Fourier Transformation

TIA: Trans Impedance Amplifier

V**DSL:** Very-High-Speed Digital

Subscriber Loop

VLC: Visible Light Communication

VLCC: Visible Light Communication
Consorsortium

VLSI: Very Large-Scale Integration

VPPM: Variable Pulse Position Modulation

W**DM:** Wavelength Division Multiplexing

WI-FI: Wireless Fidelity

WLAN: Wireless Local Area Network

WLL: Wireless Local Loop.

Introduction générale

La communication a été la clé du développement humain et constitue l'épine dorsale du monde moderne. Une communication moderne efficace et fiable exige des débits de données élevés. Il est donc nécessaire de trouver une technique de modulation capable de transmettre des débits de données élevés avec une grande efficacité spectrale. Le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) est une modulation multiporteuse prometteuse qui permet d'atteindre cet objectif en utilisant des sous-porteuses orthogonales superposées à un niveau de complexité acceptable et avec une précision raisonnable.

La technologie OFDM est utilisée dans la plupart des systèmes de communication filaires et sans fil nouveaux et émergents, mais n'a été appliquée que récemment aux communications optiques. Cette mémoire est orientée vers un nouveau sujet d'intérêt dans la communication optique sans fil (OWC) utilisant l'OFDM : la communication en lumière visible (VLC) qui émerge comme une technique prometteuse à la place, ou en complément, des systèmes de radiofréquence (RF).

Les communications par radiofréquence souffrent de la propagation par trajets multiples, ce qui réduit la disponibilité et les performances des liaisons. De plus, la contrainte d'encombrement du spectre radioélectrique fait que peu de canaux haute définition peuvent être utilisés dans une zone donnée. On estime qu'environ 70 % du trafic sans fil a lieu dans des environnements intérieurs, il faut donc envisager des alternatives aux systèmes de communication sans fil intérieurs.

L'une d'entre elles est le système VLC, qui exploite le spectre visible (390-700 nm) et qui, comparé aux communications RF, offre une bande passante plus large (de l'ordre du THz), un spectre sans licence, des interférences électromagnétiques inexistantes et une meilleure sécurité pour les systèmes intérieurs puisque la lumière est confinée à la dimension de la zone de couverture. En outre, le VLC est considéré comme une technologie verte puisque les LED sont des sources lumineuses à haut rendement énergétique et hautement contrôlables. De plus, il est possible de tirer parti des LED déjà mises en œuvre pour un double objectif d'éclairage et de communication de données. Comme les systèmes de communication modernes exigent des débits de données élevés, il faut envisager une technique de modulation capable de transmettre des débits de données élevés avec une efficacité spectrale élevée. L'OFDM est capable de transmettre des débits de données élevés sur des sous-porteuses orthogonales qui se chevauchent, ce qui permet d'obtenir une efficacité spectrale élevée avec précision et une complexité minimale, tout en réduisant les effets de la dispersion d'un canal tels que l'interférence inter-symbole (ISI) et l'interférence inter-porteuse (ICI).

Cependant, la mise en œuvre de l'OFDM dans le système VLC (c'est-à-dire l'Optical-OFDM) Pour atteindre des débits de données élevés pose plusieurs problèmes. Ces défis comprennent l'interférence inter-canaux (ICI), l'interférence inter-symboles (ISI) due à la propagation par trajets multiples, le PAPR élevé qui peut affecter les signaux OFDM optiques autant que les signaux RF-OFDM. Le PAPR élevé a été cité comme l'un des principaux inconvénients du format de modulation OFDM, le problème résidant dans la source optique à l'extrémité de l'émetteur, où le gain de la source optique saturera à la puissance d'entrée élevée.

Le Li-Fi est une technologie de communication sans fil, bidirectionnelle, à haut débit, qui utilise la partie visible du spectre électromagnétique. Tout comme le Wi-Fi, le Li-Fi permet par exemple à un appareil de se connecter à internet et implique donc un transfert de données. La différence entre ces deux technologies réside dans la façon de transmettre ses données. En effet, le Wi-Fi relie des appareils informatiques au sein d'un réseau par le biais d'ondes radios, contrairement au Li-Fi, qui, comme dit précédemment, remplit la même fonction à l'aide de la lumière visible : les données à transmettre sont codées sous forme de signal électrique et ensuite transmises en signal lumineux grâce à un circuit constitué d'une ou de plusieurs sources de lumières

Ce mémoire comprend trois chapitres, Dans le chapitre 1, on étudie les caractérisations du canal, les méthodes d'exécution du système OFDM, les avantages, les inconvénients et les applications.

Dans le chapitre 2, l'étude des propriétés d'un système VLC telles que l'émetteur récepteur et le canal optique est présentée. Cependant, comme toute technologie émergente, le VLC a aussi ses inconvénients, qui sont discutés et analysés, les applications possibles du VLC sont identifiées et débattues. Ce chapitre décrit également les efforts de recherche réalisés pour le développement du VLC.

Dans le chapitre 3, nous parlerons des techniques utilisées pour évaluer les performances système lifi. Sur la base des informations obtenues, nous simulerons sur MATLAB un canal de télécommunication utilisant LiFi basé sur le DCO-OFDM.

Enfin, nous résumerons toutes les connaissances acquises dans la conclusion finale concernant cette thèse.

Chapitre I

Modulation multiporteuses OFDM

I.1 Introduction

Avec le développement rapide des technologies de la communication, et la demande croissante d'envoi et de réception d'informations de toute nature, avec rapidité et haute précision, la nécessité de développer des méthodes de compression, de transmission, de réception et de traitement de l'information afin de couvrir tous les besoins croissants de temps en temps.

Dans ce chapitre, nous présentons le principe de base de la modulation multiporteuse OFDM, en plus de d'introduire avantages et inconvénient et paramètres du système, nous allons rappeler applications de l'OFDM, etc.

I.2 Histoire de l'OFDM

L'OFDM est un cas particulier de transmission multiporteuse, où un seul flux de données est transmis sur un certain nombre de sous-porteuses (SC) à plus faible débit. Il convient de mentionner ici que l'OFDM peut être considéré soit comme une technique de modulation, soit comme une technique de multiplexage. L'une des principales raisons d'utiliser l'OFDM est d'augmenter la robustesse contre les évanouissements sélectifs en fréquence ou les interférences à bande étroite. Dans un système à porteuse unique, un seul évanouissement ou un seul brouilleur peut entraîner la défaillance de toute la liaison, mais dans un système à porteuses multiples, seul un petit pourcentage des SC sera affecté. Le codage correcteur d'erreurs peut alors être utilisé pour corriger les quelques SC erronés. Le concept de transmission de données en parallèle et de multiplexage par répartition en fréquence (MRF) a été développé au milieu des années 1960 [1], [2]. Les premiers développements remontent aux années 1950 [3]. Un brevet américain a été déposé et délivré en janvier 1970 [4].

Dans un système classique de données parallèles, la bande de fréquence totale du signal est divisée en N sous-canaux de fréquence qui ne se chevauchent pas. Chaque sous-canal est modulé avec un symbole distinct, puis les N sous-canaux sont multiplexés en fréquence. Il semble bon d'éviter le chevauchement spectral des canaux pour éliminer les interférences entre canaux.

Cependant, cela conduit à une utilisation inefficace du spectre disponible. Pour faire face à cette inefficacité, les idées proposées au milieu des années 60 consistaient à utiliser des données parallèles et le FDM avec des sous-canaux se chevauchant, dans lesquels chacun, transportant un débit de signalisation b , est espacé de b en fréquence pour éviter l'utilisation d'une égalisation à haut débit et pour combattre le bruit impulsif et la distorsion par trajets multiples, ainsi que pour utiliser pleinement la bande passante disponible.

La figure I.1 illustre la différence entre la technique conventionnelle de multiporteuse sans chevauchement et la technique de modulation multiporteuse avec chevauchement. L'utilisation de la

technique de modulation multiporteuse avec chevauchement permet d'économiser près de 50% de la bande passante. Pour réaliser cette technique, nous devons toutefois réduire la diaphonie entre les SC, ce qui signifie que nous voulons une orthogonalité entre les différentes porteuses modulées.

Le mot "orthogonal" indique qu'il existe une relation mathématique précise entre les fréquences des porteuses dans le système. Dans un système MRF normal, de nombreuses porteuses sont espacées de telle sorte que les signaux peuvent être reçus à l'aide de filtres et de démodulateurs classiques. Dans ces récepteurs, des bandes de garde sont introduites entre les différentes porteuses et dans le domaine des fréquences, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité spectrale.

Il est toutefois possible de disposer les porteuses d'un signal OFDM de manière à ce que les bandes latérales des différentes porteuses se chevauchent et que les signaux soient toujours reçus sans interférence des porteuses adjacentes. Pour ce faire, les porteuses doivent être mathématiquement orthogonales. Le récepteur agit comme une banque de démodulateurs, traduisant chaque porteuse en courant continu, le signal résultant étant intégré sur une période de symbole pour récupérer les données brutes. Si les autres porteuses battent toutes les fréquences qui, dans le domaine temporel, ont un nombre entier de cycles dans la période de symbole T , alors le processus d'intégration aboutit à une contribution nulle de toutes ces autres porteuses. Ainsi, les porteuses sont modulation multi porteuse orthogonale.

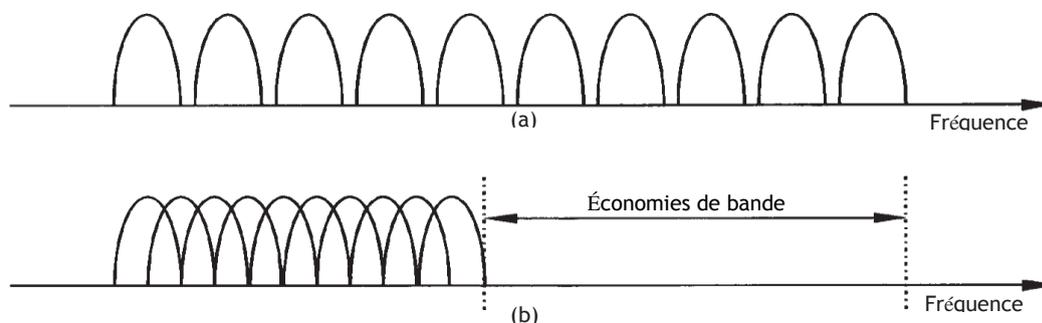


Figure I.1 : Concept du signal OFDM : (a) technique multi porteuse classique, et (b) technique de modulation multi porteuse orthogonale.

Linéairement indépendants (c'est-à-dire orthogonaux) si l'espacement des porteuses est un multiple de $1/T$.

Une grande partie de la recherche se concentre sur le schéma de transmission multi porteuse très efficace basé sur des porteuses à "fréquence orthogonale". En 1971, Weinstein et Ebert [5] ont appliqué la transformée de Fourier discrète (TFD) aux systèmes de transmission de données parallèles dans le cadre du processus de modulation et de démodulation. La figure I.2(a) montre le

spectre des données individuelles du sous-canal. Le signal OFDM, multiplexé dans les spectres individuels avec un espacement de fréquence b égal à la vitesse de transmission de chaque SC, est illustré à la figure I.2(b). La figure I.2 montre qu'à la fréquence centrale de chaque SC, il n'y a pas de diaphonie provenant des autres canaux. Par conséquent, si nous utilisons la TFD au niveau du récepteur et calculons les valeurs de corrélation avec la fréquence centrale de chaque SC, nous récupérerons les données transmises sans diaphonie. De plus, en utilisant la technique multiporteuse basée sur la DFT, le FDM n'est pas réalisé par un filtrage passe-bande mais par un traitement en bande de base.

De plus, pour éliminer les banques d'oscillateurs SC et les démodulateurs cohérents requis par le FDM, des implémentations entièrement numériques pourraient être construites autour d'un matériel spécialisé effectuant la transformée de Fourier rapide (FFT), qui est une implémentation efficace de la TFD. Les progrès récents de la technologie d'intégration à très grande échelle (VLSI) rendent les puces FFT rapides et de grandes tailles commercialement abordables. Avec cette méthode, l'émetteur et le récepteur sont mis en œuvre à l'aide de techniques FFT efficaces qui réduisent le nombre d'opérations de N^2 dans la DFT à $N \log N$ [6].

Dans les années 1960, la technique OFDM a été utilisée dans plusieurs systèmes militaires à haute fréquence tels que KINEPLEX [3], ANDEFT [7] et KATHRYN [8]. Par exemple, le modem de données à débit variable de KATHRYN a été construit pour la bande haute fréquence. Il utilisait jusqu'à 34 canaux parallèles à faible débit modulés en phase avec un espacement de 82 Hz.

Dans les années 80, l'OFDM a été étudié pour les modems à haut débit, les communications mobiles numériques et l'enregistrement à haute densité. L'un des systèmes a réalisé les techniques OFDM pour la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) multiplexée en utilisant la TFD [9] ; en outre, en utilisant une tonalité pilote, la porteuse stabilisatrice et le contrôle de la fréquence d'horloge et le codage en treillis ont également pu être mis en œuvre [10]. En outre, des modems à plusieurs vitesses modems à vitesse variable ont été développés pour les réseaux téléphoniques [11].

Dans les années 1990, l'OFDM a été exploité pour les communications de données à large bande sur les canaux FM de la radio mobile, les lignes d'abonné numériques à haut débit (HDSL ; 1,6 Mbps),

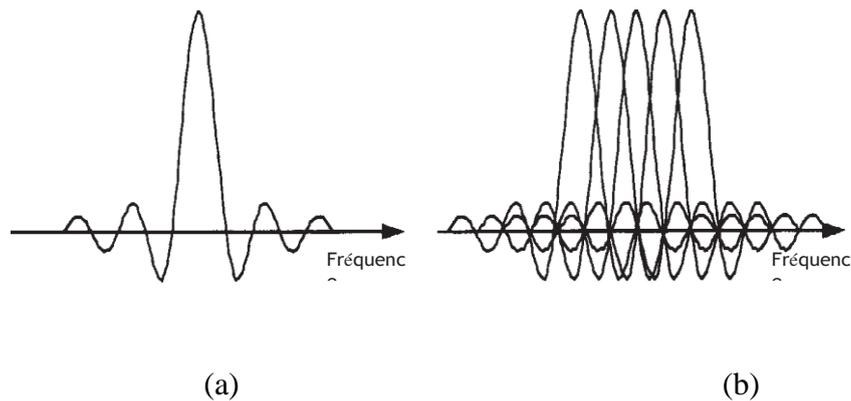


Figure I.2 : Spectres de (a) un sous-canal OFDM, et (b) un signal OFDM.

Lignes d'abonné numériques asymétriques (ADSL ; jusqu'à 6 Mbps), lignes d'abonné numériques à très haut débit (VDSL ; 100 Mbps), radiodiffusion audio numérique (DAB) et télédiffusion terrestre à haute définition (HDTV) [12-19].

Le schéma de transmission OFDM présente les principaux avantages suivants :

- L'OFDM est un moyen efficace de traiter les trajets multiples ; pour un étalement de retard donné, la complexité de mise en œuvre est nettement inférieure à celle d'un système à porteuse unique avec un égaliseur.

- Dans les canaux relativement lents à variation temporelle, il est possible d'améliorer sensiblement la capacité en adaptant le débit de données par SC en fonction du rapport signal/bruit (SNR) de ce SC particulier.

- L'OFDM est robuste contre les interférences à bande étroite car ces interférences ne touchent qu'un petit pourcentage des SC.

- L'OFDM rend possible les réseaux à fréquence unique, ce qui est particulièrement intéressant pour les applications de radiodiffusion.

D'un autre côté, l'OFDM présente également certains inconvénients par rapport à la modulation à porteuse unique :

- L'OFDM est plus sensible au décalage de fréquence et au bruit de phase.

- L'OFDM présente un rapport puissance de crête/puissance moyenne relativement important, ce qui tend à réduire le rendement énergétique de l'amplificateur de radiofréquence (RF).

I.3 Définition de l'OFDM

L'OFDM est un procédé de codage de signaux numériques par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous porteuses. L'OFDM transmet les données en utilisant un grand nombre de porteuses pour une bande étroite. L'espace de fréquence et de synchronisation de la porteuse est choisi de telle sorte que les porteuses sont orthogonales pour éviter les interférences. Pour l'implémentation de l'OFDM on utilise la FFT, qui est la base de cette technique [20].

La technique de l'OFDM permet de lutter contre les canaux sélectifs en fréquence en permettant une égalisation de faible complexité. Ces canaux se manifestent notamment en présence de trajets multiples et sont d'autant plus pénalisants que le débit de transmission est élevé. C'est la raison pour laquelle on trouve cette technique largement adoptée dans la plupart des applications à très haut débit.

I.4 Principe de l'OFDM

Le principe de l'OFDM est de transmettre les informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles, ainsi le spectre du signal présente une occupation optimale de la bande allouée [21]. Comme le montre la Figure I.3, l'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes du temps et des fréquences. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée. L'information à transmettre est répartie sur l'ensemble de ces porteuses, modulée chacune à faible débit par une modulation du type QPSK ou QAM. Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant t .

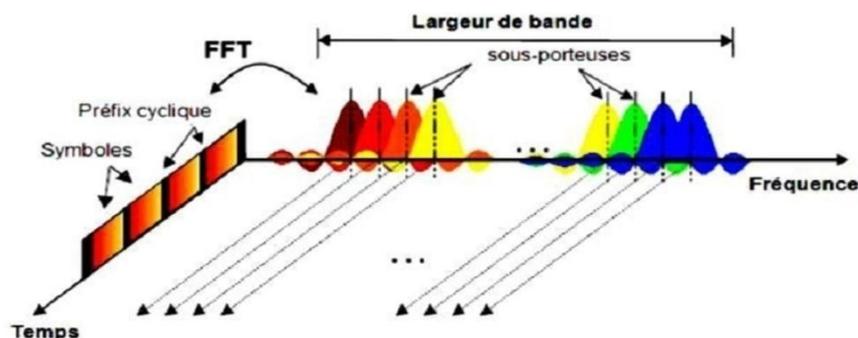


Figure I.3 : Interprétation temps-fréquence d'un signal OFDM.

La technique de transmission OFDM est basée sur l'émission simultanée sur n bandes de fréquence (situées entre 2 et 30 MHz) [22] de N porteuses sur chaque bande. Figure I.3.

Le signal est réparti sur les porteuses. Les fréquences de travail sont choisies en fonction des réglementations, les autres sont « éteintes » de manière logicielle. Le signal est émis à un niveau

assez élevé.

Pour pouvoir monter en débit, et injecté sur plusieurs fréquences à la fois. Si l'une d'elles est atténuée le signal passera quand même grâce à l'émission simultanée.

I.5 Modulation multiporteuse

I.5.1 Principe

Contrairement aux systèmes mono porteuses qui modulent sur une porteuse unique à un débit de R_s , le principe de la modulation multi porteuse de type OFDM consiste à transmettre les données de manière simultanée sur N porteuses modulées à un débit de $\frac{R_s}{N}$. Le débit global reste inchangé mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement des trajets sur le canal de propagation. La figure I.4 décrit le schéma de principe d'un modulateur OFDM en bande de base : après un codage Bit/Symboles des bits à transmettre, les symboles complexes $\{X_i\}_{i=1,2,\dots}$ sont successivement regroupés par blocs de N (conversion série/parallèle), mis en forme sur une durée T (forme d'onde $g(t)$) puis envoyés sur les N porteuses $\{f_n\}_{n=-N/2 \dots N/2-1}$ afin de former le signal de sortie. Durant l'intervalle du temps $[iT, (i+1) T [$, le signal OFDM généré s'écrit :

$$S_i(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} g(t - iT - T/2) e^{j2\pi f_n t} \quad (1.1)$$

Il représente le $i^{\text{ème}}$ symbole OFDM, tandis que les $\{X_{i,n}\}_{n=-N/2 \dots N/2-1}$ représentent les N symboles complexes $\{X_i\}$ qu'il transporte. Le signal reçu s'écrit de façon suivante :

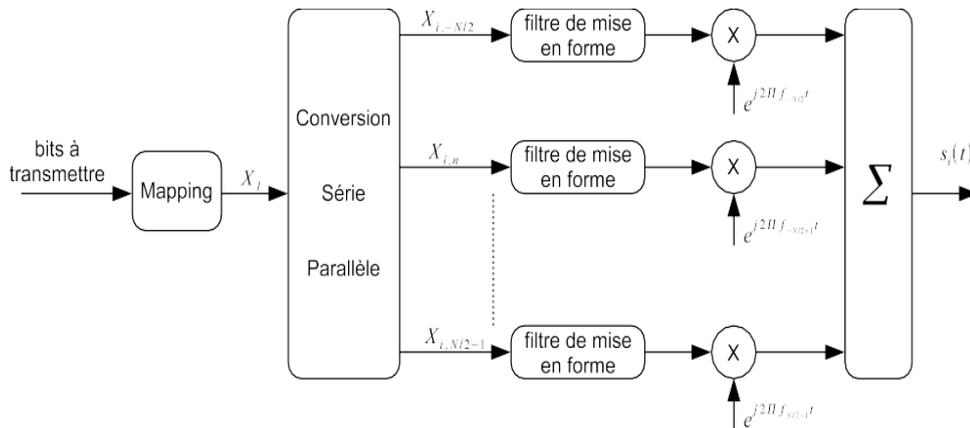


Figure I.4 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM.

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} g(t - iT - T/2) e^{j2\pi f_n t} + n_n(t) \quad (1.2)$$

Où $n_n(t)$ est le bruit blanc additif gaussien introduit par le canal sur la $n^{\text{ème}}$ porteuse. Les symboles transmis peuvent être retrouvés en réception à l'aide d'un filtre adapté suivi d'un échantillonneur. La figure I.5 illustre le schéma de principe d'un démodulateur OFDM.

I.5.2 Porteuses orthogonales

Nous définissons l'efficacité spectrale comme étant le débit binaire transmis par unité de fréquence. Dans une transmission de type OFDM, le choix de l'écartement entre les porteuses va influencer sur cette efficacité spectrale.

Plus l'espacement entre porteuses est grand, plus nous avons besoin de bande passante pour transmettre un même débit, plus l'efficacité spectrale diminue.

Pour garantir une efficacité spectrale optimale, il faut que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles, tout en garantissant une absence d'interférence entre les informations qu'elles transportent afin que le récepteur soit capable de les retrouver.

Cette condition est vérifiée:

- dans le domaine temporel si les fonctions $\Psi_{i,n}(t) = g(t - iT - T/2) e^{j2\pi f_n t}$ sont orthogonales.
- dans le domaine fréquentiel si le spectre de chaque porteuse est nul aux fréquences des autres porteuses. Ce spectre dépend de $G(f) = \text{TF}[g(t)]$.

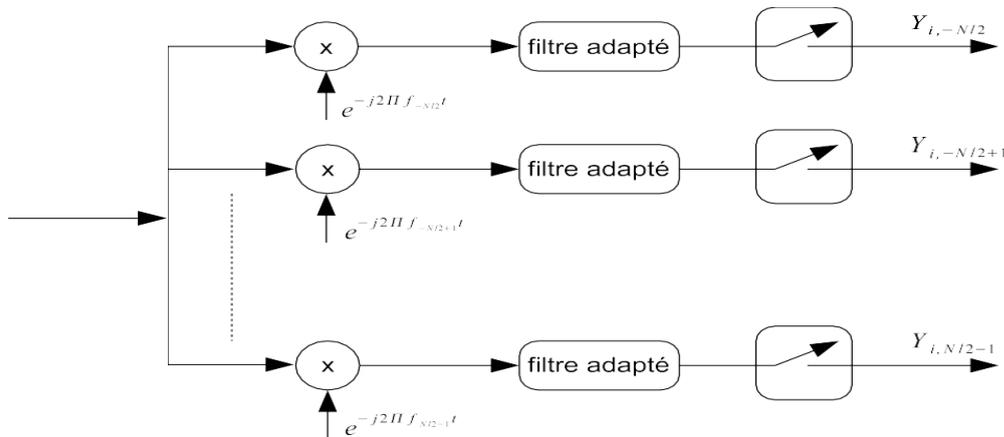


Figure I.5 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.

On parle de condition d'orthogonalité des porteuses.

L'orthogonalité temporelle des fonctions $\Psi_{i,n}(t)$ est indispensable dans la mise en œuvre d'un signal OFDM.

En 1966, les travaux de R. W. [23] ont permis de démontrer que l'orthogonalité des fonctions $\Psi_{i,n}(t)$ se traduit par des conditions sur le module et la phase de $g(t)$. Parmi les fonctions disponibles, celle qui est la plus utilisée est la fonction porte : $g(t) = \text{Rect}_{[0,T]}$. Supposons que les symboles émis sont de moyenne nulle et de variance σ^2 , le spectre du signal modulé sur la porteuse

n s'écrit de la façon suivante:

$$S_n(f) = \frac{\sigma^2}{T} \text{sinc}^2[\pi(f - f_n)T] \quad (1.3)$$

Ce spectre s'annule aux fréquences $\{f = f_n + k/T\}$ pour tout entier k. $1/T$ est donc l'espacement interporteuse minimal qui garantit à la fois l'orthogonalité entre les porteuses et une efficacité spectrale optimale.

Les spectres des différentes porteuses sont présentés sur la figure I.6. Le spectre d'un signal OFDM est la somme de tous ces spectres.

Notons que lorsque la mise en forme est une fonction rectangulaire de longueur T, les filtres adaptés en réception sont des intégrateurs sur la durée T.

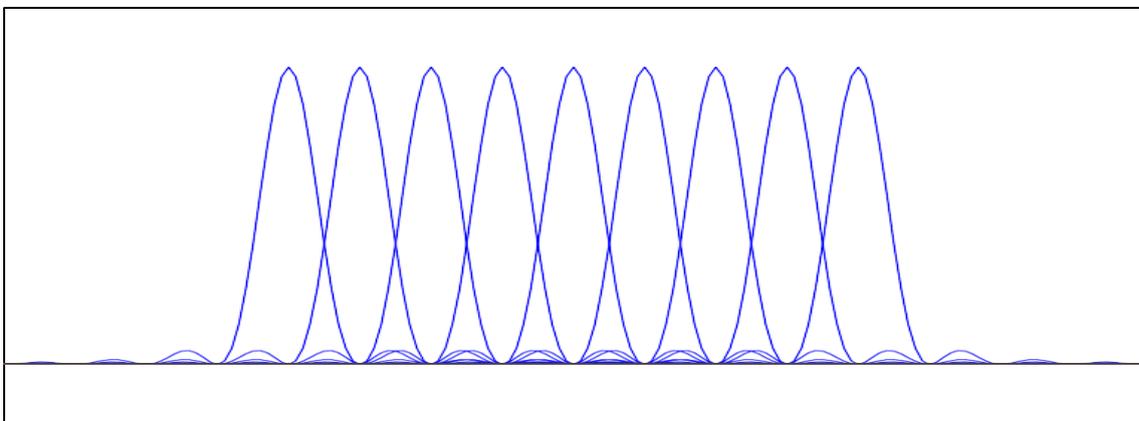


Figure I.6 : Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM, décomposé sur chaque porteuse.

I.5.3 Intervalle de garde

L'intervalle de garde, délai introduit entre la transmission de deux symboles OFDM consécutifs, est utilisé dans les systèmes terrestres afin d'absorber l'étalement des retards dus aux multi trajets. A des fins de synchronisation plus simples, on place dans cet intervalle de garde une copie de la fin du symbole OFDM à transmettre. On le nomme alors le préfixe cyclique.

Du fait du canal gaussien caractérisant une transmission fixe par satellite, l'intervalle de garde ne servira qu'à effectuer l'opération de synchronisation. SA longueur peut alors être beaucoup plus faible que dans les systèmes terrestres et doit être optimisée dans le but d'améliorer l'efficacité spectrale du système étudié par rapport aux systèmes monoporteuses.

L'optimisation de la taille de l'intervalle de garde conduisant à la comparaison de performances en termes d'efficacité spectrale entre les systèmes multiporteuse.

I.5.4 Implantation numérique

La réalisation analogique d'un modulateur OFDM est très complexe car il faut utiliser un banc de modulateurs/démodulateurs synchronisés et un banc de filtres de mise en forme/filtres adaptés avec un grand nombre de voies. C'est la raison pour laquelle l'OFDM a été proposée pour la première fois dans les années 50 mais très peu utilisée par la suite. Avec les progrès dans les domaines du traitement numérique du signal, ce problème s'est simplifié conduisant à une explosion de l'utilisation de cette technique.

En effet, lorsque les porteuses sont orthogonales et que : $f_n = n/T$ pour $n = -N/2 \dots N/2 - 1$, le signal généré en bande de base dans l'intervalle de temps $[iT, (i+1)T]$ peut s'écrire de la façon suivante :

$$S_i(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} e^{j2\pi \frac{nt}{T}} \quad (1.4)$$

En le discrétisant, nous obtenons :

$$S_i(k) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} e^{j2\pi \frac{nk}{N}}, \quad k = -N/2 \dots N/2 - 1 \quad (1.5)$$

$\{S_i(k)\}_{k=-N/2 \dots N/2-1}$ correspond aux N échantillons du $i^{\text{ème}}$ symbole OFDM. Nous les noterons $\{S_{i,k}\}_{k=-N/2 \dots N/2-1}$. Ils peuvent être obtenus grâce à une transformée de Fourier discrète inverse des symboles $\{X_{i,n}\}_{n=-N/2 \dots N/2-1}$ à transmettre. En choisissant $N=2^m$, l'algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier inverse (iFFT) peut être utilisé. Le schéma numérique d'un modulateur OFDM est alors décrit par la figure I.7.

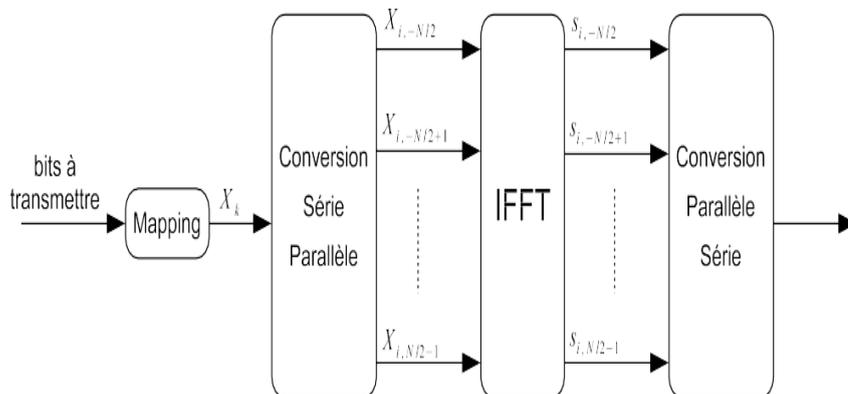


Figure I.7 : Schéma de principe du modulateur OFDM numérique.

A la réception, la procédure inverse est appliquée. La démodulation consiste à effectuer une transformée de Fourier discrète directe des symboles reçus. Ceci peut être réalisé à l'aide de l'algorithme de la FFT. La figure I.8 décrit le schéma d'un démodulateur OFDM numérique. Nous notons $\{Y_{i,n}\}_{n=-N/2 \dots N/2-1}$ les symboles reçus après la FFT du récepteur, correspondant aux symboles émis $\{X_{i,n}\}_{n=-N/2 \dots N/2-1}$ placés avant l'iFFT de l'émetteur.

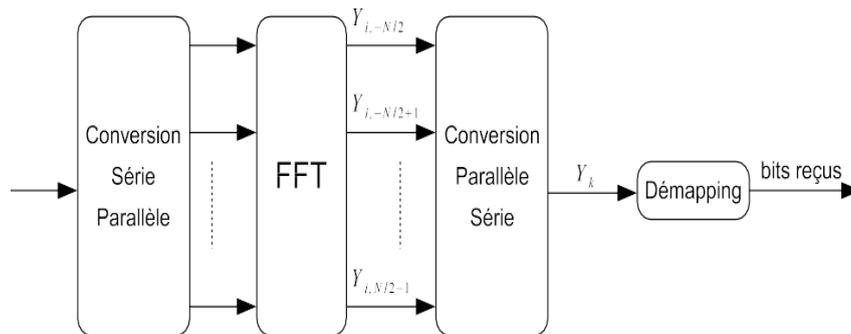


Figure I.8 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM numérique.

I.6 Avantages et Inconvénient de l'OFDM [24]

I.6.1 Les Avantages

Un des grands avantages des schémas de transmission OFDM est d'avoir partagé la complexité de l'égalisation entre l'émetteur et le récepteur, contrairement aux schémas de transmissions mono-porteuses. Ceci permet d'avoir des récepteurs simples et peu coûteux.

Les avantages des différentes variantes de l'OFDM sont nombreux :

- Une utilisation efficace des ressources fréquentielles en comparaison avec les solutions classiques de multiplexage fréquentiel. Ceci est dû au fait que dans l'OFDM, les canaux se chevauchent tout en gardant une orthogonalité parfaite.
- Une égalisation numérique et un décodage simple et optimal grâce à l'utilisation de l'intervalle de garde (au prix d'une diminution du débit) et de l'algorithme de Viterbi. De plus, l'utilisation de différents systèmes de codage comme les codes convolutifs et les codes en blocs (Reed- Salomon) s'avère très efficace.
- Les techniques multi-porteuses sont robustes au bruit impulsif puisque chaque porteuse est affectée d'un bruit indépendant des autres porteuses. Contrairement aux modulations monoporteuses ou le bruit peut affecter un certain nombre de symboles transmis, la perte d'un symbole dû à un bruit important n'affectent pas les autres symboles.
- Les techniques OFDM ont également une très grande flexibilité dans l'allocation de bit/débit dans des contextes multi-utilisateurs. En effet, en fonction de la valeur du gain instantané du canal, chaque porteuse peut-être codée indépendamment des autres porteuses. Il est alors possible d'implémenter la méthode de 'water pouring' lorsque le canal est connu à l'émission.
- Enfin, il est à noter que l'estimation du canal dans le contexte OFDM est facilitée par l'envoi de séquences d'apprentissage dans le domaine fréquentiel. L'identification des coefficients du canal se fait sans inversion de systèmes d'équations.

I.6.2 Inconvénient de l'OFDM

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Après transformée de Fourier inverse discrète du bloc de symbole fréquentiel, l'OFDM peut engendrer des symboles temporels à forte amplitude en comparaison avec des techniques mono-porteuses (pour lesquelles les constellations sont émises directement). Ceci crée des contraintes énormes sur les amplificateurs et conduit à une consommation de puissance importante. A titre d'exemple, si le vecteur de symboles fréquentiel $[1, 1, 1, \dots, 1]$ est émis, le signal temporel $[N, 0, 0, \dots, 0]$ est alors obtenu. La première composante du bloc de symbole temporel émis possède alors une très forte amplitude. Afin d'éviter le seuillage (appelé aussi clipping) du signal qui détruit l'orthogonalité des porteuses et par conséquent dégrade les performances du système, il est obligatoire d'utiliser des amplificateurs linéaires au prix d'un accroissement du prix des émetteurs. Actuellement, les techniques de transmission s'attachent plus à la réduction de l'amplitude du signal appelé également PAPR (Peak to Average Power Ratio). En pratique, la plupart des méthodes de réduction de PAPR sont basées sur des modifications du signal émis à l'aide d'un vecteur de correction. Le vecteur de correction est ajouté aux symboles fréquentiels créant une nouvelle constellation avec de meilleures propriétés. Ceci induit un accroissement de complexité non-négligeable au niveau de l'émetteur.
 - L'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de décalage en fréquence et de synchronisation. Dans le premier cas, le frequency off-set engendre de l'interférence entre porteuses qui peut détruire l'orthogonalité des porteuses. Dans le second cas, les erreurs de synchronisation induisent un déphasage sur les symboles reçus. Les techniques mono-porteuses de compensations sont mal adaptés aux techniques multi-porteuses et de nouvelles approches sont à l'étude. Dans les nouveaux standards, les débits plus élevés accentuent ces difficultés.
 - Il est à noter que le modèle OFDM précédent ne s'applique pas quand le préfixe cyclique est plus petit que la longueur du canal. Dans ce cas, un symbole émis sur une porteuse pourra interférer avec les symboles de porteuses adjacentes. Une solution (déjà utilisée dans le contexte ADSL) est de réduire la longueur du canal à l'aide d'un pénaliser.

I.7 Paramètres du système

I.7.1 Modulation

En monoporteuse dans une transmission par satellite, les modulations de type PSK sont préférées aux modulations de type QAM car elles ne provoquent pas de fluctuation d'enveloppe du signal.

En multiporteuse, le problème de la fluctuation d'enveloppe est toujours présent après l'opération de la FFT quelle que soit la modulation utilisée. De ce fait et étant donné que l'efficacité en puissance d'une modulation M-QAM est plus grande que celle d'une modulation PSK, nous utiliserons des porteuses modulées en QAM dans la transmission OFDM par satellite considérée.

Nous considérons plus particulièrement dans cette étude deux types de modulations, QPSK et 16QAM, pour l'évaluation des performances du système proposé.

I.7.2 Point de fonctionnement

Les performances du système sont évaluées dans cette étude hors codage canal. Nous considérons les points de fonctionnement les plus faibles associés à ces modulations avant codage dans les standards DVB-S et DVB-S2 [25], [26], [27].

Les rapports signal sur bruit par bit, E_b/N_0 , considéré à l'entrée du récepteur, sont alors autour de 0 dB pour la modulation QPSK et de 6 dB pour la modulation 16-QAM.

I.8 Application de l'OFDM [28] [29]

- **ADSL:**

La modulation OFDM est utilisée pour fournir des données à grande vitesse de connectivité à travers la norme câblage de cuivre qui va à chaque téléphone dans chaque maison. Si le câble téléphonique était traditionnellement utilisé pour des connexions vocales, l'ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) est un autre service prêt à utiliser. Le plus grand avantage pour l'ADSL est plus de l'infrastructure est déjà en place, offrant ainsi un énorme coût économie dans la fourniture du produit. Avec l'ADSL, les vitesses de transmission varient en fonction du type de la circulation. Les vitesses plus rapides sont utilisés pour la circulation descendante, tout en vitesse lente sont utilisés pour la voie montante du trafic. Les services traditionnels de la ligne sont encore conservés et les nouveaux ADSL services ne font pas obstacle à ce service.

Il existe de nombreuses variantes allant de l'ADSL : de la norme ADSL à ADSL4 qui peut fournir des vitesses allant jusqu'à 52 Mbit/s dans une bande passante de 3,75 MHz.

Pour la norme ADSL, le spectre est divisé en différentes sections. Le spectre d'origine (0 à 4 KHz) est réservé pour la demande vocale alors que le spectre au-dessus de cette fréquence est utilisé pour les données. Le signal est divisé en 255 Sous-porteuses. Ils sont espacés de 4.3125 KHz. Le spectre des fréquences d'une ligne de cuivre utilisée pour l'ADSL est de DC à 1.104 MHz.

Les 4 premiers KHz sont réservés aux appels vocaux, suivie par une bande de garde non utilisés

de 4 KHz à 25 KHz. Ce spectre se compose de 7 Sous-porteuses qui sont handicapés. Le spectre de 25 KHz à 138 KHz est utilisé pour la voie montante et se compose de 24 Sous-porteuses. Le spectre ci-après, de 138 KHz à 1104 KHz, est utilisé pour la descendante et comprend de 224 Sous-porteuses. Plus de Sous-porteuses sont réservés pour le trafic descendant de la circulation comme l'expérience la montrée qu'il existe une plus grande quantité de trafic descendant que le trafic en liaison montante.

Chaque Sous-porteuses est continuellement surveillée et lorsque le rapport signal / bruit inférieur de 6 dB, la boîte est bloqué. Cela permet d'assurer l'utilisation la plus efficace de la connexion à tout moment.

- **DAB (Digital Audio Broadcasting):**

Les progrès de la haute fidélité (hi-fi) des techniques d'enregistrement numérique déclenche une révolution numérique à la fin des années 1980 en technologie de radiodiffusion sonore. Les hi-fi sources sonores ne sont pas seulement appropriés pour l'intérieur mais aussi à une utilisation extérieure, et ils ont donné lieu à l'obligation pour la réception mobile des signaux audio numérique.

Cette exigence, qui était jugé impossible au début Des années 1980 en raison des multiples problèmes, a été soudainement remplies par l'utilisation de OFDM Digital Audio Broadcasting (DAB) a été spécifiée entre 1988 et 1992, avec son introduction en Europe prévue pour la fin des années 1990. Plusieurs DAB essais sur le terrain ont été effectuées par des organismes de radiodiffusion en Europe, En plus, un grand nombre de mesures DAB ont également été menées, pour le champ électromagnétique, le canal de réponse Impulsionnelle, invulnérabilité contre cochannel ingérence, d'erreur sur les bits taux, et ainsi de suite. Le tableau suivant montre trois modes de DAB.

Tableau I.1 : les paramètres et modes DAB [28]

paramètres de Mode	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Bande passante	1.536 MHz	1.536 MHz	1.536 MHz
Nombre de sous porteuses	1,546	768	384
Modulation		DQPSK	

Longue de symbole utilisé (T_s)	1 ms	250 ms	125 ms
Séparation entre sous porteuses (Δf)	3.968 kHz	1.984 kHz	0.992 kHz
intervalle de Gard (ΔG)	$T_s/4$ (250 ms)	$T_s/4$ (62.5 ms)	$T_s/4$ (31.25 ms)
taux de transmission d'information		2.4 Mbps	

- **DVB-T (Terrestrial Digital Video Broadcasting):**

En Europe, est basé sur les résultats positifs de la DAB et des essais sur le terrain, Terrestres de radiodiffusion télévisuelle numérique (DVB-T), avec l'utilisation de OFDM, a été normalisée par l'(ETSI) Européen Télécommunications Standards Institut en 1996. Les deux modes définis dans l'DVB-T.

Tableau I.2 : les deux modes définis dans l'DVB-T [28]

paramètres de Mode	2k	8k
Bande passante	7.61 MHz	7.61 MHz
Nombre de sous porteuses Modulation	1,705 QPSK	6,817 64 QAM
Longue de symbole utilisé (T_s)	224 m s	896 m s
séparation entre sous porteuses (Δf)	4.464 kHz	1.116 kHz
intervalle de Gard (ΔG)	$T_s/4, T_s/8, T_s/16,$ $T_s/32$	$T_s/4, T_s/8, T_s/16, T_s/32$ 4.98–
taux de transmission d'information	4.98–31.67 Mbps	31.67 Mbps

- **IEEE 802.11g:**

La norme IEEE 802.11b peut transmettre de 11 Mbit / s de données dans une bande de 2.4-GHz qui est aussi appelée 'industriel, scientifique, et médicaux (ISM) bande. Extensions jusqu'à 56 Mbit / s de transmission de données dans la bande ISM IEEE 802.11g.

La norme IEEE 802.11g a été développée en Juillet 2002, L'utilisation de OFDM est déjà décidée, et même comme l'IEEE 802.11a est susceptible d'être utilisé.

- **IEEE 802.11h :**

En Europe, (5.15 à 5.35 GHz) et (5,45 à 5.725 GHz) pour un total de 455 MHz de bande passante peut être attribué pour HIPERLANs, mais certains groupes aux entreprises de transport de contrôle de puissance (PTC) et la sélection dynamique des fréquences (DFS) à coexister avec les systèmes radar.

Par conséquent, l'IEEE 802.11a n'est pas directement applicable. Pour faire une IEEE 802.11a-LAN système sans fil disponible en Europe, la normalisation IEEE 802,11 groupe discute d'un nouveau standard IEEE 802.11h, qui est une extension de l'IEEE 802.11a avec PTC et les espaces DFS.

I.9 Conclusions

Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM) a acquis une présence significative sur le marché du sans fil, et la combinaison d'une capacité de données élevée avec une efficacité spectrale élevée et une flexibilité pour les interférences en raison des effets multi-trajets signifie qu'il est idéal pour les applications à données élevées devenir un facteur majeur dans le paysage des télécommunications d'aujourd'hui.

Chapitre II

Communications en lumière visible (VLC)

II.1 Introduction

Ces dernières années, la société moderne a manifesté un intérêt croissant pour les technologies de communication sans fil et la demande de transfert de données sans fil devrait augmenter de façon exponentielle au cours des cinq prochaines années [30]. La solution à cette demande sans précédent a été, dans la plupart des cas, satisfaite par les communications de type radiofréquence (RF1). En raison de leur niveau de maturité et de leur large acceptation, les communications RF constituent à l'heure actuelle la meilleure solution pour les communications sans fil.

Parallèlement, le développement des dispositifs d'éclairage à l'état solide (SSL), en particulier des diodes électroluminescentes (LED), a connu une croissance considérable.

Dans ce chapitre, la définition et les modulations dans le domaine des communications par lumière visible sont présentées. Le principe de fonctionnement de cette technologie et l'architecture nécessaire à une telle communication sont également détaillés, et des domaines d'application possibles.

II.2 Historique des communications par lumière visible

Communiquer par optique fût l'un des premiers moyens de communication utilisé par l'être humain. On peut prendre pour exemple les signaux lumineux envoyés entre deux bateaux ou encore les signaux de fumées des peuples indiens d'Amérique. Très rudimentaires par leur aspect, ces techniques permettaient néanmoins de transmettre de manière rapide et efficace des informations essentielles.

Au début des années 1800, l'héliographe, un télégraphe solaire sans fil basé sur des éclairs réfléchis en code morse, a été mis au point par l'armée américaine. Ce dispositif permettait grâce à un miroir de renvoyer la lumière du soleil dans une direction pour communiquer en code morse. [31]

Ce n'est qu'en 1880, année de l'invention du photophone d'Alexander Graham Bell (figure II.1), que le premier véritable dispositif de communication par optique sans fil ait pu voir le jour. [32] Le photophone permettait de transmettre le son de la voix par communication lumineuse sans fil. Grâce à un miroir, la lumière du soleil est redirigée d'un point à un autre. Ce miroir est déformable. Les ondes sonores de la voix sont envoyées sur ce miroir, qui est alors déformé. La lumière du soleil renvoyée par le miroir est donc modulée. Une parabole est utilisée en réception. Elle est couplée à un dispositif permettant de convertir l'information lumineuse en électricité puis d'amplifier le signal. Le signal sert ensuite à émettre le son vers l'utilisateur. Bien que le photophone soit resté au stade de prototype fonctionnel, cette invention est la première utilisation complexe de la communication sans fil par lumière visible. [37]

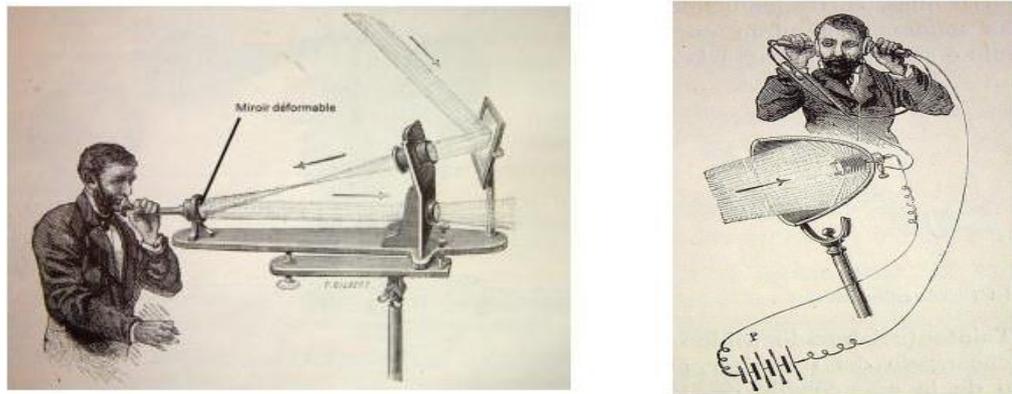


Figure II.1: Dispositifs d'émission et de réception du photophone. [37]

Malgré des premiers résultats prometteurs, l'appareil fût très vite concurrencé par l'invention du télégraphe en 1894 par Guglielmo Marconi. Cette technologie permettait de couvrir de plus grandes distances. Le photophone fût par la suite délaissé au profit du développement d'appareils utilisant les radiofréquences (RF).

Il faut attendre les années 60 avec l'invention des premières diodes électroluminescentes LED, et des dispositifs laser pour voir ressurgir cette technologie. De nombreuses expérimentations se sont déroulées jusque vers les années 70 correspondant au développement des fibres optiques qui supplantent alors l'optique sans fil pour les transmissions longues distances. [36]

En 1979, F. R. Gfeller et G. Bapst ont démontré la faisabilité technique de la communication optique sans fil en intérieur, utilisant des LEDs à infrarouge.

À mesure que l'industrie de l'éclairage à LED progressait, la caractéristique de commutation rapide des LEDs à lumière visible incitait des recherches actives sur le VLC à haute vitesse. Un concept a d'abord été proposé par Pang et al. en 1999, en utilisant le feu tricolore LED comme émetteur de signal optique. Par la suite, S. Haruyama et M. Nakagawa ont mené une série d'études fondamentales à l'Université Keio au Japon. Ils ont étudié la possibilité de fournir un éclairage et une communication simultanés à l'aide de LEDs blanches Pour les systèmes VLC. Ils ont non seulement examiné et analysé les effets de la réflexion de la lumière et de l'ombrage sur les performances du système, mais ils ont également exploré les applications VLC à des vitesses relativement faibles. [38]

En 2004, les premières démonstrations de communication à haut débit à l'aide de diodes LEDs ont été effectuées au Japon au moyen de photodiodes. Grâce à la multiplication des téléphones cellulaires équipés de caméras, ces dispositifs ont pu être utilisés comme récepteurs VLC. Des chercheurs ont commencé à utiliser des écrans à affichage de cristaux liquides (LCD, Liquid Crystal Display) et d'autres éléments d'affichage en tant qu'émetteurs. Le Visible Light Communications

Consortium (VLCC) du Japon a été l'un des premiers organismes de normalisation à mener des travaux sur une norme relative aux communications VLC. En 2008, cet organisme a élargi la portée de la norme élaborée par l'Association sur les données infrarouge (IrDA, Infrared Data Association) pour les communications infrarouges, de façon à y inclure le spectre de la lumière visible. [34]

II.3 Définition de VLC

La communication par lumière visible (VLC) est une technologie de communication sans fil émergente qui utilise la lumière visible non seulement pour l'éclairage ou la signalisation, mais aussi comme support pour la transmission numérique. Fondamentalement, est un sous-ensemble des communications sans fil optique (OWC, Optical Wireless Communications). Les longueurs d'onde des communications OWC comprennent la lumière infrarouge, visible et ultraviolette, tandis que les communications VLC concernent uniquement la partie visible du spectre de longueurs d'onde comprises entre 380 et 750 nm [34], correspondant à un spectre de fréquences de 430 THz à 790 THz [33], comme illustré à la figure II.2.

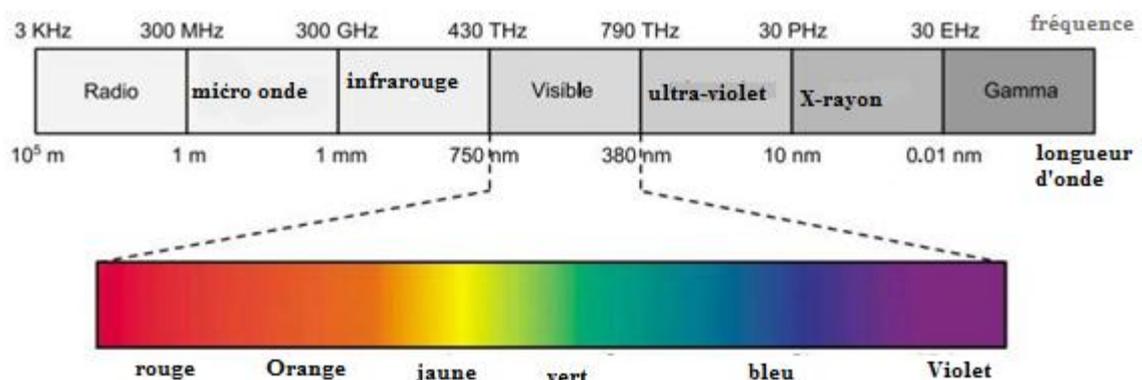


Figure II.2 : Spectre électromagnétique. [35]

Un émetteur VLC module le message à envoyer sur la puissance instantanée de la lumière. Du côté du récepteur, les données sont extraites à l'aide d'un élément photosensible capable de détecter les variations de l'intensité lumineuse. L'un des principaux avantages du VLC est l'utilisation des systèmes d'éclairage à LED existants, ce qui le rend omniprésent et réduit considérablement son coût de mise en œuvre.

II.4 L'architecture d'un système VLC

Un système VLC se compose principalement d'un émetteur VLC qui module la lumière produite par les LED et d'un récepteur VLC basé sur un élément photosensible (photodiode) qui est utilisé pour extraire le signal modulé de la lumière. L'émetteur et le récepteur sont physiquement séparés l'un de l'autre, mais connectés par le canal VLC. Pour les systèmes VLC, la ligne de visée (LoS) est une condition obligatoire. Le schéma d'un système VLC est illustré à la figure II.3.

II.4.1 L'émetteur VLC

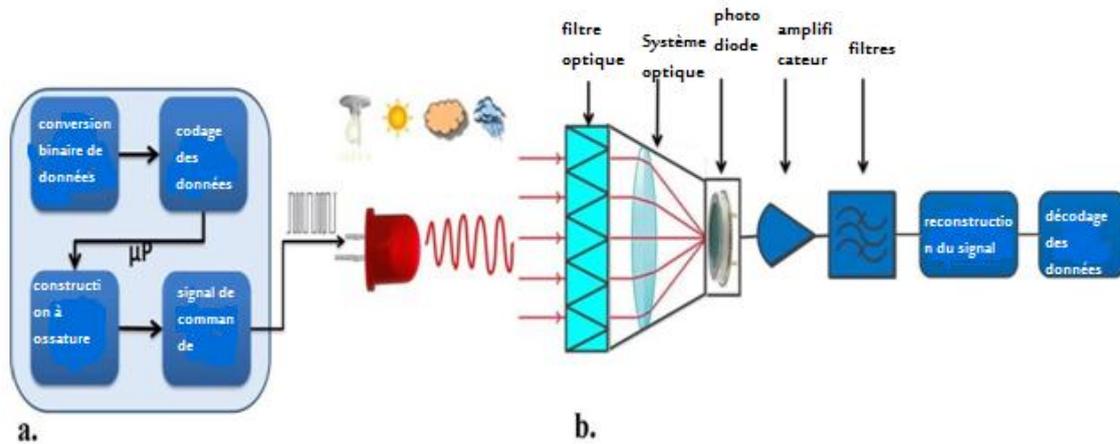


Figure II.3: architecture d'un système VLC: a. Émetteur; b. Récepteur

Un émetteur VLC est un dispositif qui transforme les données en messages pouvant être envoyés sur le support optique en espace libre en utilisant la lumière visible. Le but de l'émetteur VLC est d'émettre de la lumière et de transmettre des données en même temps. Cependant, la transmission de données ne doit pas affecter d'une manière ou d'une autre le but premier de l'appareil qui est l'éclairage ou la signalisation. Dans cette optique, l'émetteur VLC doit pouvoir s'adapter aux exigences de l'éclairage. Cela signifie qu'il est censé utiliser la même puissance optique ou, si l'application l'exige, permettre une gradation. En outre, l'émetteur VLC ne doit pas induire de scintillement notable.

Le composant central de l'émetteur VLC est l'encodeur qui convertit les données en un message modulé. L'encodeur commande la commutation des LED en fonction des données binaires et du débit de données imposé. Les données binaires sont ainsi converties en un faisceau lumineux modulé en amplitude. En général, la lumière produite par les LED est modulée en courant avec une modulation d'amplitude de type OOK (On-Off Keying), mais d'autres techniques de modulation, comme la modulation différentielle à fréquence orthogonale OFDM [39], la modulation multi-tonale discrète (DMT) [40] ou le spectre étalé à séquence directe (DSSS) [41] peuvent être utilisées. Une solution rentable pour le codeur est représentée par l'utilisation de microcontrôleurs. Dans la plupart des cas, leurs performances sont suffisamment élevées pour assurer des performances relativement bonnes. Cependant, dans des applications plus complexes, le microcontrôleur peut être remplacé par un réseau de portes programmables par l'utilisateur (FPGA) qui sera capable de fournir des performances améliorées à l'aide de techniques de traitement du signal numérique.

Les paramètres de l'émetteur VLC sont principalement limités par les caractéristiques des LEDs. Le débit de données (fréquence de transmission) dépend des capacités de commutation des LED, tandis que la zone de service de l'émetteur dépend de la puissance de transmission et du modèle

d'éclairage (angle d'émission). Actuellement, l'industrie SSL est en mesure de produire des LED qui peuvent offrir des fréquences de commutation de quelques dizaines de mégahertz.

II.4.2 Le récepteur VLC

Le récepteur VLC est utilisé pour extraire les données du faisceau lumineux modulé. Il transforme la lumière en un signal électrique qui sera démodulé et décodé par le module décodeur embarqué. En fonction des performances requises et des contraintes de coût, le décodeur peut être un microcontrôleur ou un FPGA. La conception soignée du récepteur VLC représente un problème sérieux car, dans la plupart des applications, les performances du récepteur VLC ont la plus grande influence sur les performances du système VLC, déterminant la portée de communication et la résistance aux interférences.

En général, les récepteurs VLC sont basés sur des éléments photosensibles qui ont une large bande passante et offrent la possibilité de communications à grande vitesse. Cependant, comme la lumière incidente n'est pas seulement due à l'émetteur mais aussi à d'autres sources lumineuses (artificielles ou naturelles), le récepteur est soumis à des interférences importantes. Les performances du récepteur VLC peuvent être améliorées en utilisant un filtre optique qui rejette les composantes indésirables du spectre, telles que la composante IR. De plus, dans les applications à haut débit utilisant des LED blanches, le filtre optique ne permet que le passage d'un rayonnement à bande étroite, correspondant à la couleur bleue. Ce choix s'explique par le fait que la lumière blanche est obtenue à partir de LED bleues et de phosphore jaune, et que le temps de commutation des LED bleues est plus court, ce qui permet des débits de données plus élevés [42], [43].

L'effet des interférences peut également être réduit en diminuant le champ de vision (FOV) du récepteur, ce qui influence la zone de service. Un champ de vision plus large permet d'élargir la zone de service, mais il présente l'inconvénient de capter davantage de bruit, ce qui entraîne une dégradation du rapport signal/bruit. Cependant, les applications intérieures à courte portée exigent une mobilité accrue et la possibilité de réduire le champ de vision n'est pas envisagée dans la plupart des cas. En revanche, pour les applications extérieures à longue portée, où la portée induit de petits angles, le FOV étroit est une solution efficace. Des études théoriques et expérimentales ont montré qu'un FOV étroit aide les systèmes VLC à améliorer leur robustesse au bruit dû à la lumière du jour ou à celui d'autres émetteurs VLC [44]. Le FOV du récepteur est déterminé par le FOV du système optique, qui concentre également la lumière sur le photodétecteur à l'aide d'une lentille. Le photodétecteur est généralement basé sur une photodiode en silicium à polarisation inverse fonctionnant en mode photoconducteur qui génère un courant proportionnel à la lumière incidente. La valeur du photocourant dépend également de la sensibilité spectrale de la photodiode. C'est pourquoi l'augmentation de la surface du photodétecteur peut améliorer les performances du

système. Cependant, la surface du photodétecteur influence fortement sa capacité, qui à son tour influence la bande passante réalisable. Dans ces circonstances, le choix de la surface des photodétecteurs représente un compromis entre le rapport signal/bande passante. Ensuite, en raison des petites valeurs du photocourant généré, un circuit de transimpédance est utilisé pour transformer le petit courant en une tension. La solution de la transimpédance offre un compromis équitable entre le produit gain-largeur de bande (GBP) et le bruit. La tension fournie par le circuit de transimpédance est amplifiée et filtrée pour éliminer le bruit à haute et basse fréquence, ainsi que la composante continue. Après toutes ces opérations, le signal doit correspondre au signal émis contenant les données. L'unité de traitement des données décode l'information à partir du signal reconstruit pour obtenir le message binaire.

II.4.3 Le canal VLC

Les deux principaux composants du VLC sont interconnectés par le canal de communication optique en espace libre. La lumière visible étant une radiation électromagnétique, comme toutes les radiations électromagnétiques, son intensité diminue avec la racine carrée de la distance lorsqu'elle traverse le canal de communication, ce qui rend le signal qui arrive au récepteur très faible. En outre, le canal VLC peut contenir de nombreuses sources de bruit optique. Pendant la journée, la source de bruit la plus importante est le soleil. Les autres sources de bruit sont représentées par les émetteurs VLC ou toute source de lumière avec ou sans capacité de transmission de données. La commutation de la lumière artificielle ou les conditions dynamiques rendent également le canal VLC très imprévisible. Dans le cas des applications VLC en extérieur, l'imprévisibilité est encore plus grande en raison des conditions météorologiques. Les particules d'eau provenant de la pluie, de la neige ou d'un brouillard épais peuvent affecter la liaison VLC en provoquant la diffusion de la lumière contenant les données. La multitude de sources de bruit, associée à la faiblesse des signaux, notamment à longue distance, affecte considérablement le rapport signal/bruit du VLC. Une autre caractéristique du canal VLC provient des conditions strictes de LoS, qui limitent la propagation par trajets multiples. En VLC, la propagation par trajets multiples a un effet limité qui n'est ressenti qu'à de courtes distances émetteur-récepteur [44].

Comme nous l'avons déjà mentionné, le rapport signal/bruit peut être amélioré au niveau du récepteur par l'utilisation de filtres optiques, par une conception adéquate du système optique ou par l'utilisation d'un gain adaptatif et d'un filtrage adaptatif.

II.5 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, la sélection d'une modulation en particulier se fait selon deux critères :

- **Besoin en éclairage** : Différentes activités nécessitent des éclairages différents, tels que 30–100 lux requis pour des activités visuelles normales dans des lieux publics. Il existe une relation non linéaire entre la lumière mesurée et la lumière perçue, leur relation est donnée par l'équation 2.1 :

$$\text{Lumière perçue (\%)} = 100 \sqrt{\frac{\text{lumière mesurée (\%)}}{100}} \quad (2.1)$$

- **Adaptation à l'effet de scintillement** : Les changements de luminosité de la lumière modulée doivent être effectués de manière à ne pas entraîner de fluctuations perceptibles par l'homme. Selon l'IEEE 802.15.7, la commutation doit être effectuée à un taux plus rapide que 200 Hz pour éviter des effets nocifs. [33]

Dans le premier standard IEEE 802.15.7, différents types de modulations sont proposés : la modulation OOK (On-Off Keying), la modulation VPPM (Variable Pulse Position Modulation) et la modulation CSK (Color Shift Keying). Cependant, de nombreux travaux ont montré l'intérêt d'utiliser des modulations multi-porteuses telles que la modulation OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

Les trois premières modulations sont retrouvées dans la couche physique (PHY) de la norme IEEE 802.15.7. Les types PHY I et PHY II sont définis pour une source lumineuse unique et prennent en charge les technologies OOK et VPPM, tandis que le type PHY III utilise plusieurs sources optiques à plusieurs fréquences (couleurs) en utilisant la modulation CSK. Les trois systèmes peuvent coexister offrant une atténuation de scintillement et une prise en charge de la gradation et permettent un compromis entre les débits de données et les plages de gradation. [45]

II.5.1 La modulation OOK

Comme illustré à la figure II.4, l'OOK est une technique de modulation simple dans laquelle le «1» numérique est représenté par la présence du signal, correspondant à l'état «ON», tandis que la donnée «0» est représentée par un signal de valeur égale à zéro, ou l'état «OFF». Le «ON» et le «OFF» représentent deux niveaux d'amplitude distincts, nécessaires à la communication, et n'impliquent pas nécessairement que la source de lumière soit complètement éteinte. Pour OOK, la norme IEEE 802.15.7 mentionne l'utilisation du code de Manchester pour s'assurer que la période des impulsions positives est identique à celle des impulsions négatives, mais cela double également la bande passante requise pour la transmission OOK. [46] Cinq débits 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. [46]

Alternativement, pour des débits binaires plus élevés, on utilise un codage à longueur limitée (RLL, Run Length Limited) qui est plus efficace spectralement. La gradation est prise en charge en ajoutant une extension OOK qui ajuste la sortie agrégée au niveau correct. [47]

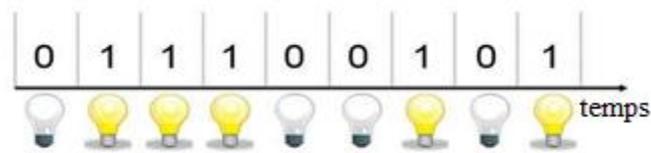


Figure II.4 : Schéma de modulation OOK. [48]

II.5.2 La modulation VPPM

La modulation VPPM est une variante de la Pulse Position Modulation (PPM), développée spécifiquement pour les VLC. En modulation PPM, l'information est représentée par la position de l'impulsion dans le temps. La variante VPPM introduit en plus la variation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse Width Modulation), en fonction du niveau d'intensité lumineuse (figure II.5). Il s'agit d'une modulation Manchester OOK à laquelle on applique un rapport cyclique variable. La modulation VPPM permet de s'affranchir des problèmes de scintillement car on supprime les longues suites de symboles « 0 » et la technique PWM permet de contrôler l'intensité lumineuse. [36]

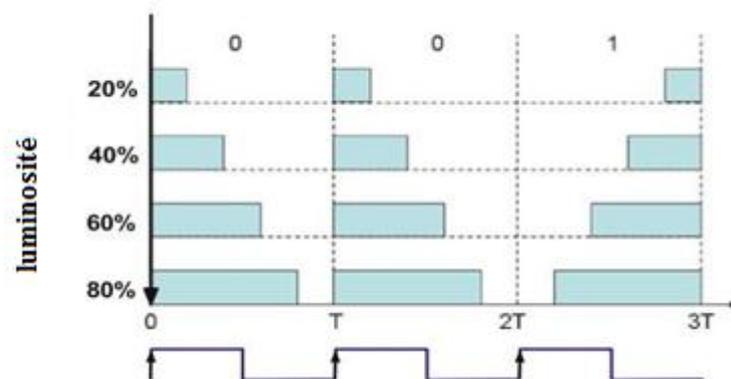
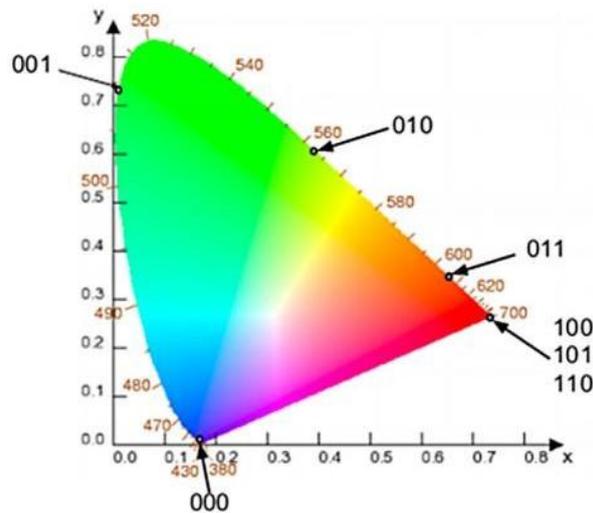


Figure II.5 : Modulation VPPM. [49]

II.5.3 La modulation CSK

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

à chaque couleur varient. Cette modulation mappe toutes les couleurs perceptibles à l'œil sur deux paramètres de chromaticité tels que x et y . La figure II.6 illustre les sept bandes de longueur d'onde visibles par l'œil présentées dans un tableau avec leurs centres représentés sur le diagramme. [33-36]



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

Figure II.6 : Modulation CSK. [33]

Cette technique permet de s'affranchir complètement des problèmes de scintillement. De plus, comme le flux lumineux émis est constant, le courant de commande reste constant lui aussi, diminuant ainsi grandement les contraintes sur les sources. La limitation de cette Modulation est liée à la complexité et à la nécessité en réception d'être capable de recevoir chaque couleur. [36]

II.6 Avantages et inconvénients du VLC

En raison de ses caractéristiques et avantages uniques, le VLC est considéré comme la prochaine génération de communications sans fil. Le VLC semble être la solution à certains des problèmes restés sans solution jusqu'à présent. Il bénéficie des avantages de la lumière visible, à savoir : une largeur de bande élevée et gratuite qui permet des débits de données élevés, un spectre sans licence et la sécurité pour le corps humain et pour les équipements électroniques de haute précision. Le VLC est également considéré comme plus sûr que la RF et la transmission de données est disponible en plus de la fonction d'éclairage. Outre ces avantages, le VLC est une technologie peu

coûteuse et facile à mettre en œuvre.

Les avantages et les inconvénients du VLC seront analysés plus en détail dans les sections suivantes :

II.6.1 Avantages VLC

- **Large bande passante :** Le spectre des ondes radio est limité, de 3 kHz à 300 GHz, alors que le spectre de la lumière visible est d'au moins 10000 fois plus grand, qui es de 430 THz à 790 THz. Contrairement aux RF, elle s'étend sur plusieurs THz 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.
Modulation est liée à la complexité et à la nécessité en réception d'être capable de recevoir chaque couleur. [36]
- **Pas d'interférence électromagnétique :** L'utilisation d'ondes lumineuses ne cause aucune perturbation électromagnétique. Les systèmes VLC conviennent aux communications dans les environnements d'immunité aux interférences électromagnétiques (EMI, Electro magnetic Interference), tels que les hôpitaux, les centrales nucléaires, et les avions.
- **Sécurisé :** Etant donné que les rayons lumineux ne traversent pas la matière et ne peuvent pénétrer dans les objets opaques, ils sont donc généralement confinés dans leur environnement. L'interception des données est ainsi impossible de l'extérieur. C'est un avantage qui permet d'améliorer la sécurité de l'information et d'assurer des liaisons de communications plus sûres.
- **Absence de risques pour la santé :** Étant donné que l'éclairage des LEDs ne génère pas de rayonnement, contrairement aux dispositifs à fréquence radio ou à micro-ondes, aucun risque évident n'est encouru pour l'environnement et la santé des utilisateurs.
- **Mise en œuvre facile et bas coût :** La mise en œuvre d'un système VLC est relativement simple. Au lieu de concevoir un système de communication sans fil complet, cette technologie permet de combiner les fonctions d'éclairage et de communication, seuls quelques modules supplémentaires sont ajoutés au système d'éclairage. Ainsi, les besoins en termes d'installation et de maintenance sont réduits. Grâce au développement rapide de l'industrie des LEDs, le coût de la production massive d'émetteurs-récepteurs VLC ne cesse de diminuer.
- **Economique et écologique :** Les systèmes VLC peuvent réduire la consommation d'énergie car ils utilisent les éclairages à LED reconnus comme dispositifs d'éclairage écologique capables de réduire de 80% cette consommation par rapport à celle des sources d'éclairage

traditionnelles. Si toutes les sources d'éclairage sont remplacées par des LEDs, la consommation mondiale d'électricité devrait être réduite de 50%. Selon un rapport récent du département américain de l'énergie, il est possible d'économiser jusqu'à 207 Téra Watt Heures (TWh) d'ici à 2025 grâce à l'adoption de la technologie d'éclairage à LED.

II.6.2 Les points faibles de VLC :

Comme nous l'avons vu, VLC est une technologie qui présente de nombreux avantages importants. Toutefois, comme toute autre technologie, VLC présente également plusieurs inconvénients. Certains de ces inconvénients sont dus au fait que la technologie VLC n'en est qu'à ses débuts et pourraient être surmontés au fur et à mesure de son développement. Les autres sont dus à l'utilisation de la lumière et à ses caractéristiques. Pour les derniers, il sera difficile de les atténuer complètement, mais leurs effets pourraient être réduits ou la communication pourrait être adaptée aux situations. Les inconvénients les plus importants du VLC et les solutions possibles pour les atténuer seront examinés plus en détail.

- **Conditions strictes de la LoS :**

En règle générale, le LoS maximise l'efficacité énergétique et minimise la distorsion par trajets multiples. Dans certains cas, la condition LoS obligatoire peut être considérée comme un avantage car les interférences des autres récepteurs sont limitées et la sécurité de la communication est renforcée. Cependant, il existe d'autres applications pour lesquelles ce problème est considéré comme un inconvénient majeur. Les communications non-LoS sont considérées comme plus fiables, plus souples et plus robustes. La condition obligatoire de LoS a un effet négatif sur la mobilité et, dans certaines zones, elle représente le plus grand inconvénient du VLC car un objet interposé entre l'émetteur et le récepteur peut bloquer la communication, à moins qu'une autre route ne soit disponible.

Solution possible

En utilisant les communications multi-sauts et les retransmissions, les données peuvent atteindre les utilisateurs qui sont situés en dehors de la zone de couverture de l'émetteur mais dans la zone de couverture d'un autre émetteur-récepteur. Une autre solution pour ce problème est de combiner le VLC avec la RF comme proposé dans [50]. Dans ce cas, lorsqu'un nœud ne peut pas être adressé par VLC, il est adressé par RF.

- **Portée de transmission limitée :**

Si l'on considère la portée de transmission, les VLC ne peuvent pas concurrencer les communications RF. Même si la portée de transmission des VLC peut être augmentée en optimisant

les paramètres de l'émetteur et du récepteur, la portée de communication des VLC reste nettement inférieure à celle des communications RF. Du côté de l'émetteur, la portée de communication peut être accrue en augmentant la puissance de transmission ou en utilisant un faisceau lumineux plus directif. Du côté du récepteur, la portée peut être augmentée en utilisant différentes techniques pour améliorer le rapport signal/bruit (SNR), comme un récepteur à champ de vision étroit, une lentille optique ou différentes techniques de filtrage.

Solution possible

Outre l'amélioration de l'émetteur et du récepteur, la mise en réseau multi-sauts peut également être une solution permettant d'augmenter de manière significative la portée de communication des systèmes VLC.

- **Sensibilité aux interférences :**

Un autre inconvénient du VLC est sa susceptibilité aux interférences. Le VLC est susceptible d'être affecté par d'autres dispositifs d'éclairage tels que les sources de lumière incandescente ou fluorescente. En général, ces sources lumineuses produisent un bruit à basse fréquence qui peut être éliminé à l'aide d'un filtre passe-haut. Outre les sources de lumière artificielle, dans les applications extérieures, la lumière du soleil représente un facteur de perturbation très important. Le soleil produit une lumière non modulée qui introduit une forte composante continue qui peut être éliminée à l'aide de filtres CC capacitifs. Cependant, le bruit optique de haute intensité peut saturer le récepteur, bloquant ainsi la communication.

Solution possible

L'effet des autres sources de lumière peut être réduit en utilisant des filtres optiques, en réduisant le FOV du récepteur et en filtrant les fréquences indésirables. Même si les techniques mentionnées atténuent l'effet des interférences, les niveaux élevés de bruit affectent.

II.7 Applications du VLC

En tirant parti des avantages mentionnés ci-dessus, la technologie VLC peut être utilisée dans de nombreuses applications. Dans certaines de ces applications, le VLC semble être le seul choix possible, alors que dans d'autres, il peut être une solution complémentaire pour les communications RF, améliorant les performances globales. Nous présentons ci-après quelques-unes des applications les plus représentatives envisagées pour la technologie VLC. [46] [49]

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

- **Éclairage intelligent** : Les bâtiments intelligents nécessitent un éclairage esthétique. L'éclairage intelligent avec VLC fournit l'infrastructure nécessaire à la fois pour l'éclairage et la communication et réduit les circuits et la consommation d'énergie au sein d'un édifice.
- **Hôpitaux** : Dans les hôpitaux, certains équipements sont susceptibles d'interférer avec les ondes radio. L'utilisation du VLC présente de nombreux avantages dans ce domaine.
- **Communications sous-marines** : VLC peut prendre en charge des débits de données élevés sous l'eau, là où d'autres technologies sans fil comme les RF ne fonctionnent pas. Ainsi, les communications entre les plongeurs ou les véhicules télécommandés sont possibles.
- **Véhicule et transport** : Les feux de circulation et de nombreuses voitures utilisent des lumières à LED. Les voitures peuvent communiquer entre elles pour prévenir de quelconque accident et les feux de circulation peuvent également communiquer avec les voitures pour assurer la sécurité routière.
- **Environnements dangereux** : Dans des environnements tels que les usines pétrochimiques, les mines,...etc., les radiofréquences sont potentiellement dangereuses car il existe des risques d'explosion, ce qui rend la communication difficile. VLC peut être utilisée dans ce domaine, car il s'agit d'une technologie sûre qui fournit à la fois un éclairage et une communication.
- **Localisation** : Les personnes pourraient tirer parti des LEDs à distribution dense pour les références de localisation et utiliser des algorithmes de triangulation pour prévoir la position des périphériques. Il en résulte que le positionnement et la navigation à l'intérieur deviennent très précis grâce aux LEDs, comme le GPS (Global Positioning System) pour les satellites en extérieur. Les LEDs pourraient également envoyer des signaux de commande à un robot intelligent et guider son mouvement précis le long d'un itinéraire pour atteindre sa destination prédéfinie.
- **Li-Fi** : l'une des plus importantes applications envisagées pour le VLC est la fourniture de Light-Fidelity ou "Wi-Fi optique". Grâce à l'énorme bande passante disponible, le VLC pourrait permettre des connexions Internet à haut débit à partir d'un plafonnier. Le Li-Fi est favorisé dans ce cas par le fait que les distances impliquées ne sont que de quelques mètres, équivalentes à la distance entre le plafond et le bureau. Dans ce domaine, on considère que le VLC est capable de fournir des connexions à plusieurs Gb/s.

Comme l'illustre la figure II.7, les données provenant de l'internet sont transformées par un routeur Li-Fi en un signal qui est appliqué à la source lumineuse. La source lumineuse s'allume et s'éteint à des fréquences, non perceptibles par l'homme, en fonction des données à envoyer. Le récepteur transforme le signal lumineux en données numériques qui seront

délivrées au terminal mobile. En ce qui concerne l'upload, il peut être réalisé par une liaison infrarouge. ent toujours les performances de communication.



Figure II.7: utilisation de VLC pour l'internet sans fil (Li_Fi)

L'évolution rapide et l'énorme potentiel de la technologie Li-Fi ont contribué à la fondation du Consortium Li-Fi en 2011 [51]. L'organisation rassemble les principales entreprises et institutions de recherche de la technologie de communication optique et vise à contribuer au développement de la technologie.

- **Allègement du spectre RF** : l'utilisation du VLC n'exclut ni n'affecte en aucune façon l'utilisation des communications basées sur la RF, ce qui signifie que les deux peuvent être utilisées ensemble. Dans ce cas, le VLC peut soulager un peu le spectre RF déjà surchargé. Une proposition de coopération entre les deux technologies sans fil prévoit l'utilisation du VLC pour la diffusion à haut débit de données du routeur Li-Fi vers le terminal mobile, tandis que le terminal mobile communique avec le routeur par RF.

II.9 Conclusions

Les VLC sont apparus et se sont développés dans le contexte d'une demande croissante de technologies de communication sans fil. L'évolution rapide du VLC a été soutenue par les progrès de l'industrie SSL qui ont constamment augmenté les performances des LED.

Ce chapitre a introduit les principes de base du VLC, en présentant l'architecture d'un tel système. En soulignant les avantages de cette technologie, les principales applications des VLC ont

été identifiées tandis qu'en mettant en évidence les points faibles des VLC, les principaux défis ont été présentés

Chapitre III

Simulation et résultats

III.1 Introduction

Dans cette section, nous décrivons d'abord un aperçu du système VLC basé sur l'OFDM. En outre La technologie Li-Fi, connue sous le nom de «Light Fidelity», est un acteur majeur de l'internet de demain. C'est un système de communication sans fil dans lequel la lumière est utilisée comme signal porteur au lieu de la fréquence radio traditionnelle comme dans le Wi-Fi. Où nous étudierons les concepts et les composants fondamentaux et ses atouts face au Wi-Fi. La technique DCO-OFDM est la condition obligatoire de LoS et la portée de transmission limitée, le signal et doit être réel et non négatif, nous allons donc étudier les concepts de cette technique ainsi que l'examen de ses performances sur un programme de simulation.

III.2 Description du système VLC basé sur l'OFDM

L'OFDM est un exemple de technique de modulation multi porteuse. Qui distribue les données à transmettre sur des sous-porteuses orthogonales. Comme le montre la figure III.1, les symboles d'information, $d(n)$, sont répartis sur N_{sub} sous-porteuses porteuses de données. Ces sont ensuite mappés sur la convalorisation M-QAM de choix pour obtenir $X(k)$. Le signal résultant est ensuite arrangé dans une trame OFDM constituée de U symboles porteurs de données et d'un symbole pilote inhérent (PS). Pour le système OFDM de base, le symbole pilote est essentiel pour l'estimation du canal et/ou la synchronisation de la trame.

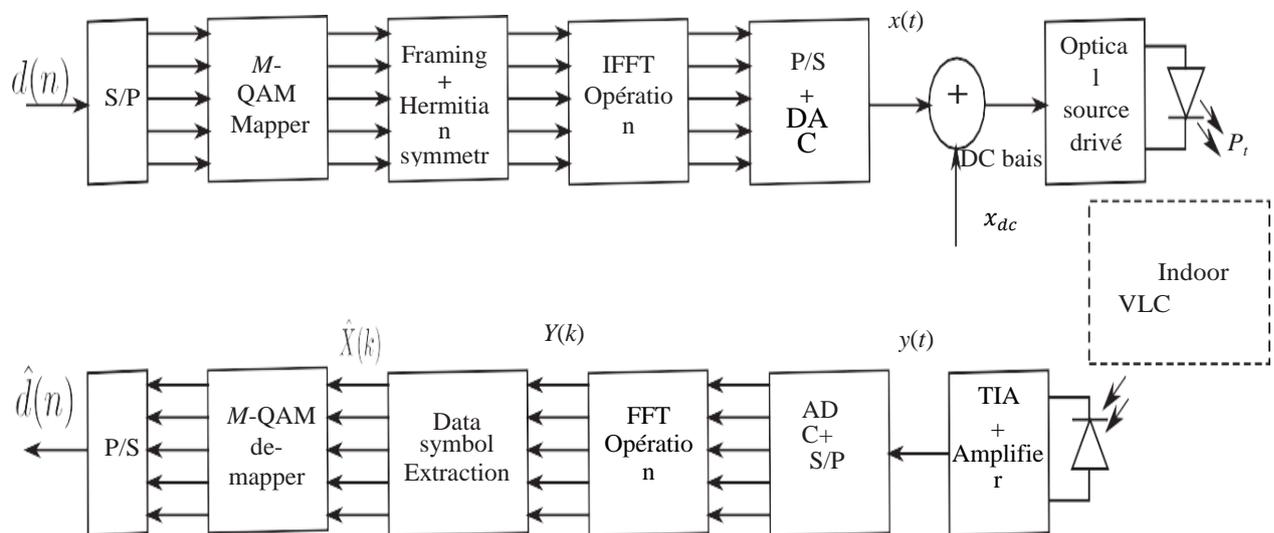


Figure III.1 : Illustration du schéma fonctionnel du système de base OFDM-VLC

L'OFDM optique est similaire à celui utilisé dans les communications radio, sauf que le signal doit être réel et unipolaire. Le site le signal $X(k)$ avant l'opération IFFT comme représenté dans la première condition est remplie en imposant la symétrie hermitienne sur (3.1) :

$$\mathbf{X}_H = \left[\mathbf{1}, \mathbf{X}(\mathbf{k}), \underbrace{\mathbf{0}, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}}_{N(L-1)/2}, \underbrace{\mathbf{0}, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}}_{N(L-1)/2}, \mathbf{X}^*(NL - \mathbf{k}) \right] \quad (3.1)$$

Où $\mathbf{N} = 2(\mathbf{1} + \mathbf{N}_{\text{sub}})$ et $\mathbf{X}^*(.)$ représente le conjugué complexe de $\mathbf{X}(.)$. Le signal est sur-échantillonné L fois afin de capturer adéquatement tous les pics du signal. Le signal correspondant $x(n)$ dans le domaine temporel, sur-échantillonné L fois, est donc donné par [54] :

$$\mathbf{x}(\mathbf{n}) = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{NL}} \sum_{\mathbf{m}=0}^{NL-1} \mathbf{X}_H(\mathbf{m}) e^{[j2\pi n m / NL]}; \mathbf{0} \leq \mathbf{n} \leq \mathbf{N} \mathbf{L} - \mathbf{1} \quad (3.2)$$

La deuxième condition est remplie en ajoutant une polarisation en courant continu \mathbf{x}_{dc} au signal du domaine temporel $x(t)$ à la sortie du module P/S et DAC ; on obtient alors un OFDM polarisé en courant continu (DCO-OFDM). Il convient de mentionner que certaines autres variantes de l'OFDM optique sont unipolaires par conception et ne nécessitent aucune polarisation en courant continu. Dans cette catégorie, on trouve notamment l'OFDM à écrêtage asymétrique et l'OFDM unipolaire, dans [55], [56].

Le DCO-OFDM est ensuite utilisé pour la modulation d'intensité des LED blanches à l'aide du module de commande optique. Pour un pilote optique linéaire typique, la puissance optique rayonnée peut être écrite comme suit :

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{k}(\mathbf{x}_{\text{dc}} + \alpha \mathbf{x}(\mathbf{t})) \quad (3.3)$$

Où α représente l'indice de modulation optique et \mathbf{K} est le coefficient de conversion du signal électrique en puissance optique du modulateur. Pour éviter l'écrêtage du signal dû à une polarisation continue insuffisante, la condition $\mathbf{x}_{\text{dc}} \geq |\min[x(t)]|$ doit être satisfaite.

L'étage frontal du récepteur comprend une combinaison photodiode à détection directe/TIA/amplificateur qui convertit le rayonnement optique entrant en signal de tension électrique équivalent $y(t)$. Le reste des blocs de la Figure III.1 inverse les opérations effectuées par l'émetteur et produit une estimation de la tension électrique $y(t)$. Effectuées par l'émetteur et produit une estimation $\hat{\mathbf{d}}(n)$ des bits de données transmis.

La haute efficacité spectrale de l'OFDM et sa résilience aux altérations du canal le rendent attrayant pour une variété d'applications, notamment les communications par fibre, l'optique en espace libre et le VLC. Étant donné qu'un signal OFDM est constitué de la somme de sous-porteuses/tones indépendants, des pics élevés occasionnels seront présents dans le signal OFDM du domaine temporel, ce qui entraîne une PAPR électrique élevée. Par conséquent, il n'est pas possible de contenir la totalité de l'oscillation du signal dans la gamme dynamique de l'émetteur sans écrêter les niveaux inférieurs et/ou supérieurs.

Comme la PAPR élevée reste un défi majeur pour l'OFDM, le système doit donc être optimisé pour essayer de minimiser son impact négatif.

- On peut y parvenir en appliquant une symétrie hermitienne à la trame d'information avant l'opération de transformation de Fourier rapide inverse (IFFT). Les schémas O-OFDM courants ont été réalisés dans le VLC tels que l'OFDM optique polarisé en courant continu (DCO-OFDM), l'OFDM optique à écrêtage asymétrique (ACO-OFDM), l'OFDM non polarisé en courant continu (NDC-OFDM) et l'OFDM unipolaire (U-OFDM) [57-60].

III.2.1 Direct-Current (DC) biased O-OFDM (DCO-OFDM)

Une façon pratique d'assurer la non-négativité du signal OFDM est d'ajouter une polarisation continue pour garantir un signal unipolaire à la fin de l'émetteur. Dans le DCO-OFDM, toutes les sous-porteuses sont assignées sauf la Première et la $N_{\text{IFFT}}/2+1$ sous-porteuses qui sont mises à zéro afin que le signal de sortie ne soit constitué que de réels Réelles [61]. Comme mentionné précédemment, la symétrie hermitienne est fondamentale pour que la sortie du bloc IFFT soit constituée de signaux à valeurs réelles, comme le montre la figure III.2.

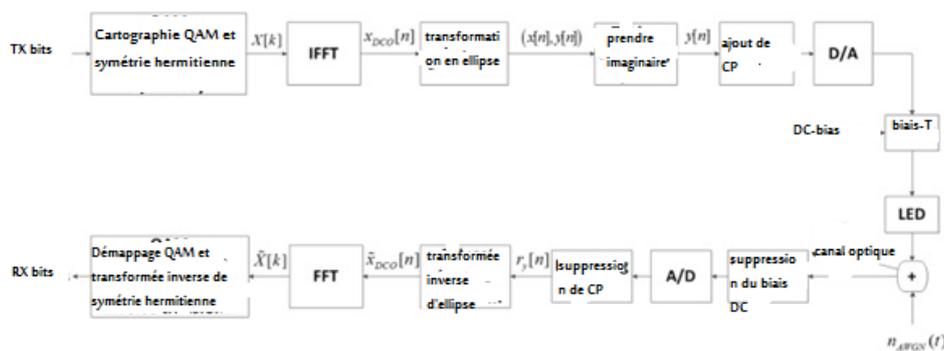


Figure III.2 : La structure du système DCO-OFDM.

Un DCO-OFDM est présenté à la figure III.2. Le flux binaire est codé en symboles complexes, $X(k)$, par le modulateur M -QAM, où M est la taille de la constellation. Les symboles sont répartis sur N sous-porteuses, $X(k), 0 \leq k \leq N - 1$, où N représente la taille de l'IFFT/FFT. Selon l'ensemble de [62], nous utilisons la même taille de constellation pour toutes les sous-porteuses dans le schéma de la convention. Dans le système DCO-OFDM, le signal de données complexe est contraint d'avoir une symétrie hermitienne, comme défini ci-dessous, $X(m) = X^*(N - m)$, $0 \leq k \leq N - 1$, et $X(0) = X(N/2) = 0$, où $X(m)$ est le même

sous-porteuse de signal et $X^*(m)$ désigne le conjugué de $X(m)$. Ensuite, le signal est introduit dans la transformée de Fourier rapide inverse (IFFT). Rapide inverse (IFFT). En raison de la symétrie hermitienne de l'entrée, le signal de sortie de la TIFI, x , est réel. L'adresse de x , $x(k)$ est donnée par la formule suivante :

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{j\frac{2\pi km}{N}} \quad (3.4)$$

En raison de la symétrie hermitienne et de $X(0) = X(N/2) = 0$, le nombre de sous-porteuses de données uniques est de $N/2-1$ et $x(k)$ est un signal à valeur réelle. La normalisation de la puissance électrique est utilisée ici et le fonctionnement de la normalisation de la puissance électrique est le suivant :

$$x_{\text{normalisé}}(K) = \frac{x(k)}{\sqrt{E\{x^2(k)\}}} \quad (3.5)$$

Ensuite, une polarisation continue appropriée est ajoutée à $x_{\text{normalisé}}(k)$ pour rendre le signal non négatif approximativement, $x_{\text{biaisé}}(K) = x_{\text{normalisé}}(K) + B$, où B désigne la polarisation continue. En raison de la normalisation de la puissance électrique dans (1), la polarisation en courant continu est fixée comme une constante. La polarisation $x_{\text{biaisé}}(K)$ sera échantillonnée et tous les pics négatifs restants seront échantillonnés. Résultant en un signal, comme montré ci-dessous :

$$x_{\text{coupée}}(K) = \frac{1}{2} (x_{\text{biaisé}}(K) + |x_{\text{biaisé}}(K)|) \quad (3.6)$$

Dans les simulations, le signal échantillonné sera transmis par la LED. Le signal sera détecté par le PD dans le récepteur et le PD convertira le signal d'intensité optique en un signal électrique avec le bruit blanc gaussien additif (AWGN). Après l'égaliseur, les symboles OFDM récupérés seront obtenus par la transformée de Fourier rapide (FFT). Dans le système DCO-OFDM, nous ne nous préoccupons que des $N/2-1$ symboles des sous-porteuses correspondantes pour constituer une trame de symboles QAM. Enfin, les symboles MAQ détectés sont décodés pour obtenir le flux binaire de sortie.

III.3 La technologie Li-Fi

III.3.1 Définition de Li-Fi

Le Li-Fi est une technologie de communication sans fil, bidirectionnelle, à haut débit, qui utilise la partie visible du spectre électromagnétique. Tout comme le WiFi, le Li-Fi permet par exemple à un appareil de se connecter à internet et implique donc un transfert de données. La différence entre ces deux technologies réside dans la façon de transmettre ses données. En effet, le Wi-Fi relie des appareils informatiques abusé in d'un réseau par le biais d'ondes radios, contrairement au Li-Fi, qui, comme dit précédemment, remplit la même fonction à

l'aide de la lumière visible: les données à transmettre sont codées sous forme de signal électrique et en suite transmises en signal lumineux grâce à un circuit constitué d'une ou de plusieurs sources de. Différentes intensités de lumière des sources sont possibles en fonction des données à transmettre. Les variations de luminosité pourront alors être captées par les appareils concernés, seront retransformées en signal électrique et décodées pour récupérer les données, pour autant que ces appareils receveurs soient munis d'un récepteur de lumière. Le système Li-Fi pourrait donc être assuré par les éclairages LED. [63]

III.3.2 Architecture d'un réseau Li-Fi

La conception Li-Fi est composée d'un grand nombre de LED utilisées pour la transmission optique en appliquant une tension constante et un courant constant. Comme expliqué dans [64], les composants fondamentaux d'un tel système sont:

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

Comme illustré à la figure III.3, les terminaux peuvent se connecter à Internet via une lampe à LED. Le driver (pilote à lampe) permet de contrôler la luminosité des LEDs selon l'environnement et les données reçues.

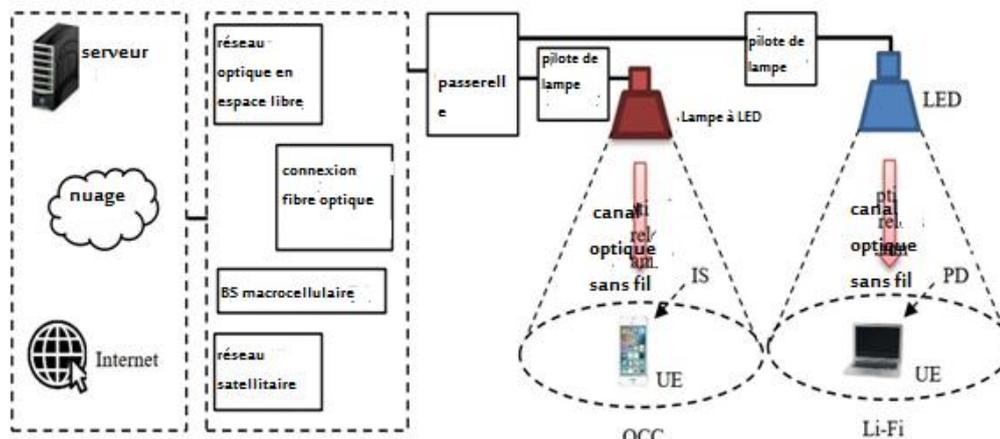


Figure III.3: Architecture d'un système Li-Fi. [65]

III.3.3 Différence entre LiFi et WiFi

Le Wi-Fi (wireless fidelity) et le Li-Fi (light fidelity) sont deux technologies différentes qui sont utilisées pour envoyer et recevoir des données sans fil. Dans le cas du Wi-Fi, nous utilisons des routeurs et des ondes de radiofréquence (RF) pour transmettre des données,

tandis que dans le cas du Li-Fi, nous utilisons des ampoules LED et des signaux lumineux pour transmettre et recevoir des données.

Le tableau ci-dessous montre la différence fondamentale entre le LiFi et le WiFi :

Tableau III.1 : Différence entre le Li-Fi et le Wi-Fi

Comparaison	Li-Fi	Wi-Fi
Forme complète	Supporter pour la fidélité à la lumière	signifie "fidélité sans fil".
Inventé/Coïncé	Inventé par le Prof. Harald Haas en 2011	Par NCR corporation le 1991
Opération	il transmet les données en utilisant la lumière à l'aide d'ampoules LED.	il transmet les données par ondes radio en utilisant un routeur wifi
Technologie	Présenter les appareils compatibles avec l'IrDA	Appareils conformes à la norme WLAN 802.11/b/g/n/ac/d
Data Transfer speed	Environ 1 Gbps	Plage de 150Mbps à un maximum de 2Gbps
Vie privée	la lumière est bloquée par les murs, ce qui permet un transfert de données plus sûr.	Les murs ne peuvent pas bloquer les ondes radio. Nous devons donc utiliser d'autres techniques pour sécuriser le transfert des données.
Fréquence de fonctionnement	10, 000 fois le spectre de fréquence de la radio	2.4Ghz, 4.9Ghz et 5Ghz
Distance de couverture	environ 10 mètres	environ 32 mètres (varie en fonction de la puissance d'émission et du type d'antenne)
Densité des données	travailler dans un environnement très dense	travailler dans un environnement moins dense en raison de problèmes liés aux interférences

Minimum vital Composants utilisés	Ampoule LED, driver LED et photo-détecteur	Routeurs, modems et points d'accès
Applications	Utilisé dans les compagnies aériennes, l'exploration sous-marine, etc.	Utilisé pour la navigation sur Internet à l'aide d'un hotspot wifi.

III.4 Résultats de simulation et analyse

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation de la DOC-OFDM pour LIFI.

Les résultats qui seront présentés sont regroupés en deux parties. Où, dans la première partie, nous avons évalué le taux d'erreur (BER) en fonction du rapport signal/bruit (SNR) pour plusieurs niveaux de codage QAM. Quant à la deuxième partie, nous avons utilisé la fonction de distribution cumulative complémentaire (CCDF) pour évaluer les performances de la réduction du PAPR par rapport au signal original et après ajout d'un biais DC. Dans les deux cas, nous avons utilisé 3 tailles d'IFFT. Tableau III.2 représente Paramètres de simulation.

Tableau III.2 : Paramètres de simulation.

Paramètres	Valeur
Taille IFFT (N)	512
Modulation	4-QAM, 16-QAM, 64 QAM
Longueur CP	16

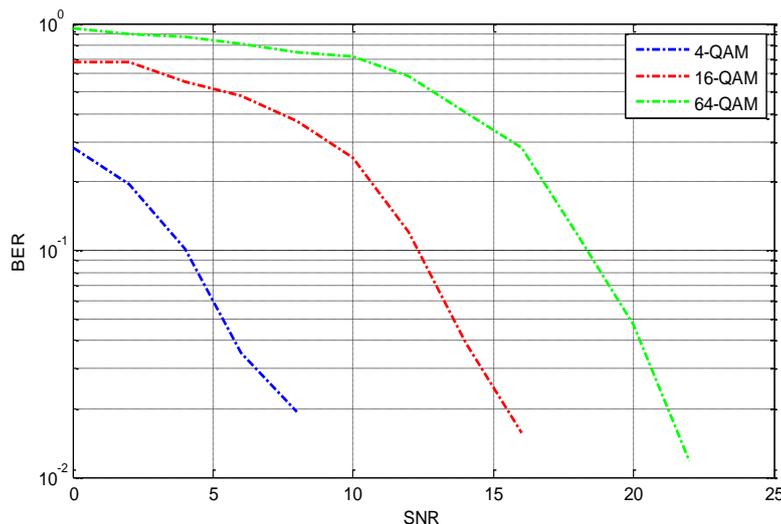


Figure III.4 : BER vs SNR pour différentes QAM pour un système DCO-OFDM basé sur le Li-Fi (N=128)

La figure III.4 montre la comparaison du taux d'erreur (BER) de 4-QAM, 16-QAM et 64-QAM sur la base du SNR à N = 128. Nous remarquons que plus le SNR n'est élevé, il y a

une diminution du taux d'erreur (BER) pour 4-QAM, 16-QAM et 64-QAM, où nous voyons une diminution plus rapide du taux d'erreur pour 4-QAM par rapport à 16-QAM et 64-QAM. Par exemple pour un BER=10⁻¹ le SNR correspondant est de l'ordre 4 dB, 12 dB et 18 dB pour 4-QAM, 16-QAM et 64-QAM respectivement.

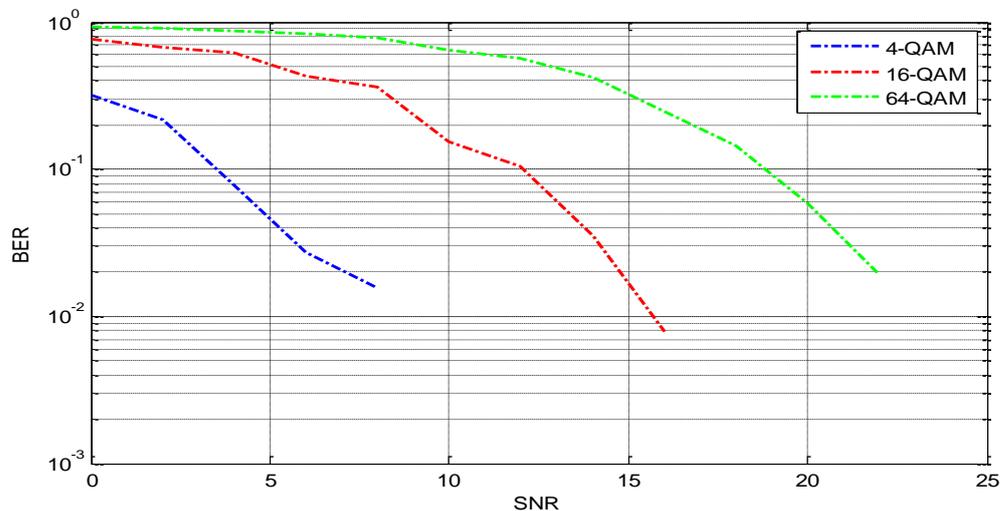


Figure III.5 : BER vs SNR pour différentes QAM pour un système DCO-OFDM basé sur le Li-Fi (N=256)

On remarque à N = 256 qu'il n'y a pas de changement du rapport signal sur bruit (SNR), quant au taux d'erreur (BER), on remarque une augmentation à 16-QAM par rapport à 4-QAM et 64-QAM.

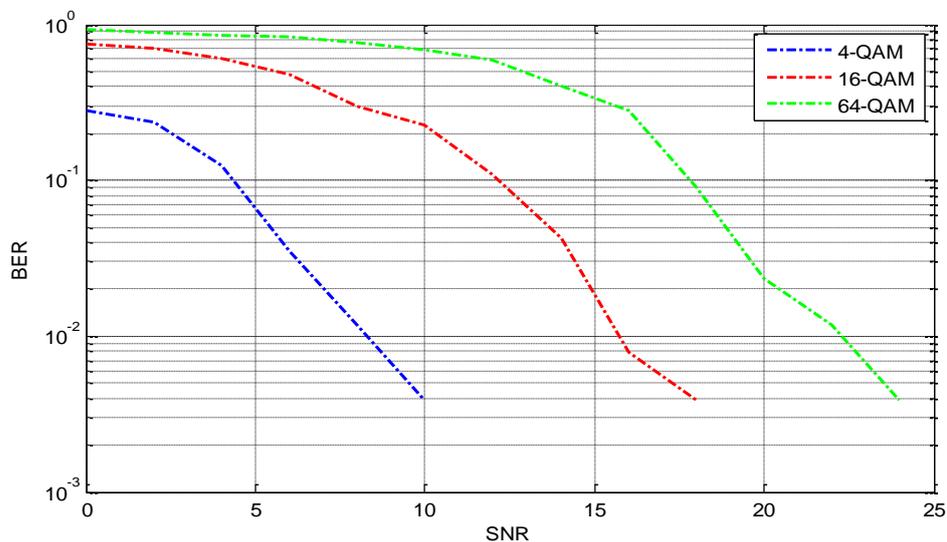


Figure III.6 : BER vs SNR pour différentes QAM pour un système DCO-OFDM basé sur le Li-Fi (N=512)

À un grand IFFT, le même taux d'erreur (BER) est atteint pour tous les systèmes de modulation, et nous remarquons une augmentation du rapport signal sur bruit (SNR).

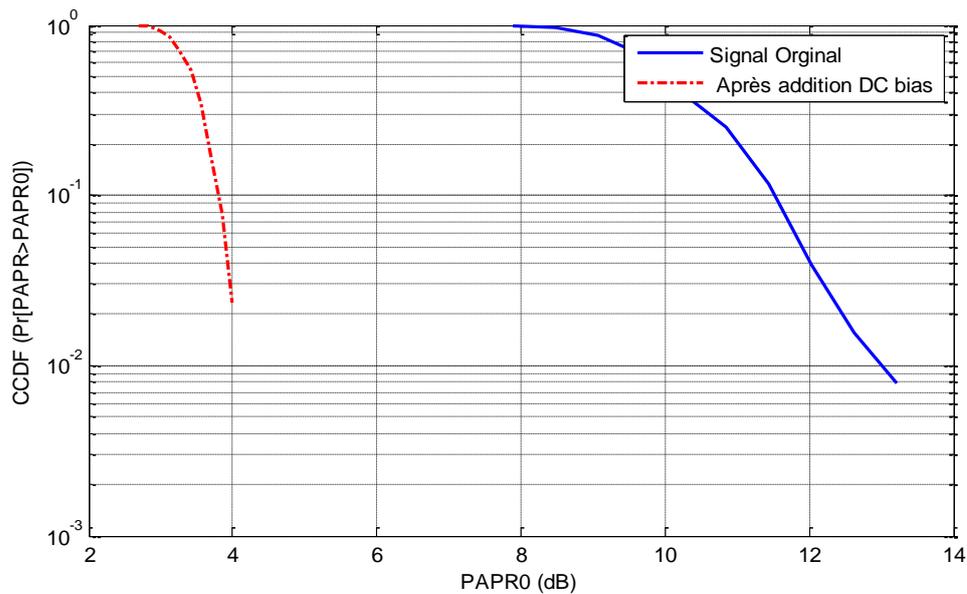


Figure III.7 : CCDF du PAPR pour le signal DCO-OFDM avec ajout d'un biais DC (N=128)

La figure III.7 compare la CCDF du PAPR à $N = 128$ entre le signal original et après l'ajout du biais DC. On remarque une diminution de la valeur du PAPR en fonction du biais DC par rapport au signal original.

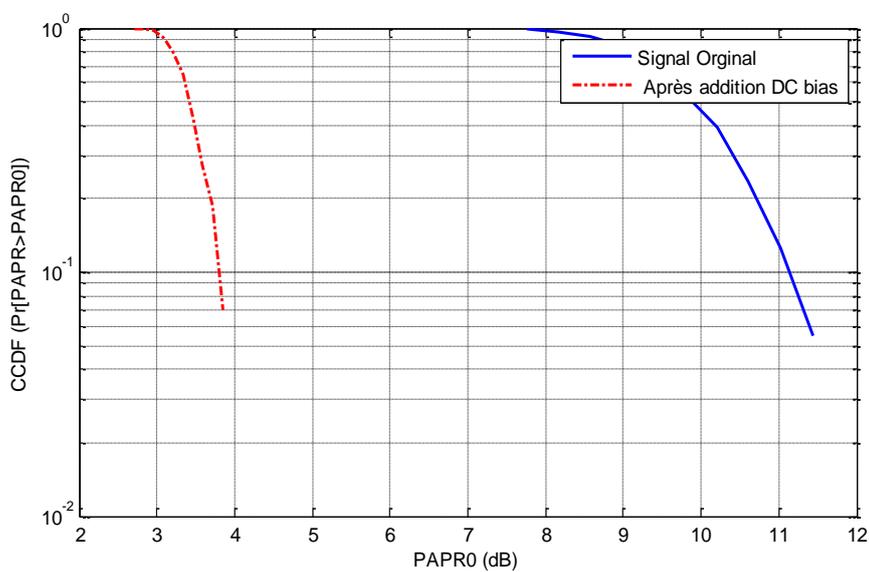


Figure III.8 : CCDF du PAPR pour le signal DCO-OFDM avec ajout d'un biais DC (N=256)

Dans cette figure III.8, nous voyons qu'il y a une diminution de la CCDF pour les deux signaux, alors que le PAPR est meilleur lorsque le biais DC est ajouté par rapport au signal original.

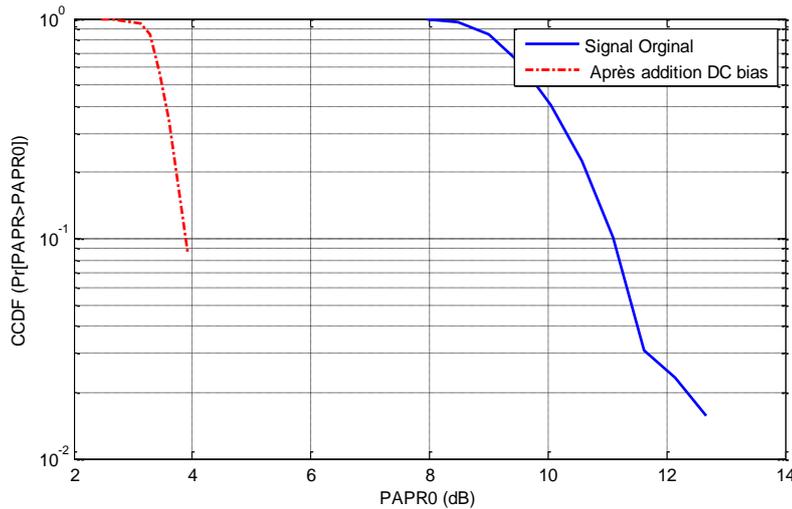


Figure III.9 : CCDF du PAPR pour le signal DCO-OFDM avec ajout d'un biais DC (N=512)

La figure III.9 montre la performance du PAPR avant et après l'ajout du biais DC. Nous voyons que cette méthode donne de bons résultats en termes de réduction du PAPR. Ainsi, nous notons que pour une taille IFFT = 512, il s'est amélioré par rapport au signal original.

III.5 Conclusion

Dans les systèmes basés sur l'OFDM, nous avons évalué les performances des schémas DCO OFDM pour le LIFI. Certaines sous-porteuses successives dans un système OFDM peuvent souffrir d'un évanouissement profond, lorsque le SNR reçu est inférieur au niveau de signal sur bruit (SNR) requis. Les signaux de transmission OFDM peuvent également présenter des valeurs de crête élevées dans le domaine temporel car de nombreuses composantes de sous-porteuses sont ajoutées via le processus IFFT. Par conséquent, les systèmes OFDM sont connus pour avoir un PAPR (rapport entre la puissance de crête et la puissance moyenne) élevé qui fait des dégâts.

Les résultats de la simulation montrent que pour obtenir la même valeur de taux d'erreur binaire (TEB) selon les tracés de modulation, la valeur du rapport signal/bruit (SNR) minimum augmente.

Les résultats de la simulation montrent également que le PAPR augmente de manière avec l'augmentation de la taille de l'IFFT du signal original. Quant au biais DC, il diminue, et nous avons conclu que biais DC est nettement plus efficace que celle du signal original.

Conclusion générale

Dans ce projet, le système LIFI basé sur OFDM est étudié.

Nous y avons présenté des idées générales sur le système de communication multiporteuse le plus utile, le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) conçu pour surmonter les inconvénients des systèmes conventionnels à porteuse unique. L'introduction dans le signal OFDM a permis de résoudre les problèmes d'ISI et d'ICI causés par un canal dispersif. En outre, L'OFDM a été adopté par de nombreuses normes de communication sans fil telles que LTE, WIMAX, DVB-T, ADSL, WI-FI et VLC.

Une LED et un photodétecteur sont les sources et les détecteurs les plus couramment utilisés dans un système VLC, respectivement. L'une des principales contraintes de ce type de systèmes est la distorsion causée par la non-linéarité de la LED, qui peut être résolue en fonctionnant dans le segment quasi-linéaire. Le symbole transmis doit être réel et unipolaire, c'est pourquoi la symétrie hermitienne est appliquée pour transformer un signal complexe en un signal réel, tandis qu'une polarisation en courant continu est ajoutée pour garantir un signal unipolaire à la fin de l'émetteur. Pour cette raison, de nombreuses formes OFDM ont été conçues afin de répondre aux exigences des fonctions des LED, comme le DCO-OFDM.

Les résultats de la simulation montrent que pour obtenir la même valeur de taux d'erreur binaire (TEB) selon les tracés de modulation, la valeur du rapport signal/bruit (SNR) minimum augmente.

Les résultats de la simulation montrent également que le PAPR augmente de manière avec l'augmentation de la taille de l'IFFT du signal original. Quant au biais DC, il diminue, et nous avons conclu que le biais DC est nettement plus efficace que celui du signal original.

Bibliographies

- [1] Chang, R. W., "Synthesis of Band Limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission," *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 45, December 1966, pp. 1775–1796.
- [2] Salzberg, B. R., "Performance of an Efficient Parallel Data Transmission System," *IEEE Trans. Communications*, Vol. COM-15, December 1967, pp. 805–813.
- [3] Mosier, R. R., and R. G. Clabaugh, "Kineplex, a Bandwidth Efficient Binary Transmission System," *AIEE Trans.*, Vol. 76, January 1958, pp. 723–728.
- [4] "Orthogonal Frequency Division Multiplexing," U.S. Patent No. 3,488,4555, filed November 14, 1966, issued January 6, 1970.
- [5] Weinstein, S. B., and P. M. Ebert, "Data Transmission by Frequency Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform," *IEEE Trans. Communications*, Vol. COM-19, October 1971, pp. 628–634.
- [6] Zou, W. Y., and Y. Wu, "COFDM: An Overview," *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. 41, No. 1, March 1995, pp. 1–8.
- [7] Porter, G. C., "Error Distribution and Diversity Performance of a Frequency Differential PSK HF Modem," *IEEE Trans. Communications*, Vol. COM-16, August 1968, pp. 567–575.
- [8] Zimmerman, M. S., and A. L. Kirsch, "The AN/GSC-10 (KATHRYN) Variable Rate Data Modem for HF Radio," *IEEE Trans. Communications*, Vol. COM-15, April 1967, pp. 197–205.
- [9] Hirosaki, B., "An Orthogonally Multiplexed QAM System Using the Discrete Fourier Transform," *IEEE Trans. Communications*, Vol. COM-29, July 1981, pp. 982–989.
- [10] Hirosaki, B., "A 19.2 Kbits Voice Band Data Modem Based on Orthogonality Multiplexed QAM Techniques," *Proc. of IEEE ICC'85*, 1985, pp. 21.1.1–5.
- [11] Keasler, W. E., and D. L. Bitzer, "High Speed Modem Suitable for Operating with a Switched Network," U.S. Patent No. 4,206,320, June 1980.
- [12] Chow, P. S., J. C. Tu, and J. M. Cioffi, "Performance Evaluation of a Multichannel Transceiver System for ADSL and VHDSL Services," *IEEE J. Selected Area*, Vol. SAC-9, No. 6, August 1991, pp. 909–919.

-
- [13] Chow, P. S., J. C. Tu, and J. M. Cioffi, "A Discrete Multitone Transceiver System for HDSL Applications," *IEEE J. Selected Areas in Communication*, Vol. SAC-9, No. 6, August 1991, pp. 909–919.
- [14] Paiement, R. V., *Evaluation of Single Carrier and Multicarrier Modulation Techniques for Digital ATV Terrestrial Broadcasting*, CRC Report No. CRC-RP-004, Ottawa, Canada, December 1994.
- [15] Sari, H., G. Karma, and I. Jeanclaude, "Transmission Techniques for Digital Terrestrial TV Broadcasting," *IEEE Comm. Mag.*, Vol. 33, February 1995, pp. 100–109.
- [16] Oppenheim, A. V., and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1989.
- [17] Hara, S., et al., "Transmission Performance Analysis of Multi-Carrier Modulation in Frequency Selective Fast Rayleigh Fading Channel," in *Wireless Personal Communications*, 2nd ed., New York: Kluwer Academic Publishers, 1996, pp. 335–356. 1.3 Concluding Remarks 17.
- [18] Rappaport, T. S., *Wireless Communications: Principles and Practice*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [19] Steel, R., (ed.), *Mobile Radio Communications*, Piscataway, NJ: IEEE Press, 1994.
- [20] Ramjee Prasad. "OFDM for wireless communication system". Artech house, 2004.
- [21] P. Moose, 'A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction', *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 42, No. 10, Octobre 1994, pp. 2908 – 2914.
- [22] Eric Phillip LAWREY BE (Hons). "Adaptive Techniques for Multiuser OFDM". Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering Thesis , science School of Engineering, JamesCook University ,December 2001.
- [23] R. W. CHANG : Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. *Bell System Technical Journal*, volume 46, pages 1775–1796, Dec. 1966.
- [24] Mérouane Debbah. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) Mobile Communications Group, Institute Eurecom.
- [25] *Digital Video Broadcasting (DVB) : Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services - Ref. ETSI EN 300 421 v1.1.2*, Aug. 1997.

-
- [26] Digital Video Broadcasting (DVB) : Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications - Ref. ETSI EN 302 307 v1.1.1, June 2004.
- [27] Digital Video Broadcasting (DVB) : User guiderlines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2) - Ref. ETSI TR 102 376 v1.1.1, Feb. 2005.
- [28] Shinsuke Hara et Ramjee Prasad. Multicarrier techniques for 4G mobile Communications. Artech House 2003.
- [29] Barry Dunbar. Software Simulator Development for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Modulation Bachelor of Engineering University of Southern Queensland Faculty of Engineering & Surveying November, 2006.
- [30] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013- 2018," Whitepaper , February 2014.
- [31] Steigerwald, D.A; Bhat, J.C.; Collins, D.; Fletcher, Robert M.; Holcomb, M.O.; Ludowise, M.J.; Martin, P.S.; Rudaz, S.L., "Illumination with solid state lighting technology," Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of , vol.8, no.2, pp.310,320, Mar/Apr 2002.
- [32] Cole, M.; Clayton, H.; Martin, K., "Solid state lighting: The new normal in lighting," PCIC Europe (PCIC EUROPE), 2013 Conference Record , vol., no., pp.1,9, 28-30 May 2013.
- [33] R. U.-R. Sm, « Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande », Union Internationale des Télécommunications, 2018.
- [34] L. U. Khan, « Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges », Digital Communications and Networks, vol. 3, no 2, p. 78-88, mai 2017.
- [35] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, et P. Mohapatra, « Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges », IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 17, no 4, p. 2047-2077, Fourthquarter 2015.
- [36] C. Le Bas, « Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil », Université de Limoges, 2017.

- [37] C. L. Dizes, O. Coponet, R. Pavec, S. Dorgere, et S. Jeanneteau, « Les enjeux et les opportunités offertes face au Wi-Fi », Institut national des sciences appliquées, Rennes, 2015.
- [38] Z. Wang, Q. Wang, W. Huang, et Z. Xu, Visible light communications: modulation and signal processing. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2017.
- [39] Afgani, M.Z.; Haas, H.; Elgala, H.; Knipp, D., "Visible light communication using OFDM," Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2006. TRIDENTCOM 2006. 2nd International Conference on , vol., no., pp.6 pp.,134.
- [40] Vučić, J.; Fernández, L.; Kottke, C.; Habel, K.; Langer, K.-D., "Implementation of a realtime DMT-based 100 Mbit/s visible-light link," Optical Communication (ECOC), 2010 36th European Conference and Exhibition on , vol., no., pp.1,5, 19-23 Sept. 2010.
- [41] Terra, D.; Kumar, N.; Lourenco, N.; Alves, L.N.; Aguiar, Rui L., "Design, development and performance analysis of DSSS-based transceiver for VLC," EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE , vol., no., pp.1,4, 27-29 April 2011.
- [42] Hao Le Minh; O'brien, D.; Faulkner, G.; Lubin Zeng; Kyungwoo Lee; Daekwang Jung; Yunje Oh, "80 Mbit/s Visible Light Communications using pre-equalized white LED," Optical Communication, 2008. ECOC 2008. 34th European Conference on , vol., no., pp.1,2, 21-25 Sept. 2008.
- [43] Hanzo, L.; Haas, H.; Imre, S.; O'brien, D.; Rupp, M.; Gyongyosi, L., "Wireless Myths, Realities, and Futures: From 3G/4G to Optical and Quantum Wireless," Proceedings of the IEEE , vol.100, no.Special Centennial Issue, pp.1853,1888, May 13 2012.
- [44] Liu, C.; Sadeghi, B.; Knightly, E. W., "Enabling vehicular visible light communication (V2LC) networks," Proceedings of the Eighth ACM international workshop on Vehicular inter-networking (VANET '11), ACM, New York, NY, USA, 41-50, 2011.
- [45] C. Medina, M. Zambrano, et K. Navarro, « LED BASED VISIBLE LIGHT COMMUNICATION: TECHNOLOGY, APPLICATIONS AND CHALLENGES – A SURVEY », vol. 8, no 4, p. 15, 2015.

- [46] A. Cailean, « Etude et réalisation d'un système de communications par lumière visible (VLC/LiFi). Application au domaine automobile », Thèse de doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, France, 2014.
- [47] « An IEEE Standard for Visible Light Communications | Visible Light Communications ». [En ligne]. Disponible sur: <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/>. [Consulté le: 18-mars-2019].
- [48] « EP-Light Visible Light Communication BoosterPack - MSP Microcontroller Projects -Launch Your Design - TI E2E Community ». [En ligne]. Disponible sur: <https://e2e.ti.com/support/archive/launchyourdesign/m/msp430microcontrollerprojects/665142>. [Consulté le: 18-mars-2019].
- [49] M. Falcitelli et P. Pagano, « Visible Light Communication for Cooperative ITS », in *Intelligent Transportation Systems*, vol. 52, M. Alam, J. Ferreira, et J. Fonseca, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2016, p. 19-47.
- [50] Rahaim, M.B.; Vegni, AM.; Little, T. D C, "A hybrid Radio Frequency and broadcast Visible Light Communication system," *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2011 IEEE , vol., no., pp.792,796, 5-9 Dec. 2011.
- [51] <http://postscapes.com/wifi-lights>
- [52] Khalid, A M.; Cossu, G.; Corsini, R.; Choudhury, P.; Ciaramella, E., "1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation," *Photonics Journal, IEEE* , vol.4, no.5, pp.1465,1473, Oct. 2012.
- [53] Fang-Ming Wu; Chun-Ting Lin; Chia-Chien Wei; Cheng-Wei Chen; Zhen-Yu Chen; Hou-Tzu Huang, "3.22-Gb/s WDM visible light communication of a single RGB LED employing carrier-less amplitude and phase modulation," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, 2013 , vol., no., pp.1,3, 17-21 March 2013.
- [54] J. Armstrong, "OFDM for Optical Communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 189–204, Feb. 2009.
- [55] D. Tsonev, S. Sinanovic, and H. Haas, "Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for Optical Wireless," in *Proc. of the Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, IEEE. Yokohama, Japan: IEEE, May 6–9 2012.

-
- [56] J. Armstrong and B. J. C. Schmidt, "Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN," *IEEE Communication Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 343–345, May 2008.
- [57] Zhang, T., Ghassemlooy, Z., Ma, C., & Guo, S. (2017). PAPR reduction scheme for ACO-OFDM based visible light communication systems. *Optics Communications*, 383, 75-80.
- [58] Aly, B. (2016). Performance analysis of adaptive channel estimation for U-OFDM indoor visible light communication. *Radio Science Conference*(pp.217-222). IEEE.
- [59] Zhou, J., & Qiao, Y. (2015). Low-PAPR asymmetrically clipped optical OFDM for intensity-modulation/direct-detection systems. *IEEE Photonics Journal*, 7(3), 1-8.
- [60] Alaka, S. P., Narasimhan, T. L., & Chockalingam, A. (2016). Coded Index Modulation for Non-DC-Biased OFDM in Multiple LED Visible Light Communication. *Vehicular Technology Conference* (pp.1-5). IEEE
- [61] R. Mesleh, H. Elgala, e H. Haas, «On the Performance of Different OFDM Based Optical Wireless Communication Systems», *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, n. 8, pp. 620–628, Ago.2011.
- [62] He, C., & Armstrong, J. (2016). Clipping noise mitigation in optical OFDM systems. *IEEE Communications Letters*, PP(99), 1-1
- [63]] A. Cordier et R. Vandepopeliere, « Le Li-Fi », *Printemps des Sciences - Exposition des Sciences*, Bruxelles,2017.
- [64] H. D. Ahlawat, G. Menon, et G. Chhabra, « Advanced Light Fidelity (Li-Fi) System », vol. 03, no 04, p. 4,2016.
- [65] Hikmatyarsyah, S. Rahardjo, et J. Junde, « Light Fidelity (Li-Fi): Security andMarket Sector »:, in *Proceedings of the 7th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*, Prague, Czech Republic, 2019, p.154- 162.