



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
Et de la Recherche scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



Faculté de Technologie
Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Science et Technologie

Filière : Télécommunications
Spécialité : Systèmes de télécommunications

Réalisé par :

Kahla Abdelmounaim & Yacin Derdega

Thème :

**impact de facteur scaling sur les performances
du VLC OFDM**

Devant le jury composé de:

Dr. LAKHDAR Nacer eddin MCA

Président

Dr. KHALIL Abd elatif MCB

Examineur

Dr. Reda Touhami MCA

Encadreur

Juin 2021

Acknowledgments :

Tout d'abord, remerciez Allah pour son succès avec nous. Nous remercions également notre famille pour le soutien moral et matériel qui nous a accompagnés tout au long de notre vie académique.

Nous remercions également le Dr Reda Touhami pour nous avoir guidé et supervisé et également pour son soutien et son assistance dans tous les problèmes que nous avons rencontrés lors de la préparation de cette thèse.

Abstract

Visible light communication (VLC) is a promising system in optical wireless communication . Due to the advantages it offers that are not available in other systems, such as electromagnetic interference that does not exist and its exploitation of the visible spectrum. It is also an alternative to the wireless intercom system. And because VLC requires high data rates, OFDM is capable of transmitting high data rates. DCO-OFDM technology came to link the two systems to reach the highest level of information transfer

Therefore, we focused in this research on the study and analysis of the DCO - OFDM system, and also clarifying the effect of facteur scaling on the performance of the system in terms of BER/SNR and PAPR in 4-QAM 16-QAM 64-QAM modulation techniques

المخلص

الاتصالات الضوئية المرئية (VLC) هي نظام واعد في الاتصالات اللاسلكية الضوئية نظرا لما تقدمه من مميزات لا تتوفر في باقي الانظمة الاخرى مثل التداخل الكهرومغناطيسي الغير موجود واستغلاله للطيف المرئي . والتي تعتبر بديل لنظام الاتصال اللاسلكي الداخلي .ولأن نظام ال VLC يتطلب معدلات بيانات عالية ، فإن ال OFDM قادر على إرسال معدلات بيانات عالية . وجاءت تقنية DCO-OFDM للربط بين النظامين للوصول الى اعلى مستوى من نقل المعلومات .لذلك ركزنا في هاته المذكرة على دراسة وتحليل نظام DCO - OFDM وايضا توضيح تأثير α على أداء ال BER و PAPR في تقنيات تضمين (4-16-64) QAM.

Résumé

Les communications par la lumière visible (VLC) sont système prometteur dans les communications optiques sans fil, Parce qu'il offre des propriétés qu'elle procure qui ne sont pas disponibles dans d'autres systèmes tels que les interférences électromagnétiques inexistantes et son exploitation du spectre visible. qui est une alternative au système d'interphone sans fil .Et parce que VLC nécessite des débits de données élevés, OFDM est capable de transmettre des débits de données élevés. La technologie DCO-OFDM est venue relier les deux systèmes pour atteindre le plus haut niveau de transfert d'informations.

Par conséquent, dans notre recherche, nous sommes concentrés sur l'étude et l'analyse du système DCO - OFDM, ainsi que sur la clarification l'effet du facteur d'échelle sur ce système en termes de BER/SNR et PAPR Dans les techniques de modulation 4-QAM 16-QAM 64-QAM.

Table of contents	
Acknowledgments	2
Abstract	3
ملخص	4
Résumé	5
Table of content	6
List of Tables	9
List of Figures	10
List of Acronyms	12
Introduction	14
Chapitre I: communications par lumière visible	
I.1 Introduction	17
I.2 Histoire du VLC	17
I.3 ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMUNICATION VLC	17
I.3.1 L'émetteurVLC	18
I.3.2 Le récepteur VLC	18
I.3.3 Canal de transmission	19
I.4 Avantages de la lumière visible	19
I.5 Collecte des activités liées au VLC dans les pays	20
I.5.1 Recherche VLC en Chine	20
I.5.2 Recherche VLC au Japon	20
I.5.3 Recherche VLC en Corée	20
I.5.4 Recherche VLC aux Pays-Bas	20
I.5.5 Recherche VLC en Turquie	20
I.6 Topologies de réseau VLC	20
I.7 Les modulations associées aux communications VLC	21
I.7.1 La Modulation OOK	21
I.7.2 La modulation VPPM	22
I.7.3 La modulation CSK (Color shift keying)	23

I.8 Classification des liens optiques	24
I.8.1 Liens LOS	24
I.8.2 Liens diffus (NLOS)	25
I.9 Sécurité du VLC	25
I.9.1 Sécurité humain	25
I.9.2 Sécurité réseau	25
I.10 Application	26
I.11 Conclusion	26
Chapitre II: technique de modulation OFDM	
II.1 Introduction	29
II.2 Historique	29
II.3 Transmission Multi porteuses	29
II.4 Modulation et démodulation OFDM	32
II.4.1 Intervalle de Garde	36
II.4.2 Préfixe Cyclique (CP)	36
II.4.3 Suffixe Cyclique (CS)	37
II.4.4 Technique Zéro Padding (ZP)	38
II.4.5 Bande de garde	40
II.4.6 Taux d'Erreur Binaire (TEB)	40
II.5 APPLICATIONS l'OFDM	41
II.5.1 Systèmes sans fil mobiles et fixes	41
II.5.2 Radio cognitive	42
II.5.3 MB-OFDM pour les systèmes UWB	43
II.6 Avantages et inconvénients de l'OFDM	43
II.6.1 Avantages	43
II.6.2 Inconvénient	43
II.7 Conclusion	44
Chapitre III: Résultats de la simulation	
III.1 Introduction	45
III.2 VLC-OFDM	45

III.3 DCO-OFDM	45
III-4 Résultats de la simulation DCO-OFDM	48
III.5. Conclusion	51
Conclusion général	52
Bibliographie	54

List of Tables	
Chapitre I : communications par lumière visible	
Tableau I.1: Modulation CSK	23
Chapitre II : technique de modulation OFDM	
Tableau II.1: Quelques paramètres de 802.16.(a) 802.16-2004. (b) IEEE 802.16e-2005	41
Tableau II.2: Paramètres de MB-OFDM-BASED UWB	42

List of Figures	
Chapitre I : communications par lumière visible	
Figure I.1: Schéma fonctionnel d'un système VLC	18
Figure I.2: Canal de transmission IM/DD	19
Figure I.3: Le spectre électromagnétique[8]	20
Figure I.4: Topologies MAC prises en charge par IEEE 802.15.7.[9]	21
Figure I.5: Schéma de modulation OOK.[13]	22
Figure I.6: Modulation VPPM.[11]	22
Figure I.7: Modulation CSK.[9]	23
Figure I.8: Canal de communication de la lumière visible et propagation de la lumière, adapté de [15] (a) LOS directe. (b) LOS non directe. (c) Lumière diffuse	24
Figure I.9: types des liens optiques	25
Chapitre II : technique de modulation OFDM	
Figure II.1 Structure de système de transmission multi canal	30
Figure II.2: Structure du système de transmissions multi-porteuse	31
Figure II.3: Structure et caractéristique spectrale du schéma de transmission OFDM	32
Figure II.4 : Schéma de principe illustratif de la modulation OFDM et de la démodulation	35
Figure II.5: Schéma Bloc d'un système OFDM	36
Figure II.6: Effet IES / ICI selon le point de départ de la fenêtre FFT	37
Figure II.7: Symbole OFDM avec CP et CS	38
Figure II.8: Effet d'un canal multi-voies sur les symboles OFDM avec ZP	39
Figure II.9: Copier et ajouter l'intervalle de garde du symbole suivant dans la partie tête du courant Symbole pour empêcher ICI	39
Figure II.10: spectres de puissance de deux symboles ofdm, un avec zp et un avec cp	40
Chapitre III : technique de modulation OFDM	
Figure III.1: schéma fonctionnel simplifié de l'émetteur DCO-OFDM	47

Figure III.2: BER vs SNR pour 4-QAM DCO-OFDM avec différents valeurs de α	49
Figure III.3: CCDF vs PAPR0 pour 4-QAM DCO-OFDM pour différentes valeurs de α	50
Figure III.4: BER vs SNR pour 16-QAM DCO-OFDM avec différents valeurs de α	50
Figure III.5: CCDF vs PAPR0 pour 16-QAM DCO-OFDM pour différentes valeurs de α	51
Figure III.6: BER vs SNR pour 64-QAM DCO-OFDM avec différents valeurs de α	51
Figure III.7: CCDF vs PAPR0 pour 64-QAM DCO-OFDM pour différentes valeurs de α	52

Acronymes:

BER	Bit Error Rates
CP	Préfixe Cyclique
CSK	Color Shift Keying
DAC	Digital Analog Converter
DCO	Direct Current biased Optical
DCO-OFDM	Direct current-Biased optical
DFT	Discrete Fourier Transformation
FFT	Fast Fourier Transform
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
ICI	inter-carrier Interference
IEC	Interférence Entre Canal
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEP	Interférence Entre Porteuse
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IM/DD	Intensity Modulation/ Direct Detection
ISI	Inter-Symbol Interference
LED	Light Emitting Diode
Li-Fi	Light Fidelity
LOS	Line of Sight
MAC	Media Access Control
MB	Multibande
MB-OFDM	Multibande OFDM
MIMO	Multiple Input-Multiple Output
NLOS	No Line of Sight
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ook	On Off Keying
OWC	Optical Wireless Communications
PAPR	PEAK to AVERAGE POWER RATIO

QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature phase-shift keying
RF	RADIO FREQUENCY
STO	Symbole Timing Offset
TEB	Taux d'Erreur Binaire
TDCS	transformation domaine communication système
UWB	ultra wideband
VLC	Visible Light Communication
VPPM	Variable Pulse Position Modulation
ZP	Zéro padding

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Dans les systèmes de communication mobile sans fil modernes, la technologie dominante lors de l'accès aux réseaux de transmission de données est la radiofréquence. Avec des attentes d'une augmentation significative de la transmission de l'information, ainsi, avec la demande croissante de services de données à haut débit, le spectre des fréquences radio devient rare et encombré. De plus, les communications basées sur les radiofréquences souffrent de la propagation multi-trajets. Ce qui réduit ses performances et sa qualité, ce qui signifie que peu de canaux à haut transmission peuvent être accueillis dans une zone donnée. Et comme nous savons que la plupart du trafic sans fil se produit à l'intérieur des environnements intérieurs, par conséquent, des solutions doivent être recherchées pour le système sans fil interne.

L'une de ces solutions est le système VLC, où VLC exploite le spectre visible (390-700 nm) et donc par rapport aux communications RF, il offre une bande passante plus élevée, un spectre sans licence, des interférences électromagnétiques inexistantes et une meilleure sécurité pour les systèmes intérieurs où la lumière est limitée aux dimensions de la zone de couverture. De plus, VLC est une technologie respectueuse de l'environnement car les lumières LED sont économes en énergie et les sources lumineuses sont hautement contrôlables.

Étant donné que le système VLC nécessite des débits de données élevés, une technologie de modulation capable de transmettre des débits de données élevés avec une efficacité spectrale élevée doit être envisagée. L'OFDM est capable de transmettre des débits de données élevés sur des sous-porteuses orthogonales qui se chevauchent, ce qui se traduit par une efficacité spectrale élevée avec une plus grande précision et moins de complexité, ainsi que la réduction des effets de dispersion des canaux tels que les interférences entre symboles (ISI) et les interférences entre porteuses (ICI). La technologie DCO-OFDM a été utilisée comme technologie de base pour le système VLC-OFDM.

Dans le premier chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'étude du système VLC avec une explication de ses principes et bases, son fonctionnement, sa mise en œuvre, ses avantages et ses inconvénients. Dans le deuxième chapitre, nous expliquerons le système OFDM avec une explication de la méthode de sa formation, ses avantages, ses inconvénients et ses applications. Comme pour le chapitre trois, nous expliquerons en détail le système DCO-OFDM, en examinant l'effet du facteur d'échelle sur ce système. Ensuite, nous résumerons toutes les connaissances acquises grâce à cette étude dans la conclusion finale.

Nous simulerons l'effet du facteur d'échelle sur les performances du système DCO-OFDM dans Matlab prenant en compte des paramètres BER, SNR et PAPR dans les techniques de modulation (4-16-64) QAM.

CHAPITRE 1:
COMMUNICATIONS PAR LUMIÈRE
VISIBLE

I.1.Introduction

La communication était depuis longtemps un des soucis majeurs de l'homme. On peut classer les techniques de communications en deux grandes familles : les techniques filaires et les techniques sans fils. Le VLC(abreviation des termes anglais Visible Light Communication), à l'instar du Wi-Fi (wireless fidelity) appartient aux deuxièmes familles. Le Wi-Fi utilise des ondes hertziennes, Tandis que le VLC utilise la lumière.La technologie ainsi que les techniques du VLC sont actuellement en phase de développement, mais à grande vitesse. Cette technologie qui est lancée ce siècle, présente une innovation qui peut faciliter la vie humaine. Elle doit être adaptée aux applications et aux besoins de la vie quotidienne. La technique du VLC permet d'atteindre des vitesses de transmission qui dépassent de loin celles du Wi-Fi. Ce qui a orienté les travaux actuels vers l'exploitation du VLC dans l'internet bidirectionnelle en très haut débit (gigabit par seconde). Dans ce chapitre, nous allons étudier le système VLC.

I.2.Historique du VLC

En Août 2011 lors d'une conférence TED, Harald Haas, professeur à l'université d'Edimbourg présenta ses recherches sur le VLC (Visible Light Communication), mettant en avant les avantages de la technologie.Il oriente ses recherches vers différents aspects d'un bon moyen de communication:

la capacité à transmettre beaucoup d'informations, le rendement énergétique, la disponibilité et la sécurité des transmissions.Lors de la conférence, il parle des débits qu'il a réussi à mettre en place avec le VLC et il promet une augmentation rapide de ces débits pour prouver la capacité de la technologie. Il insiste ensuite sur le fait que l'ampoule à LED permette le rendement et la disponibilité. Il présente aussi des applications où la sécurité est un avantage du VLC: milieu hospitalier, aviation etc.Cette conférence a été largement relayée par les médias scientifiques et technologiques, révélant au public l'existence de telles technologies.

Bien qu'Harald Haas ait présenté la technologie, de nombreuses entreprises et chercheurs travaillaient déjà sur la communication par lumière visible, sans pour autant communiquer publiquement. Le nom "Li-Fi" connu par le public est plus rarement utilisé dans l'industrie, où on parle plus de VLC (Visible Light Communication) [1].

I.3.ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMUNICATION VLC

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

•L'émetteur

transforme un signal électrique en puissance optique rayonnée (Modulation) à travers d'une LED ou LD

•Le canal

l'environnement dans lequel l'onde se propage (LOS+NLOS)

•Le récepteur

détecte une puissance optique par unité de surface via une photodiode PD \Rightarrow signal électrique (Démodulation).

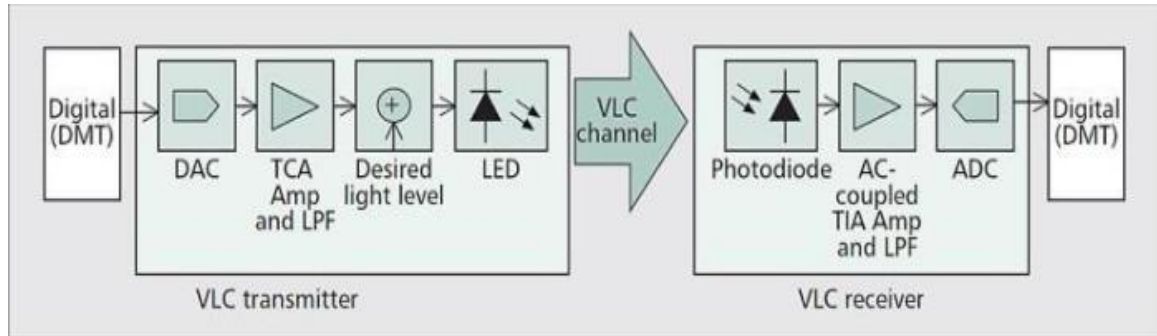


Figure I.1 Schéma fonctionnel d'un système VLC

I.3.1.L'émetteurVLC

Un émetteur VLC est un appareil qui transforme des données dans les messages qui peuvent être envoyés sur le moyen d'expression optique spatial libre en utilisant la lumière visible. Le but de l'émetteur VLC est d'émettre la lumière et transmettre des données en même temps. Les paramètres de l'émetteur VLC sont principalement limités par les caractéristiques des LEDs [2]. La LED convertit un signal électrique en énergie optique fournissant à la fois un éclairage et une communication. Les informations sont codées en ligne et modulées par le DAC, puis transmises au signal optique en modulant l'amplitude ou une autre caractéristique de la lumière LED [3].

En raison de leur puissance d'émission relativement faible, les LEDs sont généralement utilisées pour des applications courtes distances et des bandes passantes de l'ordre de 155 Mbps [4].

I.3.2.Le récepteur VLC

Le récepteur VLC est utilisé pour extraire les données du faisceau lumineux modulé, il transforme la lumière en un signal électrique qui sera démodulé et décodé par le décodeur intégré [2].

Les performances du système VLC sont influencées par les performances du récepteur VLC, la lumière incidente n'est pas seulement due à l'émetteur mais à d'autres sources de lumière (naturelles ou artificielles), le récepteur est exposé aux interférences importantes. Les performances du récepteur VLC peuvent être améliorées en utilisant un filtre optique qui enlève les composants du spectre non souhaitables [5].

I.3.3. Canal de transmission

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

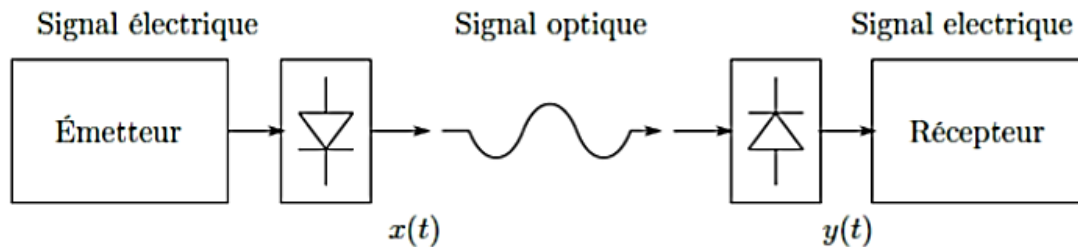


Figure I.2 Canal de transmission IM/DD

Dans un système IM/DD, l'information n'est pas portée par la fréquence ou la phase mais par l'intensité du signal optique. La conversion entre le signal électrique et l'intensité optique $x(t)$ est réalisée par une diode électroluminescente (LED). L'onde optique est alors propagée sur le canal optique sans fil. En réception, il est nécessaire de réaliser la conversion inverse permettant de revenir au domaine électrique. Cette fonction est assurée par la photodiode. La photodiode réalise une détection directe i.e. elle produit un photo-courant $y(t)$ proportionnel à l'intensité optique reçue. L'objectif principal du récepteur est de déterminer l'information contenue dans $x(t)$ à partir du signal reçu $y(t)$ [6].

I.4. Avantages de la lumière visible

La technologie VLC, regroupe toutes les technologies utilisant la lumière visible pour communiquer. Dans notre cas, l'utilisation de la lumière visible est très importante. En effet, le spectre du visible est aujourd'hui quasiment inutilisé en termes de communication, contrairement au spectre électromagnétique des ondes radios. De nombreux systèmes utilisent déjà de très larges bandes passantes que ce soit pour la radio, la télévision, la téléphonie mobile... Le spectre du visible est également près de 10 000 fois plus grand que le spectre électromagnétique des ondes radios. De plus cette technologie présente d'importants avantages en terme de sécurité. En effet, la lumière ne traversant pas les murs, les informations envoyées sont donc très sécurisées. Elles sont donc inaccessibles pour une personne à l'extérieur de la pièce où est utilisé le système de communication VLC. Enfin la technologie utilisée pour travailler avec des longueurs d'ondes du domaine visible est la technologie CMOS, une technologie déjà très largement maîtrisée aujourd'hui [7].

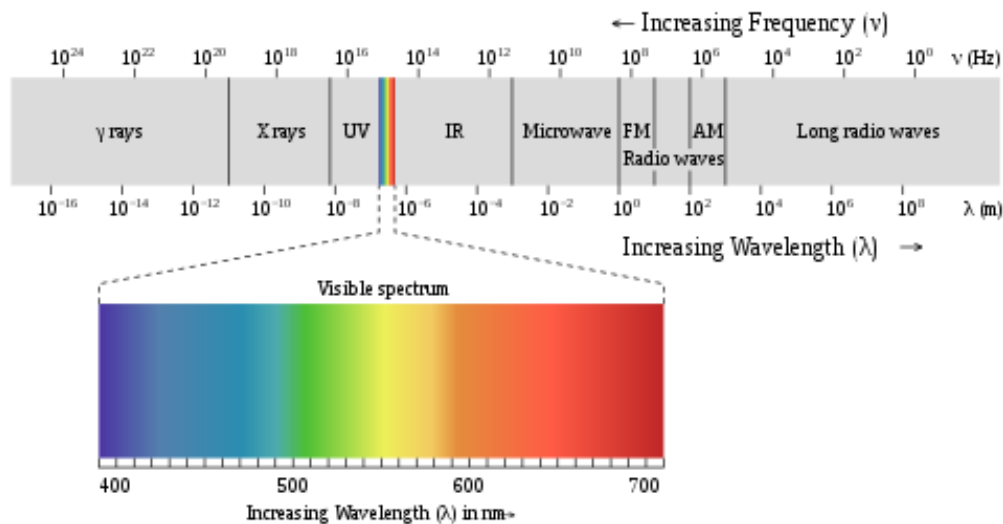


Figure I.3: Le spectre électromagnétique [8]

I.5. Collecte des activités liées au VLC dans les pays

I.5.1. Recherche VLC en Chine

Huawei, China Telecom, Sanan Optoelectronics, Shenzhen Absen, Unilumin et Cnlight sont les rares entreprises de développement de produits basées sur VLC en Chine.

I.5.2. Recherche VLC au Japon

Le laboratoire Nakagawa de l'Université Keio, Panasonic Corporation, CASIO, NEC et FUJI Electric sont l'institution / société de recherche et de développement de produits VLC au Japon

I.5.3. Recherche VLC en Corée

Université nationale des sciences et technologies de Séoul, Université Kookmin, Université Kongju, Université Namseoul, Samsung, LG et ETRI sont l'institution / société de recherche et de développement de produits VLC en Corée du Sud

I.5.4. Recherche VLC aux Pays-Bas

Université de technologie d'Eindhoven, département Technologie des télécommunications et électromagnétique, Communication électro-optique du groupe. Signify (récemment connu sous le nom de Philips Lighting), KPN et KIEN sont également partenaires dans des projets liés à VLC

I.5.5. Recherche VLC en Turquie

Les principales institutions de recherche travaillant sur le VLC sont Tubitak Bilgem, Okatem, l'Université Ozyegin et l'Université Medipol d'Istanbul. Ford Otosan, Farba, Aselsan et Turk Telekom sont partenaires dans des projets liés à VLC.

I.6.Topologies de réseau VLC

La norme IEEE 802.15.7 relative aux réseaux VPAN prend en charge trois topologies:pair à pair, étoile et mode diffusion

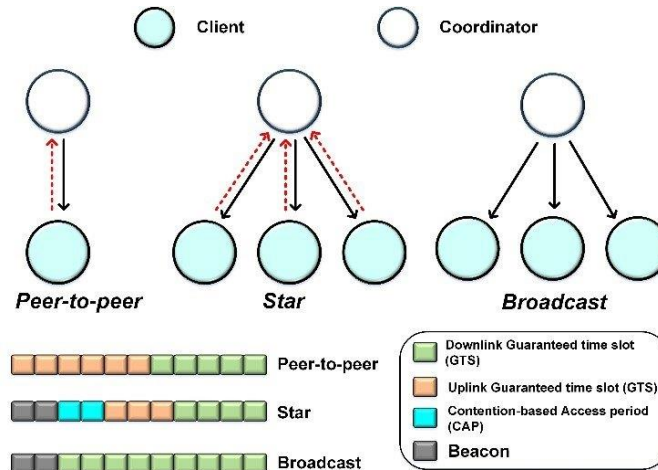


Figure I.4:Topologies MACprises en charge par IEEE 802.15.7.[9]

•Topologie en étoile

implique l'existence d'un noeud central, appelé “coordinateur”, qui est dédié au contrôle de la communication. Dans ce cas, un réseau indépendant sera créé, avec un identifiant de réseau personnel VLC unique.

•Topologie en pair-à-pair(peer to peer)

chaque appareil sera en mesure de communiquer directement avec tous les appareils dans son voisinage. Dans ce cas,un des deux noeuds impliqués agira comme coordonnateur, généralement le nœud qui initie la communication.

•Topologie en mode diffusion

Il s'agit de transférer des données d'un nœud à un autre ou à plusieurs nœuds sans configurer de réseau. Ce type de communication est unidirectionnel et aucune adresse de destination n'est requise.

I.7.Les modulations associées aux communications VLC

Les communications optiques sans fil ont des techniques de modulation audio associées, qui sont:

I.7.1.La Modulation OOK

Comme illustré à la figure I.10, 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.[11] Cinq débits différents sont utilisés, à savoir 11.67kbit/s, 24.44kbit/s, 48.89kbit/s, 73.3kbit/set 100 kbit/s. [10]

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.[12]

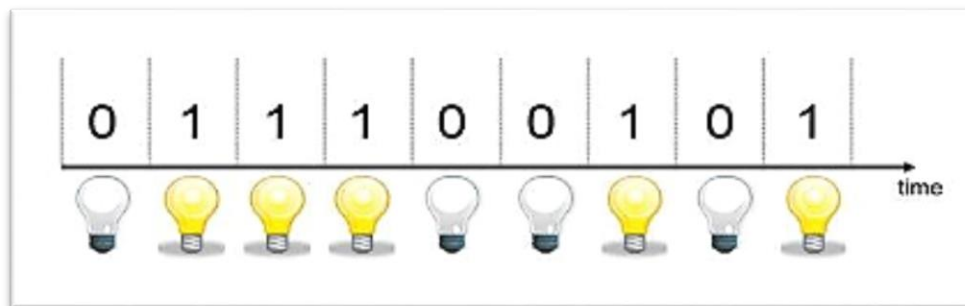


Figure I.5:Schéma de modulation OOK.[13]

I.7.2.La modulation VPPM

La modulation VPPM est une variante de la Pulse Position Modulation (PPM), développée spécifiquement pour les communications VLC. En modulation PPM, l'information est représentée par la position de l'impulsion dans le temps. La variante VPPM introduit en plus la variation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse Width Modulation), en fonction du niveau d'intensité lumineuse (voir Figure I.6).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. [14]

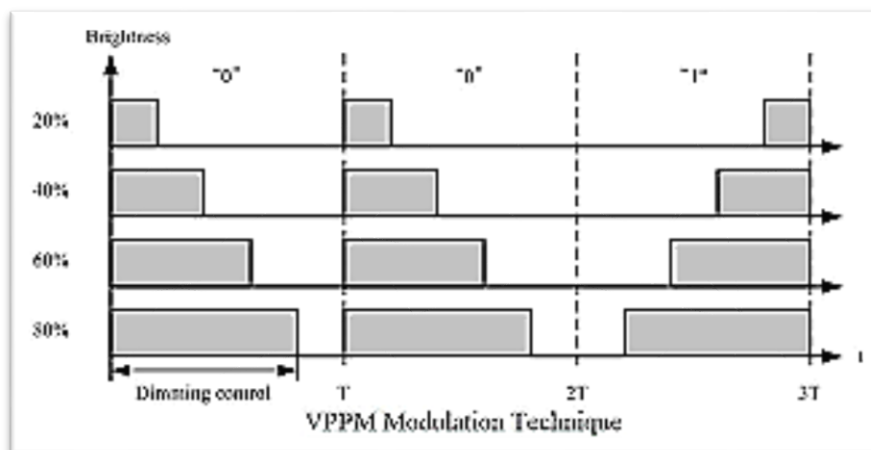


Figure I.6 : Modulation VPPM.[11]

I.7.3.La modulation CSK (Color shift keying)

À 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 produit 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 (RedGreenBlue). 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 visibles à l'œil en deux paramètres de couleur. Elle montre les sept bandes de longueurs d'onde visibles à l'œil indiquées dans le tableau avec leurs centres indiqués dans le diagramme. [9-14].

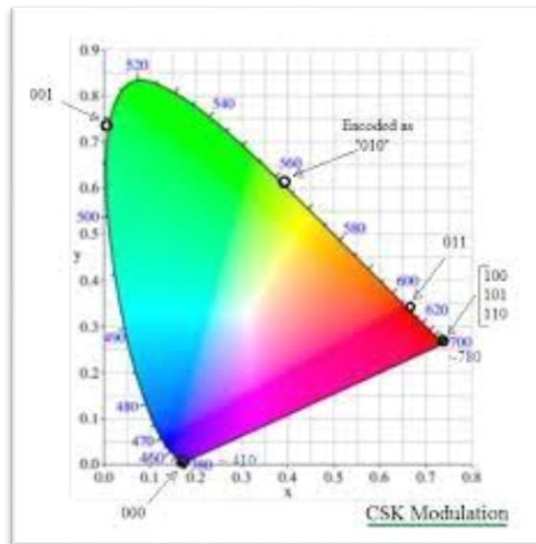


Figure I.7 : Modulation CSK. [9]

Tableau I.1 Modulation CSK

band(nm)	code	Center(nm)	(x,y)
380-478	000	429	(0.169,0.007)
478-540	001	509	(0.011,0.733)
540-588	010	564	(0.402,0.331)
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)

I.8. Classification des liens optiques

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

I.8.1. Liens LOS

Dans les systèmes VLC intérieurs, on suppose que l'utilisateur se trouve dans la ligne de visée de la source lumineuse. Dans de nombreux scénarios intérieurs, l'éclairage est fait délibérément par réflexion ou réfraction et est recouvert par des abat-jour, des couvercles et est retourné vers les murs ou d'autres objets. De tels réglages d'éclairage qui ne permettent pas une vue directe de la source lumineuse depuis les emplacements intérieurs peuvent avoir un impact sur la communication et l'expérience de l'utilisateur. La plupart des applications impliquant des systèmes VLC intérieurs proposent un mécanisme basé sur la LOS directe, comme le montre la figure I.8 a. doit être dans le champ de vision de l'émetteur. L'avantage de ce mécanisme est la réception d'un signal plus fort. D'autres configurations trouvées dans la littérature impliquent des mécanismes LOS non directs (Figure I.8 b) et une lumière diffuse (Figure I.8 c). Cependant, ces configurations ont des limitations en termes de débit de données, en raison de la perte de signal. La principale différence entre la configuration LOS et la configuration non LOS est l'intensité de la lumière reçue, qui est fortement influencée par l'angle et la direction de l'émetteur, où un angle plus large conduit à un signal plus faible, tandis qu'un angle plus étroit conduit à un signal plus fort: les utilisateurs peuvent se déplacer dans un environnement tout en utilisant les applications VLC. Lorsque l'appareil du récepteur est un appareil mobile tel qu'un smartphone, l'utilisateur peut constamment changer de direction et d'orientation. Ainsi, il existe un besoin de développer des techniques de communication à haut débit même si le récepteur n'est pas en vue directe de l'émetteur. La présence d'ombres peut réduire considérablement la lumière qui atteint le récepteur. Dans ce cas, la lumière réfléchiée par les obstacles pourrait être utilisée pour que le système réagisse efficacement lors des moments de blocage de la lumière. En termes pratiques, les systèmes commerciaux tels que le Li-Fi disposent déjà de mécanismes pour s'adapter à l'ombre et à d'autres obstacles.

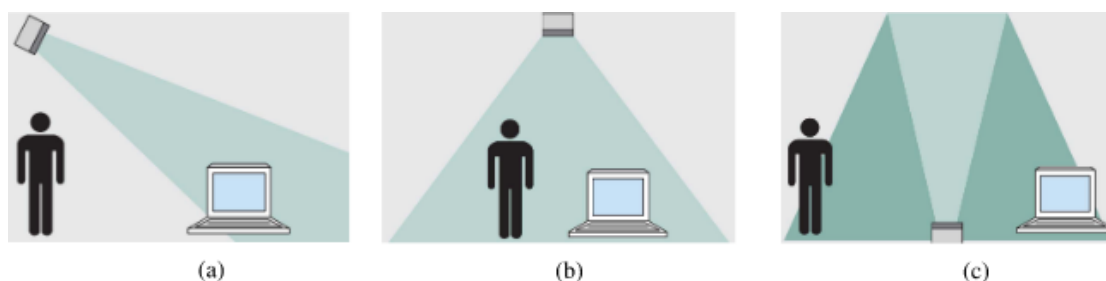


Fig. I.8. Canal de communication de la lumière visible et propagation de la lumière, adapté de [15] (a) LOS directe. (b) LOS non directe. (c) Lumière diffuse

I.8.2.Liens diffus (NLOS)

Les liens optiques diffus établissent un lien entre l'émetteur et le récepteur par l'intermédiaire d'au moins une réflexion sur une paroi de l'environnement indoor et utilisent des angles d'ouvertures élevés pour l'émetteur et un large FOV pour le récepteur. Cette topologie est plus robuste face aux phénomènes de blocage que les liens LOS. Ces liens permettent d'obtenir un grand degré de mobilité au prix d'une atténuation plus importante (ce qui diminue la puissance optique reçue) [6].

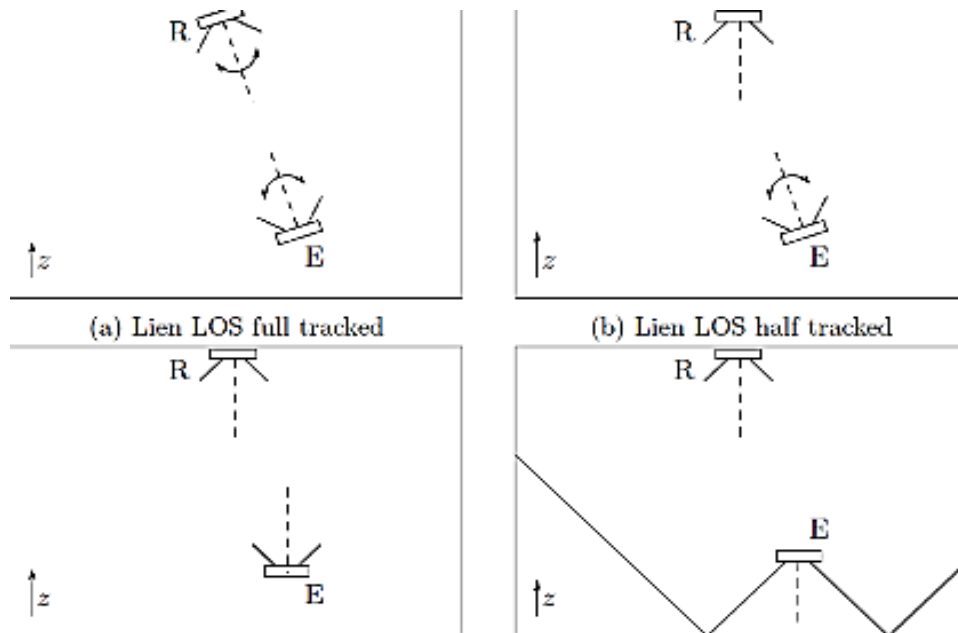


Figure I. 9 .types des liens optiques

I.9.Sécurité du VLC

Toute nouvelle technologie promise à un brillant avenir amène toutefois à se poser des questions quant à la sécurité humaine ou matérielle. Le Wi-Fi ayant quelques défauts dans ces deux domaines, nous sommes en droit de nous demander si le VLC peut poser également de tels problèmes.

I.9.1.Sécurité humaine

S'agissant de la sécurité humaine et notamment des ondes néfastes, il ne semble pour le moment y avoir aucun problème avec le VLC qui utilise les ondes lumineuses. La lumière existe depuis des années sans, pour autant, causer de tort à l'homme. Certaines personnes affirment qu'elles sont hypersensibles aux radiofréquences et recherchent une alternative. VLC est une bonne solution à ce problème [16].

I.9.2.Sécurité réseau

Du point de vu de la sécurité réseau, contrairement au Wi-Fi, le VLC ne traverse pas les murs. Toute intrusion ne peut se faire qu'à l'intérieur d'une même pièce. De plus, la lumière est directionnelle donc c'est une technologie intéressante pour les secteurs

d'activités et entreprises ayant besoin de sécuriser leurs informations et leurs communications. Mais pour le domaine public cela peut être un des inconvénients car dès lors qu'on ne se situe pas à proximité d'une lampe on perd le signal. Par contre le VLC ne peut pas être perturbé par d'autres spectres, car ceux-ci peuvent se superposer sans interférence. Ainsi à l'inverse du Wi-Fi on ne peut pas utiliser de brouilleur même lumineux. Un des derniers problèmes avec le VLC est que, si quelqu'un éteint la lumière ou si le capteur est obstrué la connexion internet est perdue. Nous pouvons donc constater que pour le moment il ne semble pas y avoir de risque aussi bien au niveau du réseau que de la santé. Comme avec chaque nouvelle technologie, c'est l'utilisation prolongée dans le temps du VLC qui nous permettra d'identifier d'éventuels problèmes de sécurité. Pour le moment en tout cas, le VLC est une alternative viable au souci rencontré avec le Wi-Fi [16].

I.10. Applications

La technologie VLC est encore en phase d'introduction et des efforts importants sont nécessaires avant de pouvoir être largement déployée pour des applications pratiques. Néanmoins, un certain nombre d'applications basées sur les LEDs a été déployé ou va l'être d'ici quelques années dans de nombreux secteurs

Voici quelques unes de ses applications:

● Aviation

Les passagers ne peuvent utiliser les ondes radio. Les éclairages à base de LED sont déjà utilisés dans les cabines d'avions 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.

I.11. Conclusion

Ce chapitre présente les principes de base des communications par lumière visible et l'architecture d'un tel système. Les avantages de cette technologie ont également été identifiés. Toutes ses caractéristiques avantageuses conduisent à considérer que la technologie de communication par lumière visible constitue un complément, voire dans certaines situations une alternative prometteuse aux systèmes de communications traditionnels par RF. Cependant, comme toute technologie, le VLC rencontre à son tour des

contraintes et des limites. Les principaux points faibles du VLC ont été détaillés au cours de ce chapitre. Les technologies de communication par lumière visible, actuellement en développement peuvent palier à certains de ses défauts, et même créer de nouvelles opportunités. Les bases technologiques utilisées par ces nouveaux moyens de communication, comme la LED, arrivent à maturation. Cela permettra donc de bonnes performances techniques et énergétiques ainsi qu'un coût de déploiement contenu. Les applications sont multiples : de la communication entre ordinateurs à la géolocalisation en passant par la communication entre appareils intelligents

TECHNIQUE DE MODULATION OFDM

II.1.Introduction

OFDM est le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence, et c'est une technique de multiplexage utilisée pour combiner un groupe de signaux en un seul signal afin qu'il soit transmis sur une seule bande,

La technologie OFDM est utilisée dans de nombreux domaines ,en raison de sa grande résistance aux interférences et des caractéristiques de la technique de transformation de Fourier (DFT).

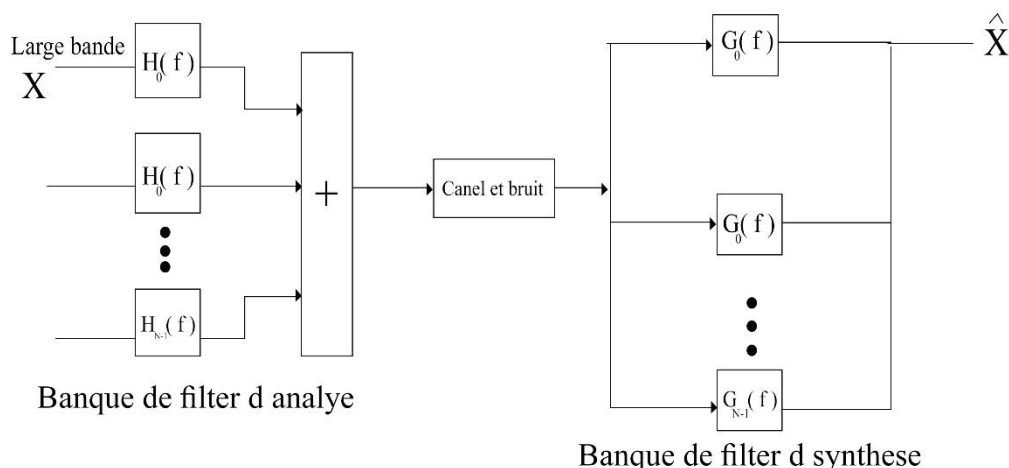
Dans ce chapitre, Nous allons nous familiariser avec la technique 'OFDM et ses caractéristiques.

II.2.Historique

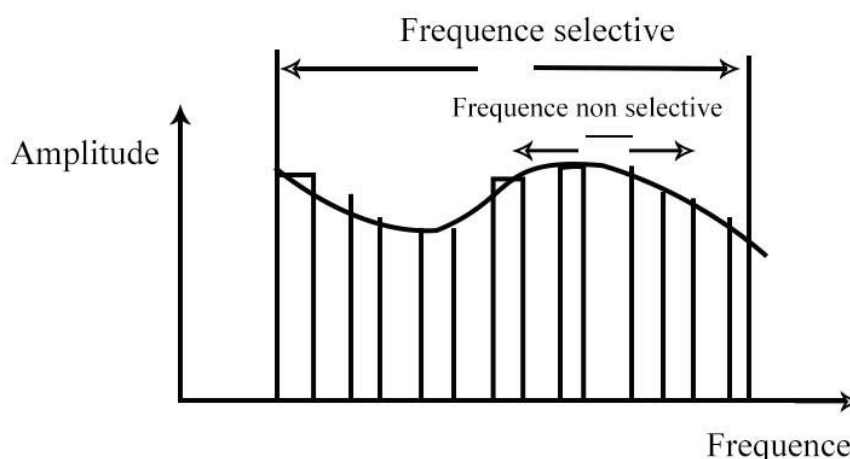
Le début des années 60 a vu la postulation du principe de transmission parallèle d'information à travers un seul canal par Chang. Dans ce même article, il a démontré plusieurs lemmes et théorèmes concernant les paramètres de la modulation (forme d'onde, espace entre les sous-porteuses, etc.....) pour assurer l'orthogonalité. Et à partir de là, on commençait à parler de " Orthogonal Frequency Division Multiplexing "(OFDM) comme un type de modulation multi-porteuses avec des propriétés bien précises (l'orthogonalité) . Juste après, Salt berg a analysé la performance de ces systèmes, et a conclu que l'efficacité des systèmes de transmissions parallèles doit se concentrer sur la réduction des interférences inter-canaux mieux que de se concentrer sur le perfectionnement d'un seul canal, En 1971, Weinstein et Ebert[17]proposent l'utilisation de la transformée de Fourier discrète afin de générer la modulation et la démodulation des signaux multi-porteuses. Cette avancée est alors déterminante pour les communications OFDM puisque les avancées dans le domaine du traitement des signaux numériques éliminent peu à peu les contraintes matérielles liées à la modulation. L'implantation totalement numérique de la transformée de Fourier voit alors la démocratisation des communications OFDM.A partir des années 90, les transmissions OFDM s'imposent graduellement dans un grand nombre de normes de communication.

II.3.Transmission Multi porteuses

Ici nous comptons de système multi porteuses pour la possibilité d'envoyer a des taux élevé sur un canal large bande de nature sélectif en fréquence. Le principe de fonctionnement de base du système est de découpe le signal a bande large (à travers des filtres $H_k(f)$ à bande étroites) en signaux a bande étroite au niveau de l'émetteur , Puis les synthétiser (à travers des filtres $G_k(f)$ à bande étroite adaptés aux filtres $H_k(f)$) au niveau du récepteur. Ainsi, un canal à bande large sélectif en fréquence peut être approximé par plusieurs canaux à bande étroite non sélectif en fréquence [18] (Figure II.1)



(a) La structure du système transmission multi canal



(b) La reponse frequentielle du de la transmission

II.1: Structure et caracteristique de frequence du ststeme de transmission multicanaux

Et ici il faut dire que la non sélectivité des canaux a bande étroite réduit la complexité des égaliseurs de chaque sous canal, On peut aussi dire que , Maintient l'ordre l'orthogonalité entre les sous canaux est maintenue, l'interférence entre les canaux peut être annulée, Un système multi canal, dont la bande est divisée en N sous-canal a bande étroite égales avec une fréquence de sous porteuse f_k , $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ (Figure II.2) et dont les symboles $X_S[k]$ sont modulés par les sous porteuses f_k transmis à chaque période L symbole, peut être considéré comme un système de transmission multi porteuse.

L'implémentation d'un tel système devient complexe puisqu'elle nécessite plus de codeurs/décodeurs, oscillateurs et des filtres de haute qualité surtout quand le nombre de sous-porteuse devient important. [19]

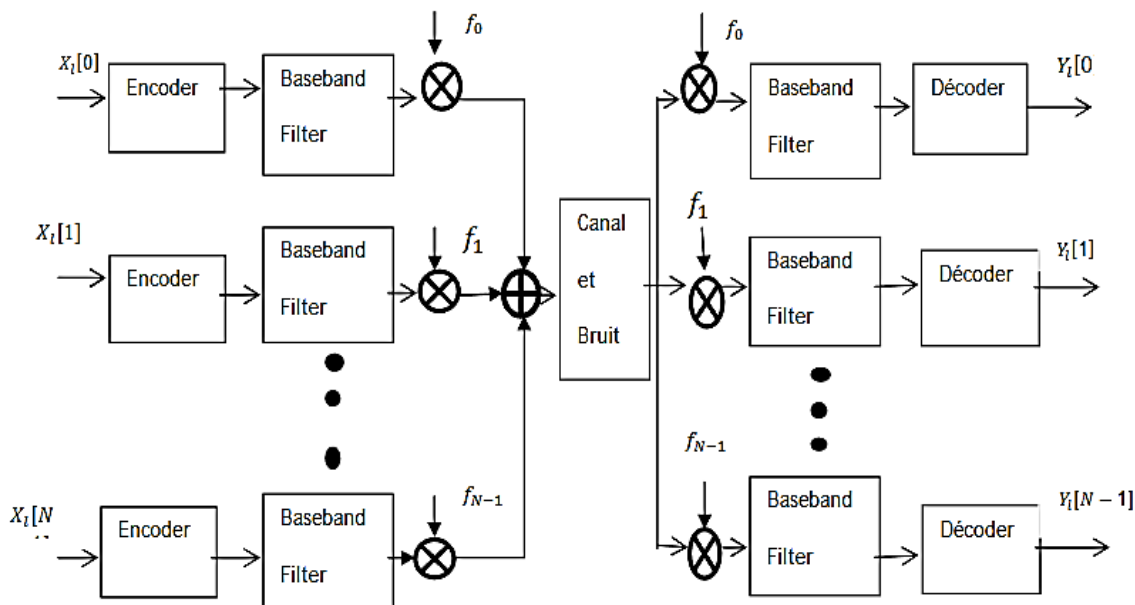
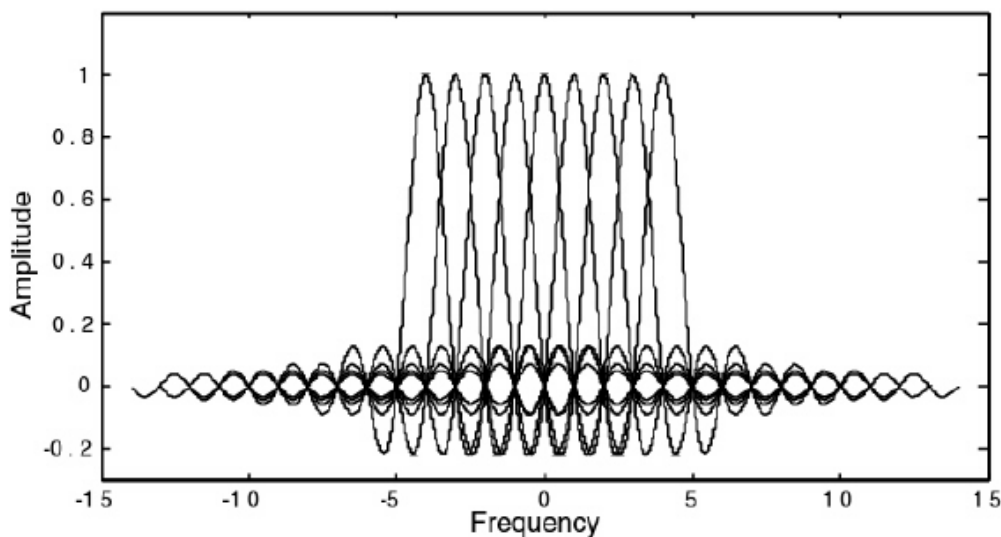
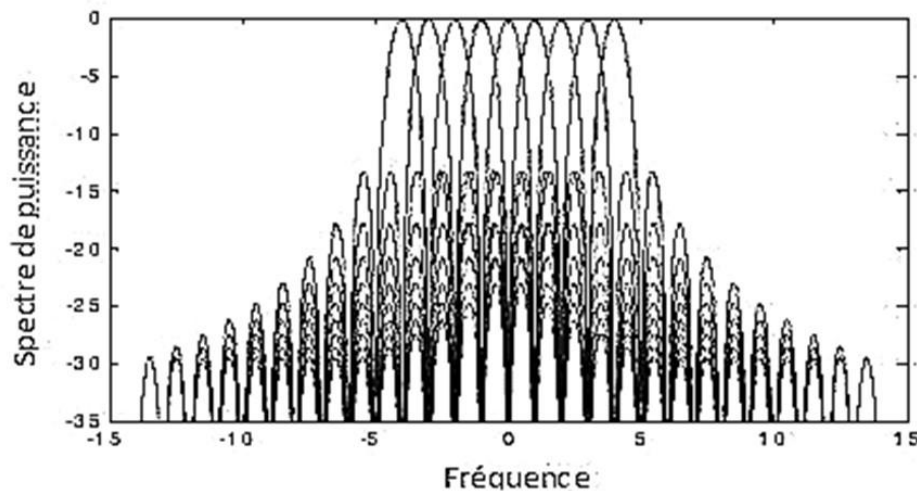


Figure II.2: Structure du système de transmissions multi-porteuses.

La transmission OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est un type de système multi-canal (Figure II.2). Les symboles $\{X_l [X]\}_{k=0}^{N-1}$ modulent N sous porteuses aux fréquences, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$. Lespectre du symbole OFDM est formé par N fonctions Sinus cardinal centrées aux fréquences f_k qui se chevauchent entre elles, ce qui permet d'augmenter l'efficacité spectrale.



(a) Le spectre du signal OFDM (échelle linéaire)



(b) spectre de puissance du signal OFDM (dB)

Figure II.3: Structure et caractéristique spectrale du schéma de transmission OFDM.

Si les différents sous porteuses sont représentés par les signaux complexes les signaux sont orthogonaux si les fréquences porteuses sont de la forme :

$$\frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi f_k t} e^{j2\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi \frac{k-i}{T_{sym}} t} dt = \begin{cases} 1; & \text{si } k = i \\ 0; & \text{si non} \end{cases} \quad (2.1)$$

De même, si on prend les échantillons discret au instant, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$, l'équation précédente devient dans le domaine discret:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sym}} n T_s} \cdot e^{-j2\pi \frac{i}{T_{sym}} n T_s} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k-i}{T_{sym}} n} = \begin{cases} 1; & \text{si } k = i \\ 0; & \text{si non} \end{cases} \quad (2.2)$$

Cette condition d'orthogonalité des signaux OFDM est essentielle pour éviter l'interférence entre canal (IEC), [20]

II.4.Modulation et démodulation OFDM

L'émetteur OFDM module les éléments binaires du message à transmettre en des symboles (PSK ou QAM). Ces symboles vont en suite être repartis en N flux parallèles. Chaque flux de symbole va moduler une sous porteuse différente.

Soit $X_i[k], i = 0, 1, 2, \dots, \infty$, le $i^{\text{ème}}$ symbole transmet sur la $k^{\text{ème}}$ sous porteuse. A cause de la répartition série / parallèle des symboles, la transmission de N symbole (PSK ou QAM) va durer NT_s , ce qui forme un seul symbole OFDM de durée $T_{sym} = NT_s$ avec (T_s : période PSK ou

QAM) . Si $\Psi_{s,k}(t)$ est le 1^{EME} signal OFDM en la k^{EME} sous porteuse, donnée sous la forme :

$$\Psi_{l,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})} & 0 < t < T_{sym} \\ 0; & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.3)$$

Alors, l'expression continue en bande de base des signaux OFDM est de la forme :

$$\begin{aligned} (t) &= \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{K=0}^{N-1} X_l[k] \Psi_{l,k}(t) \\ &= \sum_{t=0}^{+\infty} \sum_k^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Si on échantillonne aux instantt =

$$lT_{sym} + nT_s \quad \text{avec } T_s = \frac{T_{sym}}{N} \text{ et } f_k = \frac{k}{T_{sym}},$$

on obtient le symbole OFDM en temps discret :

$$X_l[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad \text{pour : } n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (2.4)$$

Cette expression n'est autre que l>IDFT des symboles (PSK ou QAM) $[X_l[k]]_{K=0}^{N-1}$ qui peut être efficacement calculée avec l'algorithme IFFT (transformé de fourrier rapide Inverse).

Au niveau du récepteur, l'on omettant l'effet du canal et du bruit, les symboles (PSK ou QAM) émit peuvent être reconstruits à partir du symbole bande de base OFDM reçu

$$y_l(t) = \sum_{K=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})} \quad (2.5)$$

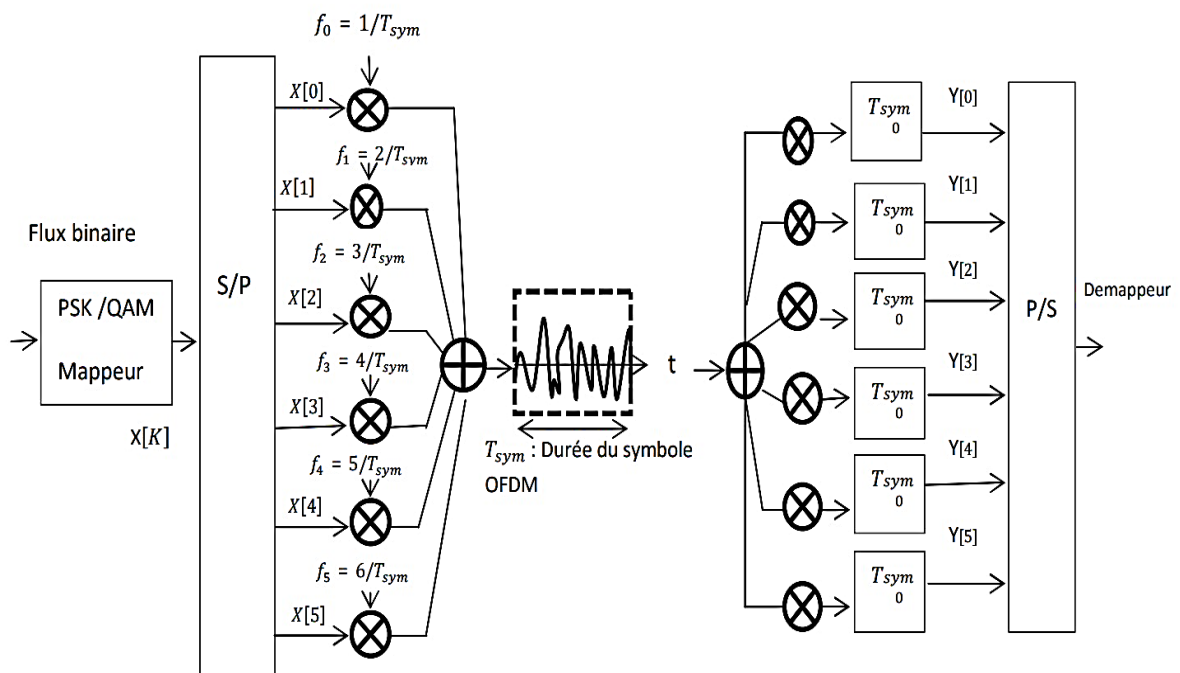
Grâce à l'orthogonalité entre les sous porteuses

$$\begin{aligned} Y_l[k] &= \frac{1}{T_{sym}} \int_{-\infty}^{+\infty} Y_l(t) e^{-j2\pi f_k(t-lT_{sym})} dt \\ &= \frac{1}{T_{sym}} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} X_l(i) e^{j2\pi f_i(t-lT_{sym})} \right\} e^{-j2\pi f_k(t-lT_{sym})} dt \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} X_l(i) \left\{ \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi f_i(f_i-f_k)(t-lT_{sym})} dt \right\} = X_l[k] \end{aligned} \quad (2.6)$$

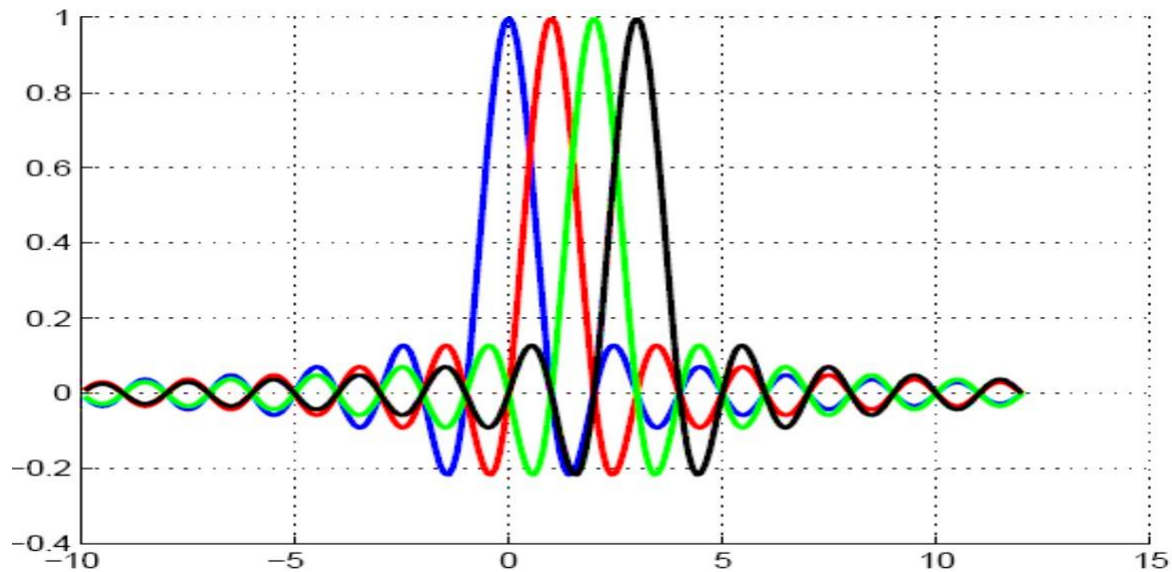
De même, en temps discret, si $y_s[n]^{N-1}_{n=0}$ sont les valeurs du symbole OFDM reçu échantillonné à l' instant $t = 1T_{cyN} + nT_c$, alors la démodulation en temps discret est donnée par :

$$\begin{aligned}
 Y_l[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} y_l[n] e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \\
 &= \sum_{i=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Y_l[i] e^{\frac{j2\pi in}{N}} \right\} e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} X_l[i] e^{-\frac{j2\pi(i-k)n}{N}} = X_l[k]
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Cette expression est celle de la DFT à N point de $\{y_l[k]\}_{n=0}^{N-1}$ qui peut calculer Efficacement par l'algorithme FFT.



(a) Modulation/démodulation OFDM



(b) Réalisation de l'orthogonalité multi-porteuses

Figure.II.4: Schéma de principe illustratif de la modulation OFDM et de la démodulation

La (Figure II.4) illustre la modulation et la démodulation OFDM, les symboles $X[k]$ du domaine fréquentielle, module les sous porteuses de fréquence $f_k = \frac{k}{T_{sym}}, = 0, 1, \dots, N - 1$, tandis que la démodulation utilise l'orthogonalité des sous porteuses au niveau du récepteur. Le symbole d'origine $X[k]$ de durée T_c voit sa période étendue à $T_{sym} = NT_s$ à cause de la transmission de N symboles en parallèle. Les N signaux ainsi formés correspondent à un symbole OFDM de durée T_{sym} .

La modulation et la démodulation OFDM peut être alors implémenté en utilisant l'algorithme IFFT/FFT (IDFT/DFT)

Au niveau de l'émetteur, une IFFT d'ordre N des $\{X_l[k]\}_{k=0}^{N-1}$ est utilisée pour génère les $\{x[k]\}_{k=0}^{N-1}$ qui correspondent aux échantillons de la somme des N signaux des sous porteuse orthogonales.

Au niveau du récepteur, la FFT d'ordre N , des échantillons $y[n] = x[n] + w[n]$ ($w[n]$ échantillon du bruit additif), est utilisée pour générer les $\{Y_l[k]\}_{k=0}^{N-1}$ versions bruitée des symboles transmis. Puisque les sous porteuse ont une durée limitée T_s , le spectre du signal OFDM correspondent à la somme N fonctions sinus cardinal qui se. [21]

recouvrent et qui sont espacées par $1/T_s$

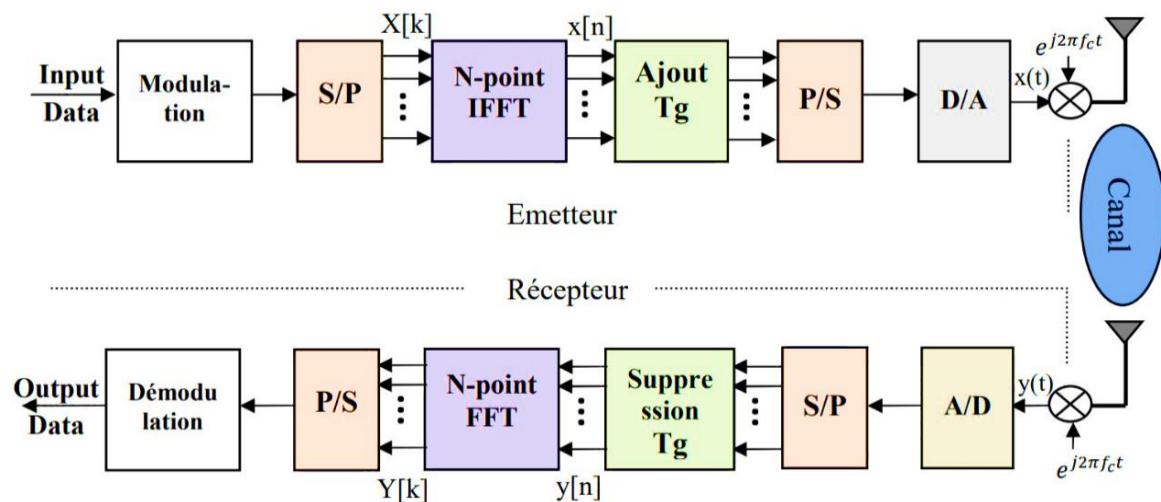


Figure II.5: Schéma Bloc d'un système OFDM

II.4.1. Intervalle de Garde

L'extension de la durée d'un symbole, par N fois ($T_s = N T_{\text{sub}}$) induit une importante réduction de l'IES entre les symboles OFDM. Cependant, les symboles OFDM, transmis dans un canal multi-trajet peuvent souffrir du phénomène d'IES

Ceci peut nuire à l'orthogonalité entre les sous porteuse par conséquent l'insertion d'un intervalle de garde entre deux symboles OFDM devient essentielle. On distingue deux types d'intervalle de garde, le "Zéro Padding, ZP" et l'extension cyclique. [22]

II-4-2. Préfixe Cyclique (CP)

Le préfixe cyclique consiste à étendre la durée du symbole OFDM en copiant les derniers échantillons du symbole OFDM en amont du symbole (a) Si T_G est la longueur du CP en termes d'échantillons, alors la durée d'un symbole OFDM devient $T_{\text{sym}} = T_{\text{sub}} + T_G$

De ce fait, si la longueur de l'intervalle de garde CP est plus longue (ou égale) que le retard maximal dû au canal à multi-trajet, l'effet de l'IES sur un symbole OFDM sera confiné dans l'intervalle du symbole OFDM suivant. Par conséquent la FFT sur le deuxième symbole OFDM, prise pour une durée T_{sub} , ne sera pas affectée. [23].

De ce fait, si la longueur de l'intervalle de garde CP est plus longue (ou égale) que le retard maximal dû au canal à multi-trajet, l'effet de l'IES sur un symbole OFDM sera confiné dans l'intervalle du symbole OFDM suivant. Par conséquent la FFT sur le deuxième symbole OFDM, prise pour une durée T_{sub} , ne sera pas affectée. [23].

En pratique, le décodage entre l'instant d'échantillonnages du début du symbole OFDM reçu et celui considéré par, l'horloge d'échantillonnage du récepteur, (STO, Symbole Timing Offset), va empêcher le début du symbole OFDM de coïncider avec le début de la fenêtre FFT au niveau du récepteur. Dans ce contexte, bien que la longueur du CP soit supérieure au retard maximal du au canal multi-trajet, il y a apparition d'une part, de l'IES, et d'autre part, de l'IEP (Interférence Entre Porteuse) selon le point du début de la fenêtre FFT,

- ◄ · → Si le point de départ de la fenêtre de FFT est dans cette période, il existe ISI
- ↔ Si le point de départ de la fenêtre de FFT est dans cette période, n'existe aucun ISI
- ◄ - - → Si le point de début de la fenêtre de FFT est dans cette période, il existe ISI

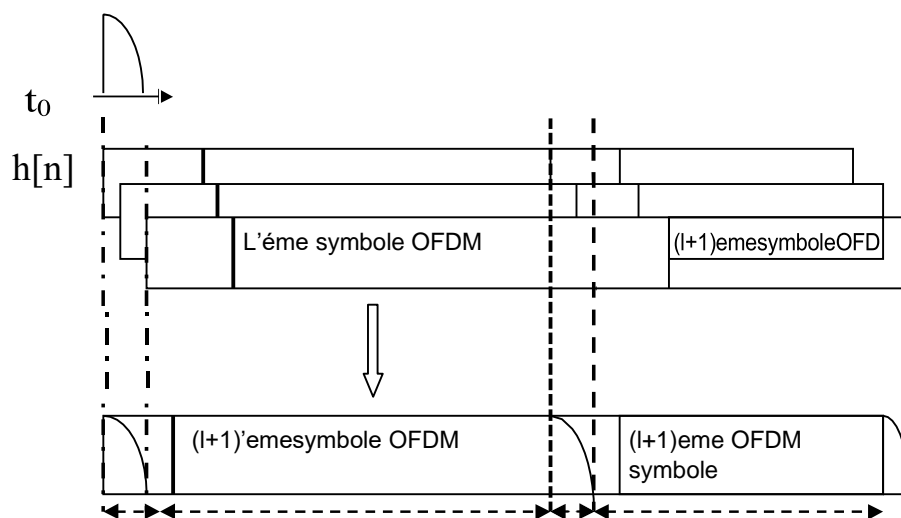


Figure II.6: Effet IES / ICI selon le point de départ de la fenêtre FFT

II-4-3. Suffixe Cyclique

Le suffixe cyclique (CS) consiste à étendre le symbole OFDM en copiant le début du symbole et en l'insérant à la fin du symbole OFDM. Le CS est généralement utilisé pour prévenir l'interférence entre la voie montante (Upstream) et la voie descendante (Downstream).

Le CP et le CS peuvent être utilisés ensemble, comme dans le système VDSL, le premier pour prévenir l'IES et le second pour garantir l'orthogonalité entre les signaux Upstream et Downstream (Figure II.7).

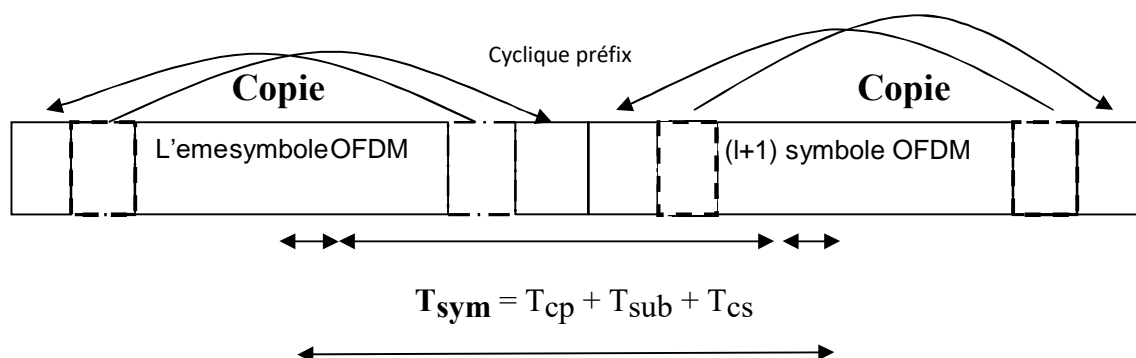
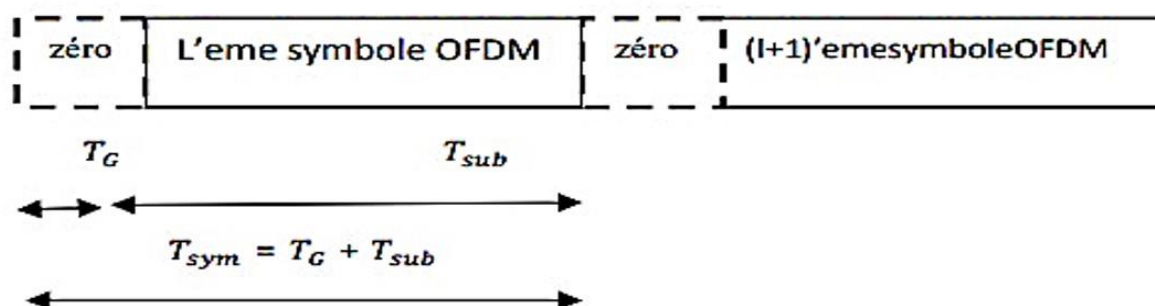


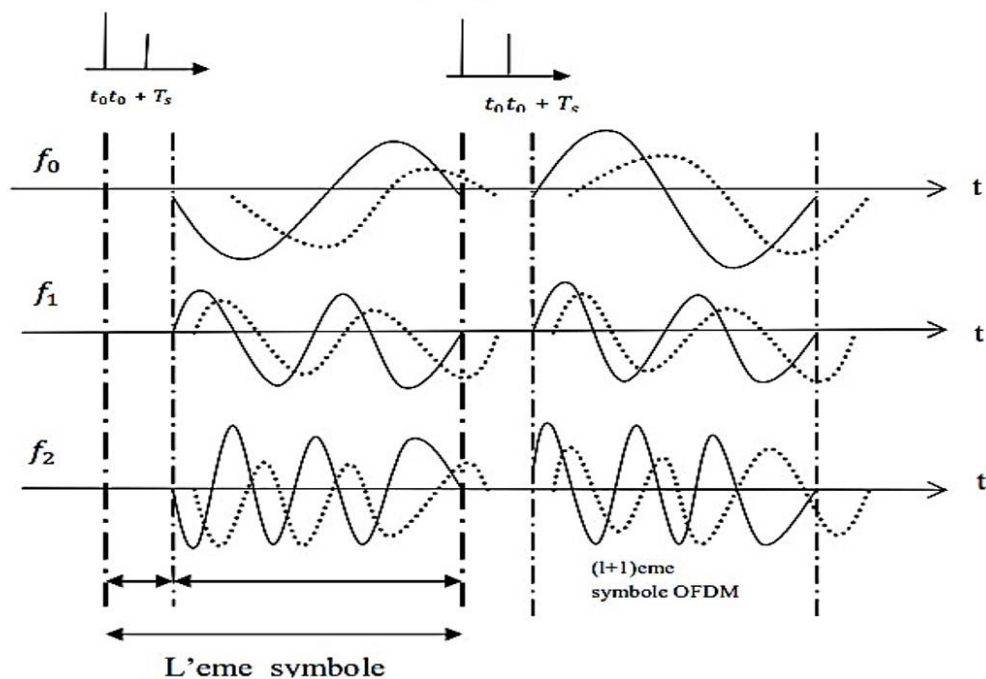
Figure II.7 : Symbole OFDM avec CP et CS.

II.4.4. Technique Zéro Padding (ZP)

Dans cette technique, on insère des zéros dans l'intervalle de garde, (figure II.9). Cette approche particulière est adoptée pour la technique multi-bande ofdm (mb-ofdm) dans les systèmes ultra large bande (ulb)[24]. Cependant, même si la longueur du zp est supérieure au retard maximal du canal, un petit décalage (sto: shift time offset) du symbole ofdm cause une discontinuité dans la fenêtre fft. C'est pourquoi l'intervalle de garde du symbole ofdm suivant est copié et ajouté au début du symbole ofdm courant pour prévenir l'ies (figure II.9).



(a) Symbole OFDM avec ZP



b) L'effet IES d'un canal multi-voies pour chaque sous-porteuse

Figure II.8: Effet d'un canal multi-voies sur les symboles OFDM avec ZP.

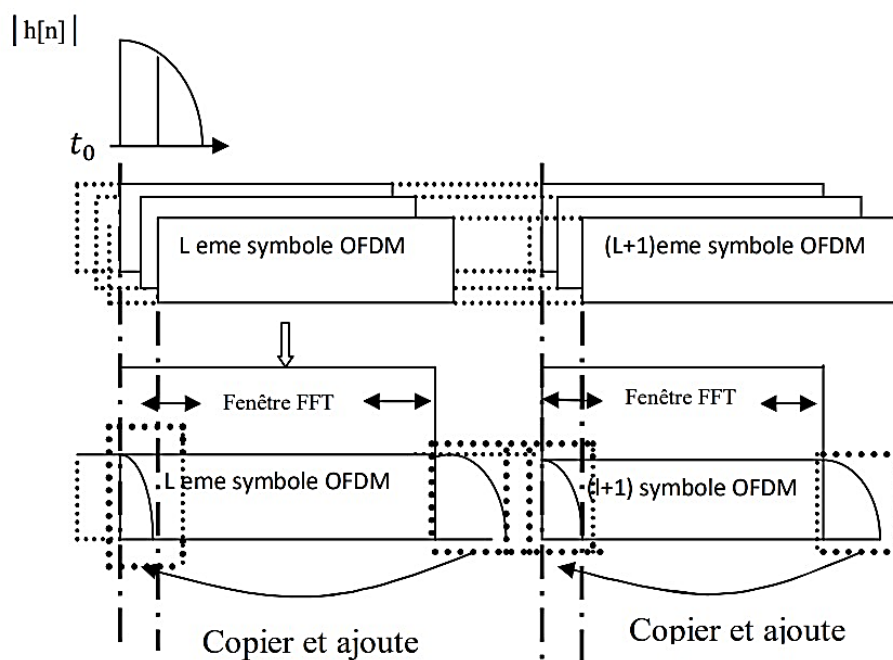


Figure II.9: Copier et ajouter l'intervalle de garde du symbole suivant dans la partie tête du courant Symbole pour empêcher ICI

le symbole ofdm avec zp étant plus court que le symbole ofdm avec cp on cs, alors son spectre (en sinus cardinal) est plus large. par conséquent un symbole ofdm avec zp présente une densité spectrale de puissance psd avec une plus petite ondulation à l'intérieur de la bande et une plus grande puissance à l'extérieure de la bande, que pour un symbole ofdm avec cp ou cs.

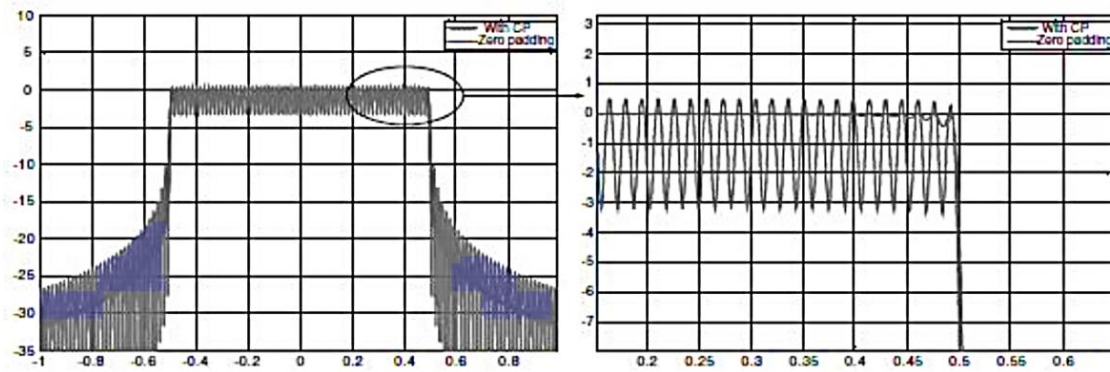


Figure II.10 : spectres de puissance de deux symboles ofdm, un avec zp et un avec cp.

II-4-5 Bande de garde

Le spectre du signal sur chaque sous porteuse est une fonction sinus cardinal avec une bande de $2/T_{sub}$. La densité spectrale puissance d'un signal ofdm est alors la somme de plusieurs fonctions sinus cardinal décalées. Par conséquent, la puissance hors bande devient significative. Cette puissance provoque l'apparition de l'interférence entre canal adjacents (aci: adjacent channel interference). Par conséquent, une bande de garde est nécessaire pour réduire l'effet de l'aci dans un système ofdm. Deux techniques peuvent être utilisées pour réduire la puissance hors bande. Une fenêtrage dans le domaine temporel du symbole ofdm par une fonction de type cosinus surelevé (rc: rised cosinus). Une autre mesure, est l'utilisation des porteuses virtuelles (vc: virtuel carriers) qui sont des sous porteuses non utilisées placées aux deux bouts de la bande de transmission. Cependant, l'efficacité spectrale sera réduite de N_{used}/N fois à cause des sous porteuses non utilisées, (N_{used} Est le nombre de sous porteuses utilisées pour la transmission).

Les deux techniques rc et vc peuvent être combinées pour combattre l'interférence entre canal (aci).

II-4-6 Taux d'Erreur Binaire (TEB)

L'expression du TEB pour une QAM-Maire avec un BBAG et un canal Rayleigh :

$$\rho_e = \frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{6E_b}{N_0} \cdot \frac{\log_2 M}{M^2 - 1}} \right) \text{ Pour BBAG}$$

$$P_e = \frac{M-1}{M \log_2 M} \left(1 - \sqrt{\frac{3\gamma \log_2 M / (M^2 - 1)}{3\gamma \log_2 M / (M^2 - 1) + 1}} \right) \text{ Pour canal rayleigh}$$

$$\text{Ou } \gamma = \frac{E_0}{N_0}$$

M= ordre de modulation

$$\text{et} \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2.8)$$

Notons que si on utilise N_{used} sous porteuses parmi N (taille de la FFT) pour transmettre les données, alors le SNR dans le domaine temporel, SNR_t , diffère du SNR dans le domaine fréquentiel SNR_f comme suit :

$$SNR_t = SNR_f + \frac{10 \log N_{used}}{N} [dB]_s \quad (2.9)$$

II-5 Applications l'OFDM

Au cours de la dernière décennie, l'OFDM a été adopté dans de nombreux, les normes de communication sans fil, y compris la diffusion audio numérique européenne, la diffusion vidéo numérique terrestre, et infrastructure multiservice interactive satellite-terrestre en Chine. En outre, l'OFDM a été envisagé ou approuvé par de nombreux groupes de travail sur les normes IEEE, tels que IEEE 802.11a / g / n, IEEE 802.15.3a et IEEE 802.16d / e.

Les applications comprennent des réseaux personnels sans fil, les réseaux locaux sans fil et les réseaux métropolitains sans fil. Actuellement, l'OFDMA fait l'objet d'une enquête comme l'un des les techniques de transmission radio les plus prometteuses pour le LTE du Projet de partenariat de 3e génération (3GPP), international Télécommunications mobiles Systèmes avancés. Avant de découvrir les fonctionnalités majeures de plusieurs applications OFDM, nous décrivons brièvement la ligne directrice de conception de l'OFDM pour le sans fil communications.

II-5-1 Systèmes sans fil mobiles et fixes

OFDM a été adopté dans les normes IEEE 802.16 pour prendre en charge le débit de données de pointe jusqu'à 75 Mb / s dans les bandes de fréquences sous 11 GHz.

OFDMA dans IEEE 802.16-2004 corrige la taille de FFT à 256 et fait varier l'espace sous-canal en fonction de la bande passante du système. Différent IEEE 802.16-2004, OFDMA dans IEEE 802.16e-2005 maintient le même

Tableau II.1
Quelques paramètres de 802.16.(a) 802.16-2004.
(b) IEEE 802.16e-2005

a

Bande passante, B_B (MHz)	1.75	3.5	5.5	7
Espace sous-canal, Δ_f (KHz)	7.81	16.6	25.0	31.3
Symbol Duration, T_s (usec)	128	64	40	32
Fréquence d'échantillonnage, f_s (MHz)	2	4	6.32	8
Taille FFT, M	256	256	256	256

b

Bande passante, B_B (MHz)	1.75	3.5	5.5	7
Espace sous-canal, Δ_f (KHz)	10.9	10.9	10.9	10.9
Symbol Duration, T_s (usec)	91.4	91.4	91.4	91.4
Fréquence d'échantillonnage, f_s (MHz)	1.40	5.60	11.2	22.4
Taille FFT, M	128	512	1024	2048

Tableau II.2
Paramètres de MB-OFDM-BASED UWB

Bande passante, B_B (MHz)	1.75 MHz
Espace sous-canal, Δ_f	3.2 MHz
Symbol Duration, T_s	312.5nsec
Sous-canal N_0, N	128
Longueur de CP, T_g	60.6 nsec
Longueur de GI, T_{GI}	9.5 nsec

espace de sous-canal, c'est-à-dire $\Delta f = 10,94$ kHz, et change les tailles de FFT en fonction de la bande passante du système. Tableau I [219, Seconde. 8.4.6, pp.883–955] compare les paramètres pour (a) IEEE 802.16-2004 et (b) IEEE 802.16-2005, respectivement.

Dans les deux modes OFDM et OFDMA, le rapport de la longueur du CP à la durée du symbole peut être 1/4, 1/8, 1/16 ou 1/32, et le schéma de modulation peut être QPSK, 16 modulation d'amplitude quadratique (16QAM) ou 64QAM, selon les environnements de canal et le débit de données ciblé. En plus, les réseaux d'antennes peuvent être utilisés pour la diversité et les interférences suppression. STC est également facultatif dans IEEE 802.16 pour augmenter les débits de données et étendre la couverture.

Dans la liaison descendante de 3GPP LTE, OFDMA est une modulation de base

Schéma, qui est avec la longueur du CP $T_g = 4,7 / 16,74$ μs (CP court / long) et l'espace sous-canal $\Delta f = 15$ kHz

II-5-2 Radio cognitive

La radio cognitive est devenue une technologie prometteuse pour résoudre le problème actuel de rareté du spectre. Dynamique la gestion et l'accès au spectre sont l'une des fonctions clés de la radio cognitive. OFDM peut être utilisé pour construire le émetteur-récepteur de radio cognitive en raison de sa flexibilité pour attribution de sous-canal et attribution de puissance. Les utilisateurs secondaires (sans licence) de la radio cognitive exploitent les trous de spectrum, qui sont des bandes qui ne sont pas utilisées par les utilisateurs (sous licence), et ne doit pas interférer avec le fonctionnement des principaux utilisateurs. Par conséquent, le spectre disponible pour les utilisateurs secondaires est généralement des bandes disjointes. Par ailleurs, les bandes disponibles changent avec les activités du primaire utilisateur, qui obligent les utilisateurs secondaires à ajuster de manière flexible les bandes de fréquences de leurs signaux modulés. En outre, la séparation géographique introduit des écarts par rapport aux au stade

initial de l'établissement de la liaison. Motivé par ces exigences, un système de communication de domaine de transformation (TDCS) à base OFDM entrelacé a été proposé pour la radio cognitive [25] - [26].

Dans les performances du TDCS basé sur OFDM ont été étudiées

II-5-3 MB-OFDM pour les systèmes UWB

L'OFDM multibande (MB-OFDM) était autrefois une norme pour le groupe de travail IEEE 802.15.3a pour systèmes à ultra-large bande (UWB). L'idée de base de MB-OFDM est pour diviser le spectre en plusieurs sous-bandes et un flux de données est transmis sur chaque bande par l'OFDM. Les paramètres d'OFDM sont énumérés dans le tableau II. Il convient de noter que le réel la bande passante du signal OFDM est de 409,6 MHz, bien que le la bande passante de chaque sous-bande est de 528 MHz. L'entrelacement est utilisé pour exploiter la diversité de fréquences. L'UWB basé sur MB-OFDM le système atteint des débits de données allant de 55 à 480 Mb / s sur distances jusqu'à 10 m.

La combinaison de MIMO et MsB-OFDM a également été étudié pour la transmission à haut débit. Cependant, il y a un argument sur la question de savoir si nous avons besoin de plusieurs antennes dans un système UWB, car il devrait être à faible complexité et faible coût, alors que plusieurs antennes sont nécessaires par MIMO augmenter le coût des émetteurs-récepteurs et évidemment les contredire

II-6 Avantages et inconvénients de l'OFDM

II-6-1 Avantages

- Le procédé de modulation OFDM a été principalement pensé pour résister aux trajets multiples avec évanouissement, en minimisant l'interférence entre symboles (ISI) et en garantissant des débits binaires suffisamment élevés
- Faible ISI: Le fait d'ajouter un intervalle de garde T_g , augmente la robustesse du signal OFDM aux trajets multiples. Cela permet d'avoir Faible ISI: Le fait d'ajouter un intervalle de garde T_g , augmente la robustesse du signal OFDM aux trajets multiples.
- Encombrement spectral optimal: L'orthogonalité entre les N sous-porteuses permet de faire chevaucher leurs bandes fréquentielles respectivement, et donc, d'optimiser l'occupation spectrale du signal modulé.
- Canal invariant localement: La bande passante de chaque sous-porteuse est petite devant la totalité de la bande passante du signal OFDM. On peut alors, considérer que la réponse fréquentielle du canal de transmission est plate au niveau de chaque sous-porteuse. L'évanouissement fréquentiel due au canal est donc de type "flat fading"
- Egalisation fréquentielle simple.

II -6-2 Inconvénients

- La synchronisation émetteur /récepteur: Le décalage fréquentiel due à l'effet Doppler, ainsi que les offsets en fréquence entre les oscillateurs locaux RF, génèrent une translation fréquentielle qui perturbe l'orthogonalité des N sous-porteuses, en introduisant une interférence entre les symboles (ISI). Pour y remédier on doit prévoir un système d'estimation et de correction de ces offsets.

- Fluctuation d'enveloppe: Le signal OFDM présente une forte fluctuation d'enveloppe et donc un PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) élevé [16], exigeant une grande linéarité de la chaîne de transmission, en particulier au niveau de l'amplificateur de puissance, qui va présenter alors, un rendement médiocre, donc incompatible avec une consommation optimisée pour une application mobile.

II -7 Conclusion

Enfin, Dans ce chapitre, nous avons donné une définition générale de la technique de modulation OFDM, son utilisation dans les systèmes de communication en passant par un petit historique. Une brève description du canal de transmission et quelques techniques d'interpolation et d'estimation de canal ont été cités. Nous avons également parlé brièvement des applications de l'utilisation de cette technologie Pour finir, nous avons cité quelques standards utilisant l'OFDM comme technique de modulation et les avantages et les inconvénients de cette dernière

CHAPITRE III:

RÉSULTATS DE SIMULATIONS

III.1.Introduction

La communication par lumière visible (VLC) est une technologie nouvelle et prometteuse du domaine de la communication optique sans fil (OWC) exploitant le spectre visible pour la transmission de données, qui a émergé comme une solution pour les systèmes de communication radiofréquences (RF) en raison d'une bande passante disponible plus élevée, spectre visible non réglementé et interférence électromagnétique inexistante. Parallèlement, le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) est utilisé comme technique de modulation pour VLC car il est capable de transmettre à des débits de données élevés et d'une efficacité spectrale élevée, ainsi que de réduire les effets des interférences inter-symboles (ISI) et inter-porteuses (ICI). Dans ce chapitre, nous analysons l'effet de l'ordre de modulation et de la mise à l'échelle du signal (α) sur le taux d'erreur binaire BER et le rapport de puissance crête/puissance moyenne (PAPR) qui est un problème majeur dans le système VLC basé sur DCO-OFDM.

III.2.VLC-OFDM

Visible Light Communication (VLC) est une technique sans fil qui utilise les diodes électroluminescentes (LED) pour transmettre des données, cette technique utilise une plage de lumière évidente quelque part dans la plage de 400 et 800 THz (780-375 nm) VLC peut être utilisé dans de nombreux domaines de la vie quotidienne, dans les maisons, cafétérias, stades ou dans un système de vaisseau spatial, et elle peut également être utilisée dans un environnement IoT .Cette technologie peut être utilisée en tant que système autonome ou un complément pour les réseaux de transmission sans fil traditionnels qui utilise les ondes radio, ou en tant qu'accessoire aux réseaux cellulaires.

Actuellement, la technique (OFDM) a été investiguée dans la mise en place aux systèmes VLC en raison de sa capacité qui supporte des débits de données plus élevés et son efficacité à la lutte contre les interférences inter symboles (ISI) [27]. Cependant, comme les systèmes VLC sont basés sur des techniques simples et peu coûteuses de modulation d'intensité et de détection directe (IM/DD), le signal OFDM requis à l'entrée de la LED doit être à valeur réelle et unipolaire.

Nous utilisons la stratégie DCO-OFDM pour augmenter le taux d'information dans les OFDM-VLC.

III.3.DCO-OFDM

Comme nous le savons, l'utilisation du multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence est une technique de communication utilisée dans de nombreuses applications telles que les télécommunications à large bande. Il est particulièrement efficace lors de la transmission simultanée de signaux sur plusieurs sous-porteuses orthogonales et fonctionne de manière robuste dans des environnements multi-trajets sévères, atteignant une efficacité spectrale convenable.

L'OFDM est également une technique efficace qui offre une transmission à haut débit et résiste des nombreux problèmes sans avoir besoin d'égalisation complexe et longue dans le domaine temporel, en raison de sa robustesse contre l'évanouissement sélectif en fréquence et les interférences à bande étroite. Les données sont également transmises dans le canal optique sans fil grâce à la technique de modulation de densité et de détection directe (IM/DD). En modulation

multi porteuse, la durée du symbole est nettement plus longue que l'étalement de la déviation de la valeur quadratique moyenne (RMS) du canal optique sans fil et a donc une robustesse inhérente aux interférences entre symboles. L'OFDM optique avec modulation d'amplitude en quadrature multi niveaux (M-QAM) peut délivrer des débits de données très élevés [28, 29], dans lequel, l'enveloppe de signal dans le domaine temporel est utilisée pour moduler l'intensité de la LED. Dans ce but, un signal à valeur réelle est obtenu lorsque la symétrie hermitienne est imposée aux sous-porteuses OFDM. Une approche pour obtenir un tel signal est l'ajout d'une polarisation continue [30, 31, 32] connue sous le nom de DCO-OFDM. La figure 3.1 est un schéma fonctionnel simplifié de l'émetteur DCO-OFDM

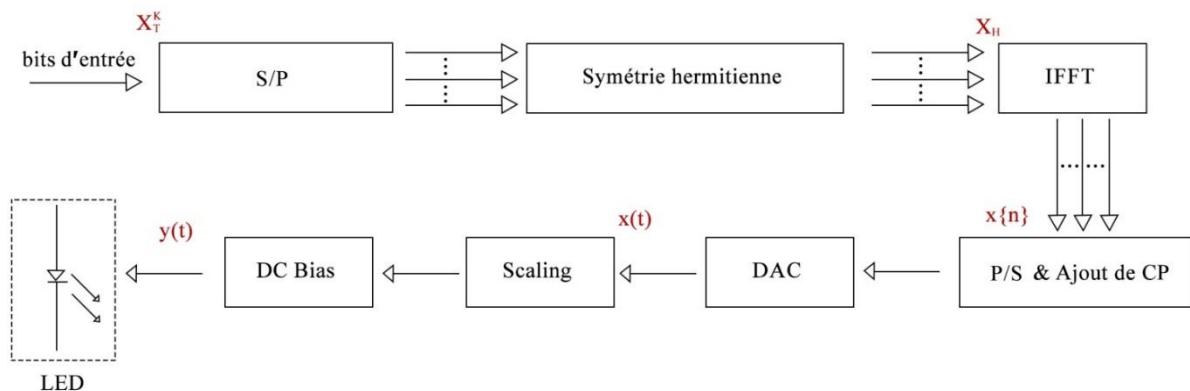


Fig. III.1:Schéma fonctionnel simplifié de l'émetteur DCO-OFDM

Dans cette technique, le signal d'entrée est contraint d'être réel et non négatif ; ceci est obtenu en imposant une symétrie hermitienne au signal d'entrée. Ce signal de valeur réelle est converti dans le domaine temporel à l'aide de la transformée de Fourier rapide inverse (IFFT). Et puis le signal parallèle est converti en signal série (P/S). Un préfixe cyclique (CP) est ajouté à ce signal et le signal résultant est converti en signal analogique et passé à travers un filtre passe-bas, ce qui donne $x(t)$.

Nous pouvons également développer l'explication plus au niveau de l'émetteur du système, OFDM utilise l'IFFT pour transformer un ensemble de multiplexés, Interférence des sous-porteuses dans le champ de fréquence à un signal de leur forme équivalente au champ temporel . Un seul symbole OFDM porte un ensemble de symboles de données X dans le domaine fréquentiel .Le symbole OFDM est un vecteur, qui consiste en un ensemble de N sous-porteuses. L'algorithme IFFT sort le code OFDM discret et le transfère en x vecteurs dans le domaine temporel, qui est donné par [33]

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j \frac{2\pi k m}{N}} \quad \text{POUR } 0 \leq m \leq N-1$$

$$(3.1)$$

où N est la taille de l'IFFT et X_k est le k^{th} ème symbole de sous-porteuse. La paire de conversion FFT correspondante à (3.1) peut être exprimée sous la forme

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-j \frac{2\pi h m}{N}} \quad \text{POUR } 0 \leq k \leq N-1$$

$$(3.2)$$

La sortie (3.1) est un signal complexe et ne peut pas être utilisée dans un système de modulation d'intensité et de détection directe (IM/DD) tel que le VLC à LED. Nous utilisons la symétrie hermitienne afin d'obtenir des sorties FFT de valeur réelle. Il s'agit d'une copie transposée-conjuguée des sous-porteuses actives, qui est ajouté à l'autre moitié du cadre IFFT; où les éléments du nouveau vecteur d'entrée IFFT, X_H sont [34]

$$X_H = [X_0, X_1, X_2, \dots, X_{N-1}, X_N, X_{N-1}^*, X_{N-2}^*, \dots, X_2^*, X_1^*]$$

$$(3.3)$$

et la composante continue, $X_0 = X_N = 0$ Il en résulte une sortie IFFT de $2N$ -point du symbole OFDM. L'équation (3.1) est modifiée pour

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{h=0}^{2N-1} X_{H,h} e^{j \frac{2\pi h m}{N}} \quad \text{POUR } 0 \leq m \leq 2N-1$$

$$(3.4)$$

Où h est le symbole k^{th} sous-porteuse de X_H . Le symbole OFDM est une fonction périodique avec une période, $T_p = 1/\Delta f$, et Δf est l'espacement des sous-porteuses qui est donné par

$$\Delta f = B / (N-1)$$

$$(3.5)$$

Où B est la bande passante de modulation du signal.

Le signal x_m est ensuite converti en la forme d'onde analogique $x(t)$ à l'aide d'un convertisseur numérique-analogique (DAC). Dans un système DCO-OFDM, le signal direct positif $y(t)$ qui commande la LED doit être obtenu à partir de $x(t)$ après à la fois une mise à l'échelle linéaire (LS) et une opération de polarisation comme

$$Y(t) = \alpha x(t) + B_{DC}$$

$$(3.6)$$

Où $x(t)$ est le signal OFDM bipolaire et B_{DC} est la valeur de la polarisation en courant continu.

La génération et la récupération du schéma DCO-OFDM sont simples. Un décalage CC (implémenté en pratique comme un courant de polarisation CC pour piloter l'émetteur LED) est

ajouté à la forme d'onde du domaine temporel générée pour élever le signal dans une région unipolaire et est ensuite transmis. Le débit de données total pour une transmission DCO-OFDM est donné par

$$R_{DCO-OFDM} = \frac{B}{N} \sum_{K=1}^{N-1} \log_2 M_k \quad (3.8)$$

Où B est la bande passante de modulation et $\log_2 M$ représente le nombre de bits par symbole d'un schéma de modulation de porteuse, qui est typiquement une modulation d'amplitude en quadrature (QAM).

III.4. Résultats de la simulation

Afin d'étudier l'effet du coefficient alpha sur les performances de DCO-OFDM. Les expériences ont été simulées et étudiées à l'aide de MATLAB. Les figures suivantes montrent les résultats de simulation

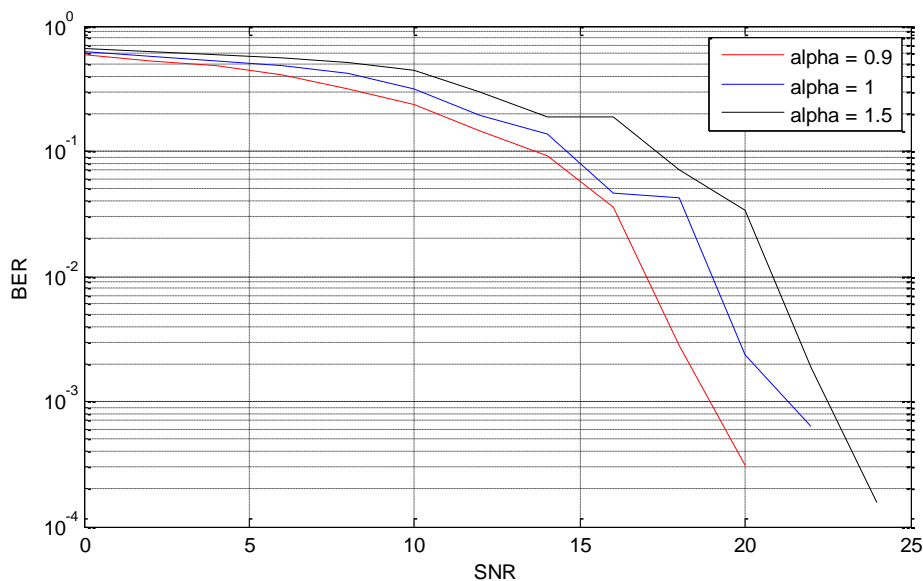


Fig. III.2: BER vs SNR pour 4-QAM DCO-OFDM avec différents valeurs de α

Afin d'étudier l'effet de la modulation sur les performances du BER, des simulations sont menées avec différentes valeurs de $\alpha = [0.9, 1, 1.5]$ pour 4-QAM DCO-OFDM comme le montre la Fig. 3.2. Il est clair que lorsque le facteur α augmente, le BER augmente, c'est-à-dire qu'un SNR plus élevé est nécessaire pour obtenir le même BER lorsque α passe d'une valeur inférieure à une valeur supérieure.

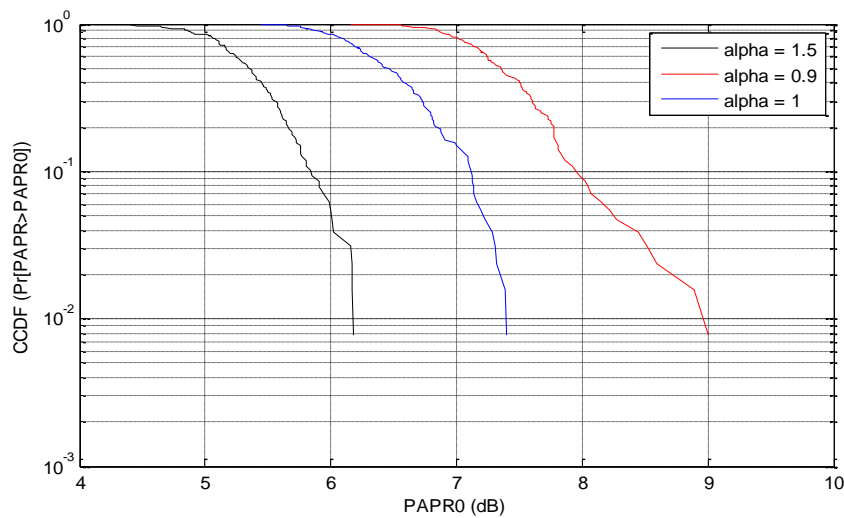


Fig. III.3:CCDF vs PAPR0 pour 4-QAM DCO-OFDM pour différentes valeurs de α

La performance PAPR du signal 4-QAM DCO-OFDM dans le système VLC pour différentes valeurs de α est illustrée à la Fig. 3.3. On peut voir que le PAPR du signal VLC dans le domaine temporel augmente avec la valeur décroissante de α , c'est-à-dire que le PAPR est plus élevé pour les petites valeurs du paramètre α .

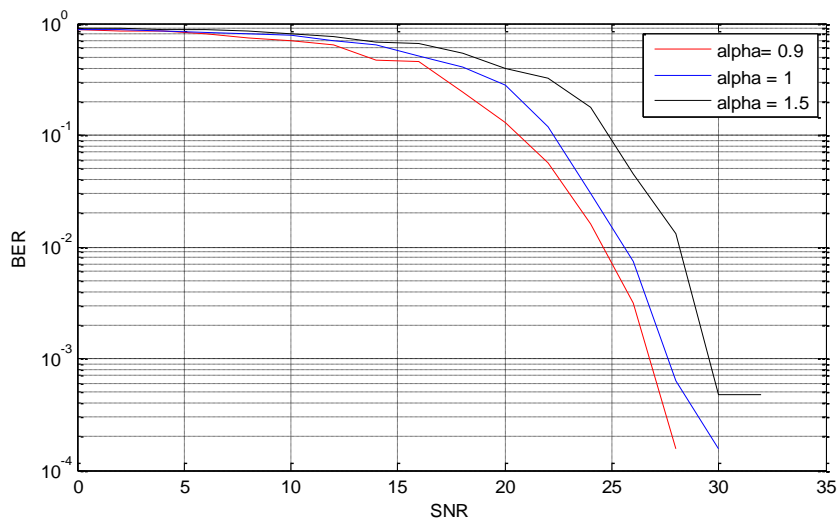


Fig. III.4:BER vs SNR pour 16-QAM DCO-OFDM avec différents valeurs de α

Sur la figure 3-4, des simulations ont été réalisées avec de nouvelles données, modulant cette fois un DCO-OFDM 16-QAM avec les mêmes valeurs de α [0,9, 1, 1,5]. On peut voir sur la figure que cette fois le SNR était 7dB plus grand que la première courbe. On observe également que le taux d'erreur est stable lorsque SNR = 30 dB (avec $\alpha = 1.5$). C'est-à-dire que nous pouvons conclure qu'il est inutile d'augmenter la valeur de α dans ce cas car le taux d'erreur reste constant à une valeur donnée. Et c'est ce que nous avons obtenu dans la modification 16-QAM DCO-OFDM.

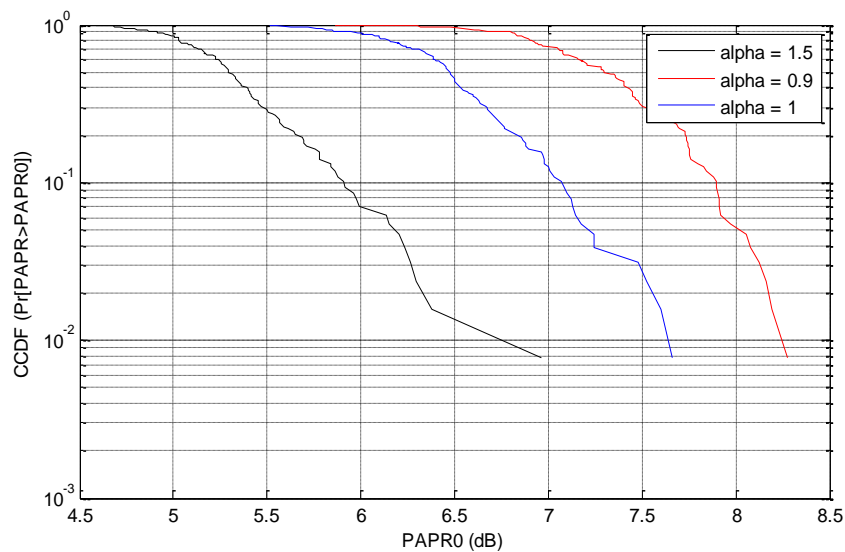


Fig. III.5:CCDF vs PAPR0 pour 16-QAM DCO-OFDM pour différentes valeurs de α

Quant à la figure 3.5, qui nous montre les performances PAPR du signal 16-QAM DCO-OFDM dans le système VLC avec les mêmes valeurs que les valeurs précédentes du coefficient α . D'après la figure, nous pouvons dire qu'il est clair pour nous que le PAPR du signal VLC dans le domaine temporel augmente avec la valeur décroissante de α , et nous remarquons également que la valeur PAPR diminue de 0,75 dB.

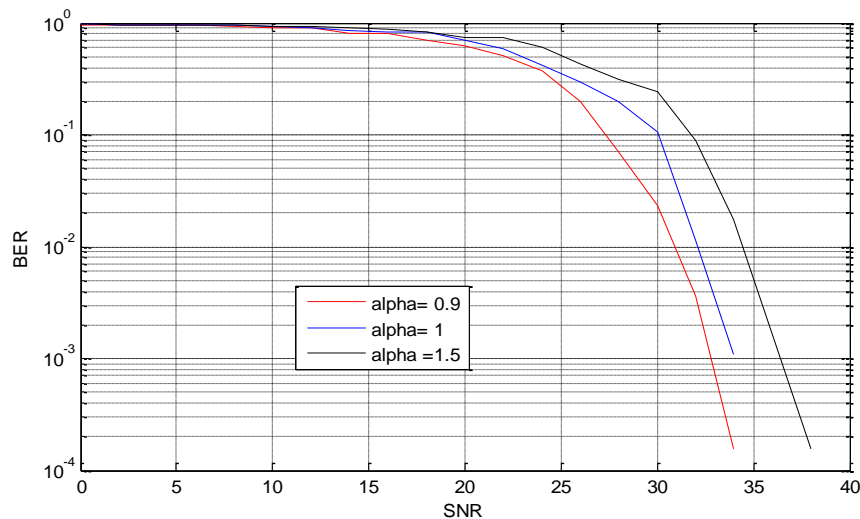


Fig. III.6:BER vs SNR pour 64-QAM DCO-OFDM avec différents valeurs de α

À partir de la figure 4.2, nous remarquons que la valeur du SNR augmente lorsque le QAM passe des tracés d'ordre inférieur à des tracés d'ordre supérieur. On note également que le BER se stabilise à un certain niveau de 10^{-3} (lorsque la valeur de $\alpha = 1$.) contrairement aux autres valeurs de dans lesquelles le BER continue de décroître.

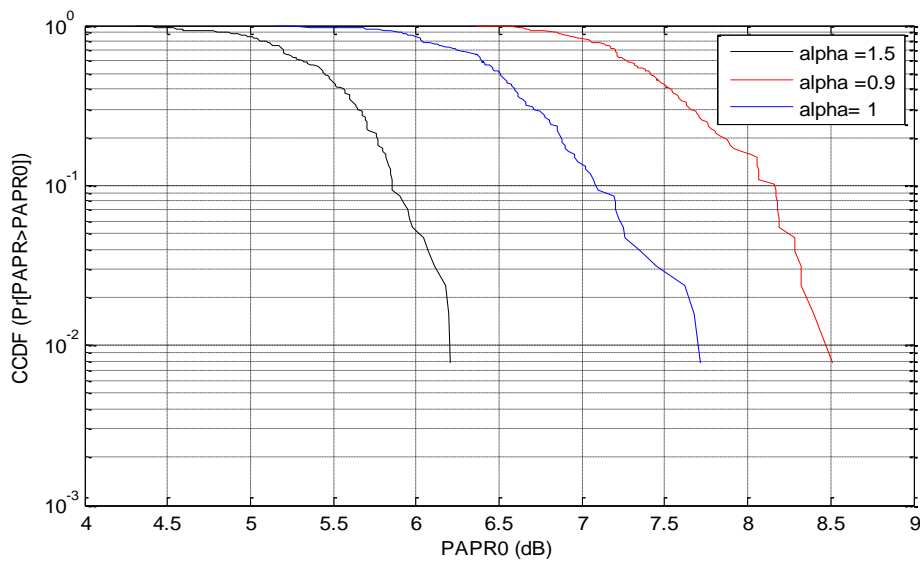


Fig. III.7:CCDF vs PAPR0 pour 16-QAM DCO-OFDM pour différentes valeurs de α

La figure 4 montre les performances PAPR de 64-QAM DCO-OFDM dans le système VLC. Comparaison de CCDF avec différentes valeurs du facteur d'échelle du signal OFDM. Il est clair que le CCDF a diminué de manière significative après avoir augmenté le facteur d'échelle. Par exemple, le CCDF à 10^{-2} avec $\alpha = 1,5$ est réduit de 3 dB par rapport à $\alpha = 1$.

III.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué les performances des schémas DCO-OFDM pour le système VLC. Certaines questions clés dans la conception pratique du système VLC sont discutées, couvrant les performances du PAPR et du BER. Les résultats de simulation montrent que le PAPR diminue significativement lorsque le facteur α augmente. Un effet opposé sur les performances du PAPR est observé lorsque l'ordre de modulation passe d'un schéma d'ordre inférieur à un schéma d'ordre supérieur. De plus, il a été démontré que le PAPR peut être réduit par l'effet de la mise à l'échelle du signal. De plus, il est montré que la réduction de l'ordre QAM peut améliorer les performances BER du système. Enfin, le signal VLC-OFDM est toujours caractérisé par un PAPR élevé et les futurs travaux viseront principalement à résoudre ce problème.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Avec le formidable développement des télécommunications au cours des dernières décennies. Le spectre des radiofréquences (RF) est de plus en plus encombré, Plus compliqué et cher. Plusieurs techniques ont été adoptées pour résoudre le problème de la forte demande en quantité et en vitesse de transmission de données, en particulier dans les zones urbaines. Cela a entraîné un intérêt sans cesse croissant pour les communications par lumière visible (VLC) entraîné par le développement considérable des technologies des diodes électroluminescentes (LED), et les systèmes VLC sont l'infrastructure du système d'éclairage intérieur en tant qu'alternative compacte et sûre, et le système est considéré comme moins coûteux et moins énergivore que les autres systèmes.

De nos jours, le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) est couramment utilisé dans les systèmes VLC, en raison de sa capacité à prendre en charge des débits de données plus élevés et une résistance efficace aux Inter-Symbol Interference (ISI). Cependant, il y a certaines limitations que nous devons gérer pour appliquer au système car le signal OFDM doit être réel et non négatif. Pour cette raison, de nombreux modèles OFDM sont conçus pour répondre aux exigences de la fonctionnalité LED, notamment DCO-OFDM. Malgré les nombreux avantages dont bénéficie le système DCO-OFDM, certains facteurs et variables contrôlent et affectent les performances du système. L'un des facteurs qui affecte ses performances est la mise à l'échelle de l'impact de facteur. Par conséquent, nous nous sommes concentrés dans notre recherche sur l'étude et l'analyse du système DCO-OFDM. En plus de clarifier l'effet du facteur d'échelle sur les performances de DCO-OFDM dans différentes techniques de modulation (4-16-64) QAM prenant en compte des paramètres tels que BER, SNR et PAPR.

Les résultats de simulation montrent que le PAPR diminue significativement lorsque le facteur α augmente. Un effet opposé sur les performances du PAPR est observé lorsque l'ordre de modulation passe d'un ordre inférieur à un d'ordre supérieur. Enfin, le signal VLC-OFDM est toujours caractérisé par un PAPR élevé et les futurs travaux viseront principalement à résoudre ce problème.

Bibliographie

- [1] Harald Haas, TED [en ligne], Wireless data from every light bulb, disponible sur: http://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb
- [2] Clement Le Bas. Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil. Optique / photonique. Université de Limoges, 2017. Français. NNT: 2017LIMO0087 . Tel-01703408.
- [3] P. Goswami et M. K. Shukla, « Design of a Li-Fi Transceiver », Wireless Engineering and Technology, vol. 08, no 04, p. 71-86, 2017.
- [4] Octave Ringar. Utilisation des techniques avancées d'Emission / Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande. Optique / photonique. Université de Limoges, 2015. Français. NNT : 2015LIMO0100. tel-01271419.
- [5] R. U.-R. Sm, « Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande », Union Internationale des Télécommunications, 2018.
- [6]N. Barbot, S. Sahuguede, A. Julien-Vergonjanne, and J.-P. Cances, “LDPC and Fountain Code Performances over Mobile Wireless Optical Channel,” Transactions On EmergingTelecommunications Technologies, Article sou-mis le 30/08/2013.
- [7] Monographie Li-Fi[en ligne],consulté le 14 mai 2017,disponible sur : <http://Li-Fi.insa-rennes.fr/wp-content/uploads/2015/04/Monographie-Li-Fi-Version-Finale1.pdf>
- [8]<https://fr.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>,consulté le 14 mai 2017
- [9]L. U. Khan, «Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges», Digital Communications and Networks, vol. 3, no2, p. 78-88, mai 2017.
- [10]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.
- [11]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.
- [12]«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].
- [13]«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].
- [14]C. Le Bas, «Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil», Université de Limoges, 2017.

- [15] L. Grobeet al., «Systèmes de communication à haute vitesse en lumière visible», IEEE Commun. Mag., Vol. 51, non. 12, pp. 60–66, décembre 2013
- [16]:<https://doi.org/10.1051/photon/20178622>
- [17] Bahai, A. R. S.; Saltzberg, B.R.; Ergen, M., " Multi Carrier Digital Communications: Theory and Applications of OFDM," Springer, 2004.
- [18] Sun, Y. "Bandwidth-efficient wireless OFDM, " IEEE Journal on Selected Areas in Communications, volume 19, issue II, pp. 2267-2278, Nov 2001.
- [19] Goldsmith, A.; Jafar, S.A.; Jindal, N.; Vishwanath, S., "Capacity limits of MIMO channels," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, volume 21, issue 5, pp.684-702, June 2003.
- [20] Zheng, L.; Tse, O.N.C., "Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple antenna channels," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 49, pp. 1073-1096, May 2003.
- [21] Tarek BCHINI, “Gestion de la Mobilité, de la Qualité de Service et Interconnexion de Réseaux Mobiles de Nouvelle Génération”, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Juin 2010.
- [22] UIT Télécommunications, Global mobile-cellular subscriptions, total and per 100 inhabitants, 2001-2011, février 2012.
- [23] George Lawton, “4G: Engineering versus Marketing”, [http://Computing Now.computer.org](http://ComputingNow.computer.org), March 2011
- [24] Afaq H. Khan, Mohammed A. Qadeer, Juned A. Ansari, Sariya Waheed, “4G as a Next generation Wireless Network”, International Conference on Future Computer and Communication, Aligarh Muslim University, India, pp.334–338, 2009.
- [25] J. Mitola, «Radio cognitive: une architecture d'agent intégré pour la radio définie par logiciel», Ph.D. mémoire, Royal Inst. Technol., Stockholm, Suède, 2000
- [26] V. Chakravarthy, A. S. Nunez, J. P. Stephens, A. K. Shaw et M. A. Temple, «TDCS, OFDM et MC-CDMA: un bref tutoriel», IEEE Commun. Mag., Vol. 43, non. 9, pp. S11-S16, septembre 2005.
- [27] H. Burchardt, N. Serafimovski, D. Tsonev, S. Videv et H. Haas, « VLC : Au-delà de la communication point à point », IEEE Commun. Mag., vol. 52, non. 7, p. 98-105, juillet 2014.
- [28] Elgala H, Mesleh R, Haas H, Pricope B (2007)Communication sans fil en lumière visible OFDM basée sur des LED blanches. Dans : Actes 64e conférence IEEE sur la technologie des véhicules, Dublin, Irlande

- [29] Dimitrov S, Sinanovic S, Haas H (2012) Mise en forme et modulation du signal pour la communication optique sans fil. *J Technologie des ondes lumineuses* 30(9) : 1319-1328
- [30] Song Y, Lu W, Sun B, Hong Y, Qu F, Han J, Zhang W, Xu J (2017) Démonstration expérimentale de la communication optique sans fil sous-marine MIMO-OFDM. *J Opt Commun*
- [31] Carruthers JB, Kahn JM (1996) Modulation à sous-porteuses multiples pour la communication infrarouge sans fil non dirigée. *IEEE J Sel Areas Commun* 14(3):538-546
- [32] Dimitrov S, Haas H (2012) Taux d'information des systèmes de communication sans fil optiques basés sur OFDM avec distorsion non linéaire. *Technologie IEEE J Lightwave* 31(6) : 918–929
- [33] Jiang, T., & Wu, Y. (2008). Un aperçu : techniques de réduction du rapport de puissance crête sur moyenne pour les signaux OFDM. *IEEE Trans. sur la radiodiffusion*, Vol. 54, n° 2, p. 257-268, 2008..
- [34] Little, T.D.C. et H. Elgala. "Adaptation de l'OFDM sous Visible Light Communications and Illumination Constraints." Dans *Proc. Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers*. 2014.