

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Télécommunications

Présenté par

Ghrib Haidar

Gaboussa Mohammed Salah

Thème

Application de la technique OFDM sur le système VLC

Soutenu le 02 /10/2017. Devant le jury composé de :

Mr. Hettiri Massaoud.	MAA	Président
Mr.Ghuendir Said.	MAA	Examineur
Mr.Touhami Ridha.	MAA	Encadreur

Année Universitaire 2016/2017

Dédicace

*Tous les louanges à Dieu, aujourd'hui fatiguent les jours et la race résumés
entre la couverture de cet humble travail.*

*Au phare de la connaissance, au plus grand et le plus honorable prophète
Muhammad - que la paix et les bénédictions de Dieu soient sur lui.*

*Au printemps qui continue de donner, nos mères tissent notre propre
Bonheur avec leurs cœurs miséricordieux ... pour nos mères.*

*Pour ceux qui cherchent à bénir le bien-être et le bien-être, et ne pas mettre ce
qu'il doit nous pousser de manière réussie qui nous a appris à renforcer les
échelles de la vie avec sagesse et patience, À nos chers parents.*

*A qui l'amour coule dans nos veines, et nos cœurs lui rappellent toujours nos
frères et sœurs.*

*Pour ceux qui nous ont appris des lettres d'or et les mots de bijoux du plus
grand et le plus beau chameau en toute connaissance. Qui a simplement
retravaillé leurs connaissances et leurs idées, un phare qui nous guide sur la
voie de la connaissance et du succès, pour nos estimés enseignants et
enseignants.*

Remerciement

*Après un voyage de recherche, d'effort et de diligence a abouti à l'achèvement
de cette recherche, grâce à Dieu Tout-Puissant*

*Sur Sa grâce, qui est sur nous, Il est le Tout-Puissant, et nous ne pouvons que
l'empêcher.*

Expressions de remerciements et d'appréciation Dr. "Ridha Touhami" Pourquoi

*Il nous a donné un effort, des conseils et des connaissances tout au long de la
réalisation de cette recherche.*

*Nous tenons également à remercier tous ceux qui ont contribué à cet effort
Recherche, et surtout notre distingué professeur qui a supervisé la formation
d'un lot 2ème Master Télécommunications et sans fil, et n'oubliez pas d'offrir les
phrases les plus belles et les plus précieuses*

Nous tenons également à rémercier le chef du département.

*Pour ceux qui nous ont aidés dans notre recherche, et une lumière qui brille
l'obscurité qui était debout Parfois sur notre chemin.*

*Pour ceux qui ont planifié l'optimisme sur notre chemin et nous ont donné de
l'aide et des installations Et l'information, nous avons tous les remerciements, y
compris le professeur "Chamsa Ali, Hattiri Massaoud, Boulila Mohammed" qui
Ils ont beaucoup contribué à nos encouragements lors de la recherche.*

*Recherchez Recherche, sinon pour ce que nous avons ressenti le plaisir du
travail et la douceur de la recherche, et quand nous sommes arrivés Pour ce que
nous avons atteint, ils nous remercient tous ...*

Résumé

Récemment, il ya eu un intérêt accru dans les systèmes de communication VLC (visible light communication) La recherche est motivée par un besoin croissant de systèmes de communication à l'intérieur et l'amélioration des technologies de lumière de diode électroluminescente (LEDs). La haute luminosité du LED a déjà été utilisée pour plusieurs applications et il est prévu qu'il sera également remplacer les sources d'éclairage conventionnelles dans la prochaine décennie. Dans un système de communication optique, il est possible de moduler le signal optique transmis de différentes manières

le but de ce mémoire est d'appliquer la technique de la modulation OFDM sur les systèmes VLC et d'analyser la performance de cette technique dans ce système.

Mots clés: OFDM, LED, VLC, DCO-OFDM.

Abstract

Recently, there has been an increased interest in VLC (visible light communication) systems. Research is driven by a growing need for communication systems within and the improvement of light emitting diode (LED) technologies. The high brightness of the LED has already been used for several applications and it is expected that it will also replace conventional light sources in the next decade. In an optical communication system, it is possible to modulate the transmitted optical signal in different ways

the purpose of this thesis is to apply the technique of OFDM modulation on VLC systems and to analyze the performance of this technique in this system..

Keywords: OFDM, LED, VLC, DCO-OFDM.

الملخص

في الآونة الأخيرة، هناك اهتمام متزايد في أنظمة الاتصالات الضوء المرئي (VLC)، ويرجع هذا البحث إلى الحاجة المتزايدة لأنظمة الاتصالات في الأماكن المغلقة وتحسين تقنيات الصمام الثنائي الباعث للضوء. وقد استخدمت السطوح العالية (LED) بالفعل لعدة تطبيقات، ومن المتوقع أن يحل محل مصادر الضوء التقليدية في العقد المقبل. وفي نظام الاتصالات البصرية، يمكن تعديل الإشارة الضوئية المرسلة بطرق مختلفة.

والغرض من هذه الرسالة هو تطبيق تقنية التشكيل OFDM على أنظمة VLC وتحليل أداء هذه التقنية في هذا النظام.

الكلمات المفتاحية: OFDM, LED, VLC, DCO-OFDM.

Dédicace	I
Remerciement	II
Résumé	III
Table des matières	IV
Liste des figures et tableaux	V

Numb	Titre	Page
	Introduction général	1
	Chapitre I: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	
1.1	Introduction	3
1.2	Canal à trajets multiple	4
1.2.1	Caractéristiques du canal multi-trajet	4
1.2.1.1	Atténuation	4
1.2.1.2	sélectivité en fréquence d'un canal	5
1.2.2	Effet des trajets multiples	5
1.2.2.1	Effet des retards supposés indépendants du temps	6
1.2.2.2	Distorsion de fréquence : effet Doppler	7
1.3	Principes de base de l'OFDM	8
1.3.1	Schéma bloc d'un système OFDM	10
1.4	La Modulation Multi porteuse	10
1.5	Notion d'orthogonalité	11
1.5.1	Préservation de l'orthogonalité (Intervalle de garde)	12
1.6	Synchronisation en OFDM	13
1.6.1	Sources d'erreurs de synchronisation	13
1.6.2	Types de systèmes de synchronisation	13
1.7	Problème des interférences	14
1.8	Interférence entre symboles (ISI)	14
1.9	Application de l'OFDM	15
1.9.1	ADSL	15
1.9.2	DAB (Digital Audio Broadcasting)	16
1.9.3	DVB-T (Terrestrial Digital Video Broadcasting)	17
1.9.4	IEEE 802.11g	17
1.9.5	IEEE 802.11h	18
1.10	Avantages et Inconvénients de l'OFDM	18
1.10.1	Avantages de l'OFDM	18
1.10.2	Inconvénients de l'OFDM	19
1.11	Simulation et résultats	20
1.12	Conclusion	21
	Chapitre II: Communication de lumière visible	
2.1	Introduction	23
2.2	Contexte historique	24
2.3	Description du système	25
2.3.1	Composants	26
2.3.2	L'émetteur VLC	27

2.3.3	Le récepteur VLC	28
2.3.4	Le canal VLC	30
2.4	Avantages et inconvénients	31
2.4.1	Avantages	31
2.4.2	Inconvénients	31
2.5	Applications VLC	31
2.6	Conclusions	35
Chapitre III : <i>Application OFDM sur le system VLC (Simulation et résultats)</i>		
3.1	Introduction	37
3.2	Description du système DCO-OFDM	37
3.2.1	L'émetteur	37
3.2.2	Canal	38
3.2.3	Récepteur	38
3.3	Simulation et résultat	39
3.4	Conclusion	42
	Conclusion générale	44

Références	VI
------------------	----

Figure	Titre	Page
Fig. 1.1	signaux multi-trajets	4
Fig. 1.2	variation de La fonction de corrélation	6
Fig. 1.3	Effet Doppler	7
Fig. 1.4	Schéma bloc d'un système OFDM	10
Fig. 1.5	N sous-porteuses orthogonales pour un système OFDM	11
Fig. 1.6	: Intervalle de garde (Préfixe cyclique)	12
Fig. 1.7	Sources d'erreurs de synchronisation	13
Fig. 1.8	Insertion du préfixe	14
Fig. 1.9	BER vs SNR pour différentes modulations QAM et psk pour OFDM	20
Fig. 2.1	LED communications	24
Fig. 2.2	Emplacement de la lumière visible et des fréquences RF au spectre électromagnétique	27
Fig. 2.3	Diodes électroluminescentes	27
Fig. 2.4	Photodiodes	27
Fig. 2.5	Fibre optique	28
Fig. 2.6	Schéma de blocs du système VLC	28
Fig. 2.7	utilisation VLC pour internet sans fil (Li-Fi)	33
Fig. 2.8	VLC pour les réseaux de véhicules	34
Fig. 2.9	Robot HOSPI	34
Fig. 2.10	Fonctionnement d'UTROV	35
Fig.3.1	système DCO-OFDM	39
Fig.3.2	les données binaires générées	39
Fig.3.3	les constellations du modulation 16-QAM	40
Fig.3.4	le signal après IFFT	40
Fig.3.5	le signal OFDM avant et après l'ajout de 'DC bias'	41
Fig.3.6	BER en fonction de SNR	41

NUM	TITRE	PAGE
TAB 1.1	Les paramètres et modes DAB	17
TAB 1.2	Les deux mode définis dans l'DVB-T	17

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Récemment, la communication par lumière visible (VLC) a attiré beaucoup d'attention en tant que technologie concurrentielle pour la communication sans fil intérieure. Dans les applications des diodes électroluminescentes (LED), VLC offre des avantages tels que l'éco-environnement, la sécurité et la limite du spectre de fréquence. Pendant ce temps, l'introduction du multiplexage orthogonal de division de fréquence (OFDM) à VLC peut améliorer les performances du système.[1]. L'OFDM pour les systèmes VLC est proposé pour supporter le haut taux de données par transmission parallèle de symboles de modulation (M-QAM) à haut niveau sur sous-porteuses orthogonales. Les systèmes OFDM sont en mesure de supporter taux de données élevés sans besoin d'égaliseurs de canal complexes et le canal variable dans le temps peut être facilement estimé en utilisant l'estimation du canal de domaine fréquentiel. En général, la sortie du modulateur OFDM est complexe et bipolaire.

En IM (intensity modulation) pour les systèmes optiques, des variations d'enveloppe de signal OFDM sont utilisées pour moduler l'intensité de la LED et le signal bipolaire doit être converti en un signal unipolaire. En outre, la modulation en quadrature n'est pas possible et le signal en bande de base doit être réel. Par conséquent, l'OFDM couramment utilisé dans les communications RF doit être modifié.

Toutes ces informations sont expliquées dans ce mémoire qui est réparti en trois chapitres.

Dans le 1^{ère} chapitre, le principe de la technique multi-porteuse OFDM est décrit. Une description sur les caractéristiques du canal multi trajet a été donnée. Ensuite, une étude sur les problèmes d'interférence entre porteuses et entre symboles a été menée.

La modulation QAM (Modulation d'Amplitude en Quadrature) qui représente une partie de l'implantation numérique de la technique OFDM a été expliquée. Enfin des exemples d'application et d'utilisation de l'OFDM et ses avantages et inconvénients ont été donnés.

Le deuxième chapitre, une description sur le système des communications par lumière visible, et pour identifier les différentes applications disponibles en ce moment, et pour identifier les avantages et les inconvénients de ce système.

Dans le troisième chapitre, Nous avons étudié un modèle optique de l'OFDM en utilise DC-biais et des algorithmes IFFT et FFT, Enfin simulé l'application de cette technique OFDM sur le système communication par lumière visible sur MATLAB.

***Chapitre I: OFDM (Orthogonal
Frequency Division Multiplexing)***

1.1 Introduction

Le paysage des communications numériques a été fortement modifié depuis le début des années 90 avec le développement de la recherche et des applications dans le domaine des transmissions radio mobiles.

Ainsi, les techniques de modulation sur les canaux à trajets multiples sont devenues l'outil incontournable pour concevoir et construire les futurs systèmes universels de communications mobiles.

Ces dernières années, l'intérêt pour la modulation OFDM, une solution parfaite pour les canaux qui présentent des échos importants (canaux multitrajets), a été rétabli, alors que dans le passé le caractère pratique de ce concept semblait être limité.

Le canal à évanouissements (Rayleigh ou Multipath) constitue un modèle mathématique solide pour la grande majorité des canaux réels:

- les canaux de transmission sous-marins (par ondes acoustiques),
- les canaux de transmission entre mobiles et les satellites à orbite basse (GlobalStar, Iridium, ...).
- les canaux radio mobiles terrestres (GSM, DECT, ...).
- les canaux de transmission troposphérique.

La propagation d'une onde radio est soumise à plusieurs phénomènes qui peuvent causer des évanouissements, soit la réflexion/réfraction, la diffraction et la dispersion. La réflexion/réfraction c'est le phénomène par lequel une onde électromagnétique est partiellement réfléchi et partiellement transmise lorsqu'elle entre en contact avec un milieu ayant des caractéristiques électriques différentes du milieu d'origine.

La technique de multiplexage fréquentiel orthogonal à porteuses multiples (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) est une alternative intéressante pour combattre les évanouissements sélectifs en fréquence. Cette nouvelle technique qui permet de doubler le débit binaire et par conséquent l'efficacité spectrale sans compromettre la largeur de bande, est basée sur la répartition de l'information à transmettre sur un grand nombre de sous porteuses orthogonales. Chaque sous porteuse est modulée à bas débit binaire de façon à rendre le canal non sélectif en fréquence et en temps. [2]

1.2 Canal à trajets multiples

Avant d'exposer le principe des modulations multi-porteuses, nous allons donner quelques caractéristiques du canal pour lequel ce type de modulations est intéressant. Les premières applications ont concerné la diffusion du son numérique dans le canal radio mobile : c'est l'exemple de ce canal que nous prenons, en n'omettant pas le fait que le modèle de ce canal peut aussi s'appliquer à d'autres canaux très perturbés.

Le signal émis sous forme d'onde subit de nombreuses réflexions, en particulier en milieu urbain et le récepteur reçoit une série d'échos de provenances diverses et imprévisibles. Ces échos d'amplitudes variables introduisent de retards variables. (fig.1.1)

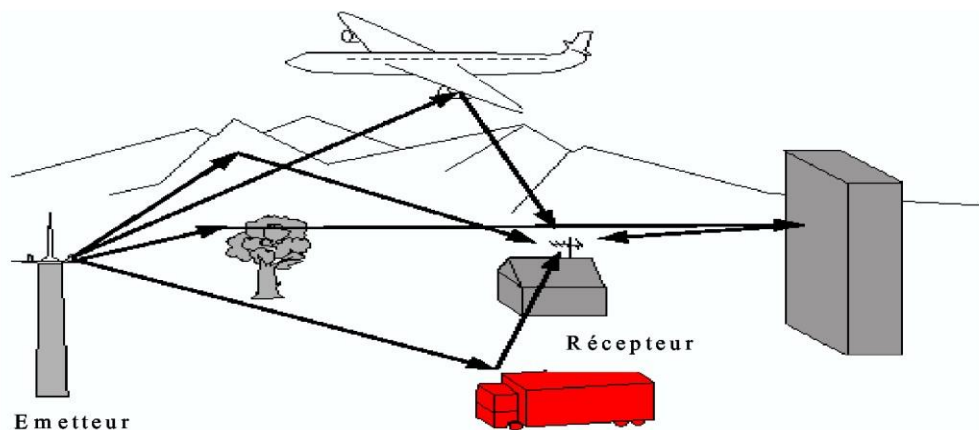


figure 1.1: signaux multi-trajets [3].

1.2.1 Caractéristiques du canal multi-trajet

1.2.1.1 Atténuation

C'est la baisse dans la puissance du signal lors de sa transmission d'un point à un autre . Elle peut être provoquée par:

- La longueur du chemin de transmission.
- Les obstructions dans le chemin et les effets par trajets multiples. Tous les objets qui obstruent la visibilité directe du signal (LOS: Line Of Sight) de l'émetteur au récepteur peuvent causer de l'atténuation.
- Masquage du signal peut se produire quand il y a une obstruction entre l'émetteur et le récepteur. Il est généralement provoqué par des bâtiments et des collines. C'est le facteur environnemental le plus important de l'atténuation. Les signaux radio se diffractent en dehors des frontières des obstructions ce qui va empêcher le masquage derrière les collines et les bâtiments.

1.2.1.2 La sélectivité en fréquence d'un canal

Un canal est dit sélectif en fréquence lorsqu'il ne se comporte pas identiquement suivant la fréquence du signal. Certaines fréquences seront transmises plus rapidement que d'autres, ou encore seront atténuées plus que d'autres. Le signal sera alors déformé lors de la transmission : les données seront dispersées dans le temps, pouvant mener à des interférences entre symboles [3].

Ce phénomène de sélectivité en fréquence est aggravé par la présence de trajets multiples pour un même signal transmis. Du fait des nombreuses réflexions que le signal peut subir en environnement urbain, le récepteur recevra une série d'échos d'amplitudes et de retards variables. Cette problématique du canal à trajets multiples est critique dans le cas d'un canal radio-mobile, c'est-à-dire lorsque le récepteur et l'émetteur ne sont pas fixes relativement. Les différents échos et amplitudes variant dans l'espace, ils varieront dans le temps dans le cas d'un récepteur mobile [3].

1.2.2 Effet des trajets multiples

De façon générale, supposons que le signal émis s'écrive :

$$s(t) = \text{Re}[s_1(t)e^{2j\pi f_c t}] \quad (1.1)$$

La fonction étant la fréquence porteuse.

Le signal reçu est la somme des signaux issus des différents chemins :

$$\sum a_n(t)s(t - \tau_n(t)) \quad (1.2)$$

Chaque chemin provoque une atténuation α_n et un retard τ_n qui varient en fonction du temps. Le signal $x(t)$ peut aussi s'écrire :

$$x(t) = \text{Re}\{\sum [a_n(t)e^{-2j\pi f_c \tau_n(t)} s_1(t - \tau_n(t))]\}e^{2j\pi f_c t} \quad (1.3)$$

L'expression entre crochets montre que le signal en bande de base subit des atténuations α_n , des retards τ_n et des déphasages ($2j\pi f_c \tau_n$) qui dépendent tous du temps.

A partir de cette formule on peut définir la fonction de transfert en bande de base :

$$c(t, \tau) = \sum a_n(t)e^{-2j\pi f_c \tau_n(t)} \delta(t - \tau_n(t)) \quad (1.4)$$

1.2.2.1 Effet des retards supposés indépendants du temps

C'est une généralisation de ce qui a été présenté le signal $x(t)$ est :

$$x(t) = \sum a_n s(t - \tau_n) \quad (1.5)$$

Est la fonction de transfert en bande de base ne dépend plus du temps :

$$c(\tau) = \sum a_n e^{-2j\pi f_c \tau_n} \delta(\tau - \tau_n) \quad (1.6)$$

Notons que le signal reçu est convolué par une fonction dépendant des retards : ici la convolution est discrète, mais on peut modéliser le canal par une distribution continue de retards.

Soit T_m le plus grand des retards appelé étalement des retards. La fonction de corrélation de c représente la puissance moyenne d'un signal impulsionnel dans le canal. Sa variation $\phi_c(\tau)$ en fonction de T_m donne le profil des intensités créées par les retards dus aux multi-chemins et le retard maximum T_m . La transformée de Fourier de la fonction de corrélation de c donne la bande de cohérence spectrale.

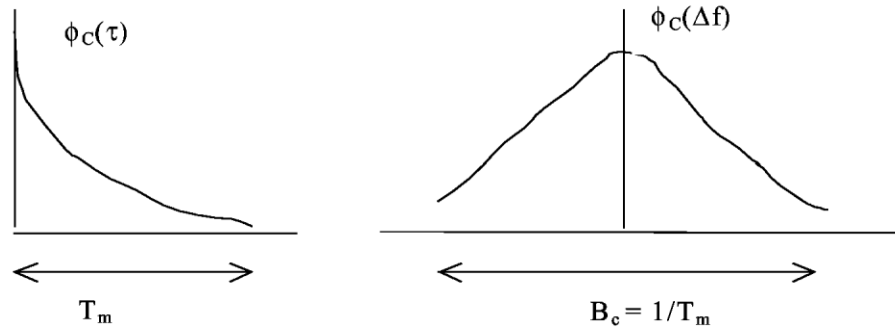


figure 1.2 variation de La fonction de corrélation.[3]

Si la largeur de bande du signal Δf est inférieure à B_c la bande de cohérence, l'amplitude du signal est peu affectée, considérant que la fonction de transfert est quasiment constante.

Si la largeur de bande du signal Δf est supérieure à B_c , certaines composantes spectrales du signal seront affaiblies et le signal subira des distorsions. Le canal est sélectif en fréquence. Prenons un signal composé de symboles émis avec une période T .

Si la durée des symboles est grande devant T_m , les symboles sont reçus sans

interférences. Si la durée des symboles est petite devant T_m , les symboles interfèrent entre eux. [3]

1.2.2.2 Distorsion de fréquence : effet Doppler

Lors du déplacement d'un récepteur ou émetteur dans le cas d'une réception mobile, plusieurs ondes parviennent au récepteur, ayant chacune un décalage de phase variable dans le temps. Cela engendre sur le signal résultant des variations permanentes dans l'amplitude du signal. Cette variation temporelle des phases et de l'amplitude des signaux s'appelle l'effet Doppler (voir la Figure 1.3) [2]

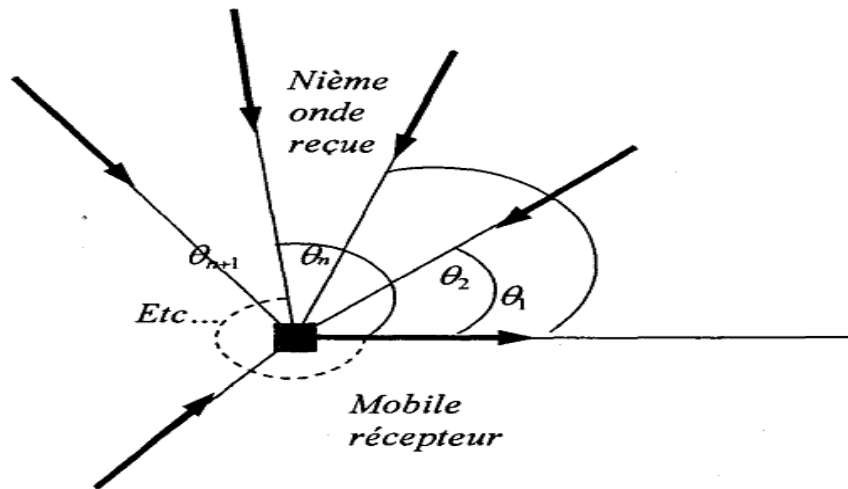


Figure 1.3: Effet Doppler[2]

Supposons que le mobile se déplace à une vitesse $\vec{V}$ et qu'il reçoive les ondes issues d'un même signal dans toutes les directions possibles θ_n c'est-à-dire que le canal est dispersif.

L'onde reçue dans la direction θ_n subit un décalage de fréquence égal à [2] :

$$f_d = f_c - f_i = \frac{|\vec{V}|}{c} f_c \cos \theta_n \quad (1.7)$$

où

$\vec{V}$: Vitesse du mobile (m/s).

f_c : Fréquence de la porteuse (Hz).

f_i : Fréquence instantanée du signal reçu (Hz).

c : Vitesse de la lumière (3×10^8 m/s).

θ_n : Angle formé entre le mobile et l'onde transmise.

1.3 Principes de base de l'OFDM

La modulation à porteuses multiples OFDM est très semblable à une technique de multiplexage par répartition de fréquence FDM (Frequency Division Multiplexing) qui est utilisée pour accroître les débits et plus particulièrement des lignes téléphoniques. Le multiplexage fréquentiel consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux ou sous-bandes plus étroits et à affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur ou à un usage exclusif.

La plupart des systèmes actuels accordent la priorité à l'efficacité en bande passante, même si les critères de puissance et de coût suivent de près dans l'esprit du concepteur. Chaque amélioration de l'un de ces paramètres d'efficacité (bande passante, puissance ou coût), entraîne une diminution d'un autre critère, une complexité accrue ou une réduction des performances dans les environnements défavorables.

En d'autres termes, plus l'efficacité spectrale des techniques de transmission est importante, plus le matériel devient complexe, ce qui le rend plus difficile à concevoir, à tester et à construire.

Nous avons assisté ces dernières années à une mutation majeure, passant de la modulation d'amplitude analogique simple (AM), de la modulation de fréquence/phase (FM/PM),, ainsi que de la modulation d'amplitude à bande latérale unique (SSB) et de la modulation d'amplitude sans porteuse (DSB-SC) , aux nouvelles techniques de modulation numérique à porteuse unique.

On utilise couramment les formats courants :

- ASK (Amplitude Shift Keying) C'est la technique la plus simple et la plus naturelle pour moduler une porteuse sinusoïdale $e(t) = E \cdot \cos(\omega t)$ par un signal numérique. En modulation d'amplitude, le spectre du signal modulé est symétrique par rapport à la raie de la porteuse et les deux bandes latérales ont la même forme que le signal BF.
- FSK (Frequency shift keying) La porteuse est modulée en fréquence par le signal numérique, c'est à dire qu'elle saute d'une fréquence F_0 (pour le « 0 ») à une fréquence F_1 (pour le « 1 »). Ce type de modulation est cependant très utilisé pour des débits moyens à cause de sa bonne immunité aux parasites qui caractérise tous les systèmes fonctionnant en modulation de fréquence.

• QAM (Quadrature amplitude modulation) Pour réaliser concrètement une modulation numérique 4-QAM, le signal $x_n(t)$ à transmettre est décomposé en symboles de 2 éléments binaires successifs (débits). Le signal $I(t)$ est formé à partir du premier élément des débits et $Q(t)$ à partir du deuxième élément. Ces signaux $I(t)$ et $Q(t)$ sont souvent filtrés dans le but de limiter le spectre du signal modulé 4-QAM. On utilise des filtres du même genre que ceux utilisés pour les modulations ASK et FSK, à savoir deux filtres passe-bas limitant le spectre des signaux $I(t)$ et $Q(t)$ au lobe principal, soit deux filtres de Nyquist.

On voit que c'est essentiellement la phase de la porteuse qui change au cours du temps. C'est la raison pour laquelle la modulation d'amplitude en quadrature à 4 états 4-QAM s'appelle aussi QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

La modulation en quadrature à x états (x -QAM), qui est la généralisation de la modulation 4-QAM, a été développée pour les modems rapides, puisqu'elle permet d'augmenter le débit numérique sans élargir la bande passante du signal modulé. Voici les occupations spectrales correspondant aux différentes modulations avec filtrage de Nyquist:

• 4-QAM	symbole de 2 bits porteuse à 4 états	$B=(1+a)D/2$
• 16-QAM	symbole de 4 bits porteuse à 16 états	$B=(1+a)D/4$
• 64-QAM	symbole de 6 bits porteuse à 64 états	$B=(1+a)D/6$
• 128-QAM	symbole de 7 bits porteuse à 128 états	$B=(1+a)D/7$
• 256-QAM	symbole de 8 bits porteuse à 256 états	$B=(1+a)D/8$

où a est le facteur de mise en forme (roll-off), $0 < a < 1$.

Comme on parle de processeurs parallèles en informatique, on peut dire que l'une des caractéristiques du procédé OFDM est l'utilisation des transmissions parallèles dans le domaine des fréquences. Les concepteurs du processus de modulation OFDM ont tourné la difficulté par l'utilisation d'une transformée de Fourier inverse. D'un point de vue pratique, la nécessité d'opérer très vite, en temps réel, conduit à utiliser une FFT (Fast Fourier Transform = transformée de Fourier rapide) numérique, réalisée à l'aide d'algorithmes très performants.

[2]

1.3.1 Schéma bloc d'un système OFDM

Ce schéma (Figure 1.4) représente un système OFDM complet . Il comporte un émetteur, un récepteur et un canal radio à travers lequel se fait la transmission.

On a d'abord le générateur des données qui vont être transmises, ensuite on a un convertisseur série parallèle qui divise les données à son entrée en des flux de données parallèles de débits réduits.

On a encore le bloc de modulation numérique (QAM, 16-QAM ...), le bloc d'insertion et d'omission de temps de garde, les blocs FFT et IFFT pour la modulation et démodulation des sous-porteuses et enfin les blocs caractérisant le canal de transmission. A la sortie, on rejoint les flux de données parallèles pour reconstituer les données initiales.[4]

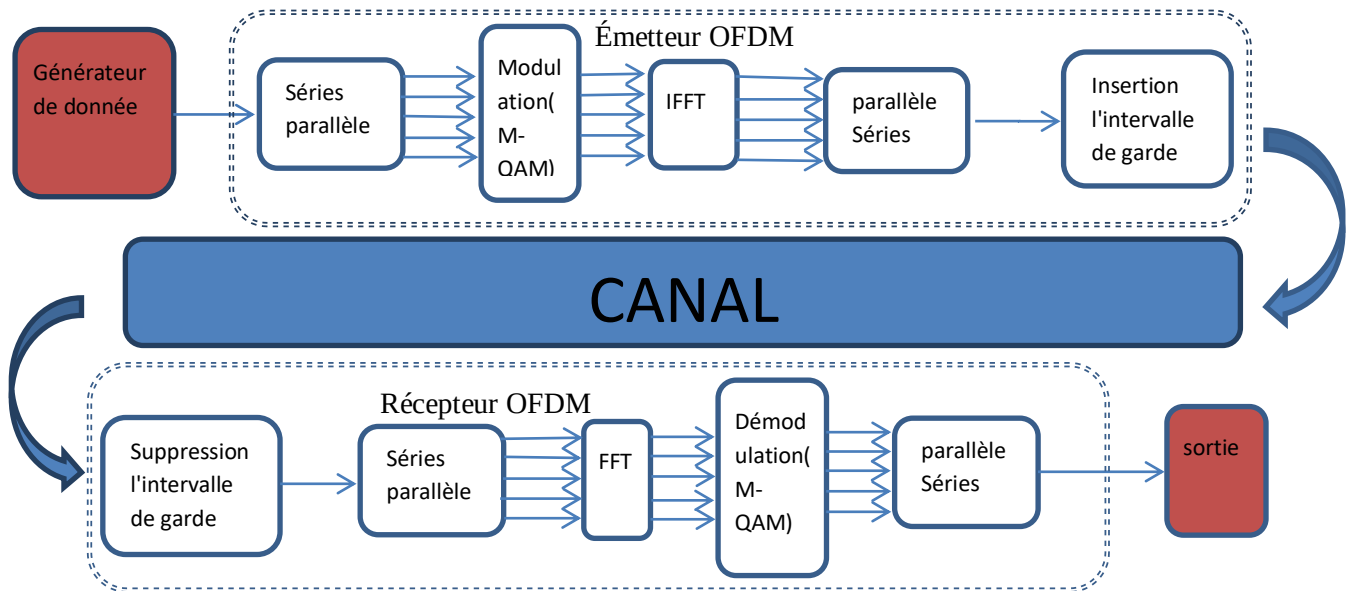


Figure 1.4: Schéma bloc d'un système OFDM.[4]

1.4 La Modulation Multi porteuse

Les techniques multi porteuses consistent à transmettre en même temps des données numériques en les modulant sur un grand nombre de porteuses.

L'amélioration de l'efficacité spectrale s'effectue est obtenue grâce à l'orthogonalisation des sous porteuses, ce qui permet d'implémenter la modulation et la démodulation à l'aide de circuits basés sur l'algorithme de la transformée de Fourier rapide et inverse (FFT) (IFFT). [5]

1.5 Notion d'orthogonalité

La différence fondamentale entre les différentes techniques classiques de modulation et l'OFDM est que cette dernière autorise un fort recouvrement spectral entre les sous-porteuses, ce qui permet augmenter sensiblement leur nombre ou d'amoindrir l'encombrement spectral. Cependant, pour que ce recouvrement n'ait pas effet néfaste. Les porteuses doivent respecter une contrainte d'orthogonalité, à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel.

L'utilisation d'un très grand nombre de porteuses est une perspective presque effrayante il faut sûrement beaucoup de modulateurs /démodulateurs et filtres.

Il faut aussi davantage de largeur de bande, Il est heureusement simple de résoudre ces deux problèmes en spécifiant un espacement rigoureusement de $F_u = 1/T_u$ entre les sous-porteuses, ou est la période (utile ou active) du symbole pendant laquelle le récepteur intègre le signal démodulé. Les porteuses forment alors ce que les mathématiciens appellent un ensemble orthogonal (Figure 1.5). [5]

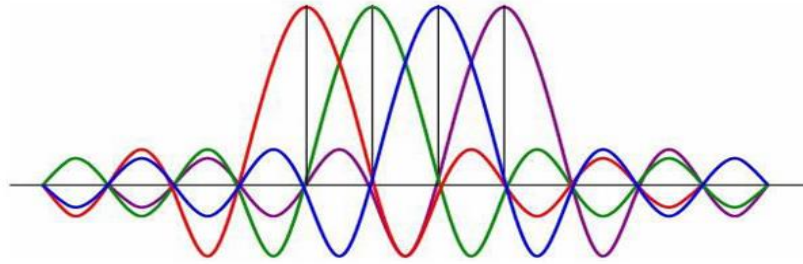


Figure 1.5: N sous-porteuses orthogonales pour un système OFDM. [6]

En considérant tout d'abord le signal OFDM comme un simple multiplexage en fréquence, la $k^{\text{ème}}$ sous-porteuse (en bande de base) peut s'écrire sous la forme:

$$\Psi_k(t) = e^{jk\omega_u t} \quad (1.8)$$

Les porteuses doivent satisfaire la condition d'orthogonalité:

$$\int_{\tau}^{\tau+T} \Psi_k(t) * \Psi_l(t) dt = 0, k \neq l \quad (1.9)$$

Donc, cette contrainte est une condition d'orthogonalité pour les fonctions $\Psi_k(t)$, et les fonctions $\Psi_k(t)$ forment une base orthogonale de l'espace temps-fréquence, ce qui permet de retrouver facilement les symboles et autorise donc un recouvrement spectral sans perte de l'information. [2]

1.5.1 Préservation de l'orthogonalité (Intervalle de garde)

Une même suite de symbole arrivant à un récepteur par deux chemins différents se présente comme une même information arrivant à deux instants différents, elles vont donc s'additionner provoquant ainsi les deux types de défauts suivants :

- L'interférence intra symbole: Addition d'un symbole avec lui-même légèrement déphasé.
- L'interférence inter symbole: addition d'un symbole avec le suivant plus le précédent légèrement déphasé.

Entre chaque symbole transmis, on insère une zone "morte" appelée intervalle de garde.

De plus, la durée utile d'un symbole sera choisie suffisamment grande par rapport à l'étalement des échos. Ces deux précautions vont limiter l'interférence inter symbole.

La durée T_u pendant laquelle est émise l'information diffère de la période symbole T_s car il faut prendre en compte, entre deux périodes utiles, un "temps de garde" T_g (figure 1.6) qui a pour but d'éliminer l'ISI qui subsiste malgré l'orthogonalité des porteuses. Pour que cet intervalle de garde soit efficace, sa durée doit être au moins égale à l'écho non négligeable le plus long (celui qui a le retard maximal).

Entre la période symbole, la période utile et l'intervalle de garde s'instaurent donc la relation :

$$T_s = T_u + T_g \quad (1.10)$$

Le temps de garde, s'il peut être un intervalle de garde "blanc" pendant lequel on n'émet rien, est plus généralement une copie de la fin de la trame OFDM. Si cette méthode est efficace pour lutter contre l'ISI, elle pénalise cependant sensiblement le débit de transmission, et certains systèmes OFDM profitent des progrès dans le domaine de l'égalisation pour s'en affranchir. [4]

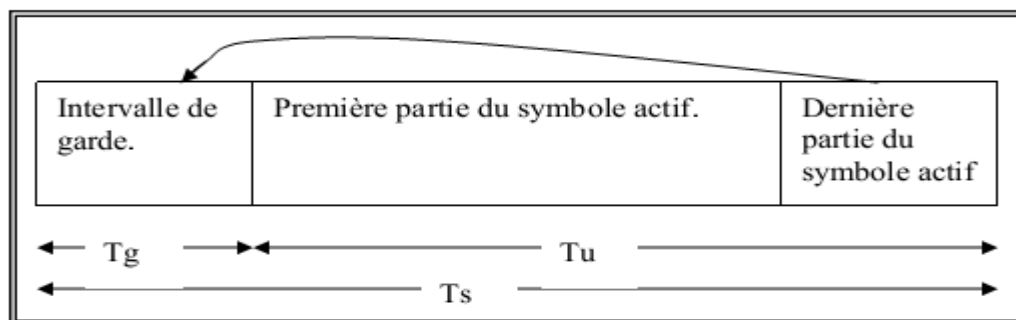


Figure 1.6: Intervalle de garde (Préfixe cyclique) [4]

1.6 Synchronisation en OFDM

Dans un premier temps, les sources d'erreurs de synchronisation dans une transmission de type OFDM en évaluant leur impact sur les performances du système. Il présente ensuite les algorithmes de synchronisation existants dans la littérature. Enfin, en se basant sur ces algorithmes, une structure de synchronisation adaptée au problème étudié est proposée. [4]

1.6.1 Sources d'erreurs de synchronisation

Les erreurs de synchronisation dans un système OFDM, présentées par la figure 1.7, sont dues aux décalages en temps et en fréquence entre le signal reçu à l'entrée du récepteur et les horloges et oscillateurs locaux en réception. [7]

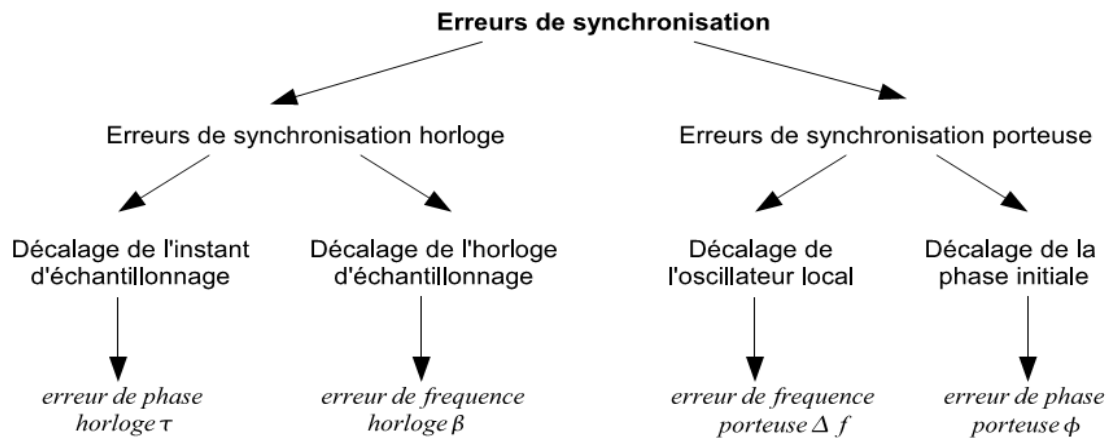


Figure 1.7: Sources d'erreurs de synchronisation. [7]

Ces erreurs de synchronisation perturbent le signal reçu et conduisent à des dégradations plus ou moins importantes des performances du système. Ce paragraphe détaille l'origine de ces erreurs et évalue leur impact sur les performances du système. []

1.6.2 Types de systèmes de synchronisation

Selon le niveau de synchronisation considéré, on peut distinguer trois types de systèmes de synchronisation :

- Système A : sans synchronisation.
- Système B : avec synchronisation au niveau des terminaux.
- Système C : complètement synchronisé au niveau de la station de base.

1.7 Problème des interférences

Comme nous l'avons vu, les symboles subissent des échos et un symbole émis parvient au récepteur sous forme de plusieurs symboles atténués et retardés. Un symbole émis lors d'une période i TS peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période $(i-1)$ TS. Il se produit alors des interférences. Dans cette partie nous expliquons les méthodes d'annulation des interférences entre porteuses (ICI, Inter Carrier Interference) et les interférences entre trames OFDM. Ce dernier type d'interférences est communément appelé interférences entre symboles (ISI, Inter Symbol Interference) même si ce terme n'est pas très bien adapté au procédé OFDM. [3]

1.8 Interférence entre symboles (ISI)

Les interférences entre symboles sont dues au comportement multi-trajets du canal, le signal reçu provenant de la contribution du trajet direct et des trajets multiples introduisant des déphasages et des retards, ces derniers pouvant être du même ordre de grandeur que la durée d'un symbole. Pour remédier à ce problème, on ajoute entre deux trames OFDM, un préfixe ou intervalle de garde, dont la durée Δ doit être supérieure au retard maximum des signaux issus des trajets indirects. L'insertion de ce préfixe est présentée par la figure 1.8. [2]

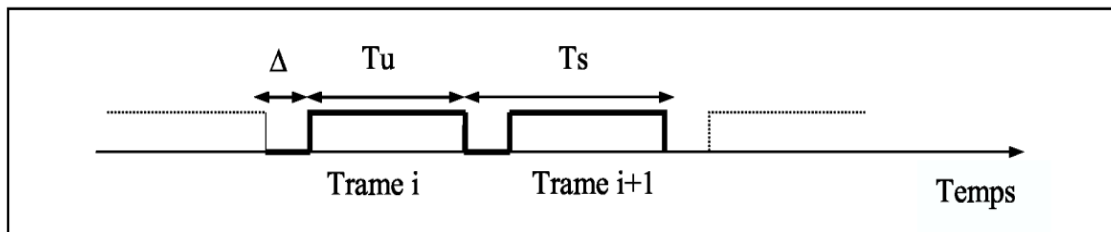


Figure 1.8: Insertion du préfixe [3]

La trame initiale $\{D\}$ 1: N comporte N échantillons, chacun d'eux correspondant à un symbole issu de la modulation M-QAM. L'écart T_e entre deux échantillons successifs est identique à la durée d'un symbole D_k , ce qui revient simplement à dire que l'on a un point d'échantillonnage par symbole. Dans la technique OFDM, en dehors des aspects de transformée de Fourier, on effectue une conversion série parallèle (S/P) puis parallèle série (P/S). Pour retrouver le débit initial, il suffit simplement, lors de la remise en série, que l'écart temporel T_e entre deux symboles OFDM s_n , donc entre les deux échantillons correspondants, soit identique à T_e . T_e est souvent appelé "période d'échantillonnage de la trame OFDM". Malheureusement, l'insertion d'un préfixe va provoquer dans ce cas une diminution du débit utile. Pour pallier cet inconvénient, la solution la plus simple consiste,

lors de la conversion parallèle série, à diminuer T_e pour retrouver le débit initial. Ceci se traduira évidemment par une augmentation de la bande passante nécessaire à la transmission.

Si on ajoute un préfixe dont la durée est identique à celle de L symboles, la nouvelle période T_e d'échantillonnage pour obtenir le même débit doit être égale à :

$$T'_e = \frac{T_u}{N+L} = \frac{NT_e}{N+L} \quad (1.11)$$

La durée effective de la trame OFDM, comportant les N symboles échantillonnés à T_e est désormais réduite à :

$$T'_u = NT'_e = \frac{T_u}{N+L} \quad (1.12)$$

De même l'espacement inter fréquence Δf entre deux sous porteuses devient :

$$\Delta f' = \frac{1}{T'_u} = \frac{N+L}{N} \Delta f \quad (1.13)$$

La bande de transmission est donc augmentée du même facteur

$$K = \frac{N+L}{N} \quad (1.14)$$

Le préfixe est ajouté à l'émission après l'IFFT, puis enlevé à la réception avant le module de la FFT. [3]

1.9 Application de l'OFDM

1.9.1 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 que 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 1.104MHz. Les 4 premiers KHz est réservée 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 montré 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. [3]

1.9.2 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.[3]

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 m s	125 m s
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)

Tableau1.1 :les paramètres et modes DAB [3]

1.9.3 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. [3]

Paramètres de Mode	2k	8k
Bande passante	7.61 MHz	7.61 MHz
Nombre de sous porteuses	1,705	6,817
Modulation	QPSK	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)	$T_s/4, T_s/8, T_s/16, T_s/32$	$T_s/4, T_s/8, T_s/16, T_s/32$
taux de transmission d'information	4.98–31.67 Mbps	4.98–31.67 Mbps

Tableau 1.2 : les deux modes définis dans l'DVB-T [3]

1.9.4 IEEE 802.11g

La norme IEEE 802.11b peut transmis de 11 Mbit / s de données dans une bande de 2.4-GHz qui est aussi appelé '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 décidé, et même comme l'IEEE 802.11a est susceptible d'être utilisé. [3]

1.9.5 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. [3]

1.10 Avantages et Inconvénients de l'OFDM

1.10.1 Avantages de l'OFDM

Un des grands avantages des schémas de transmission OFDM est d'avoir partager 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 où 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. [3]

1.10.2 Inconvénients 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 (frequency offset) et de synchronisation. Dans le premier cas, la fréquence 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 pré-égaliseur. [3]

1.11 Simulation et résultats

Dans cette simulation nous appliquons différents modulations sur le technique OFDM: PSK, 8-PSK, 16-PSK, DQPSK, QPSK, BPSK, ET, 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM.

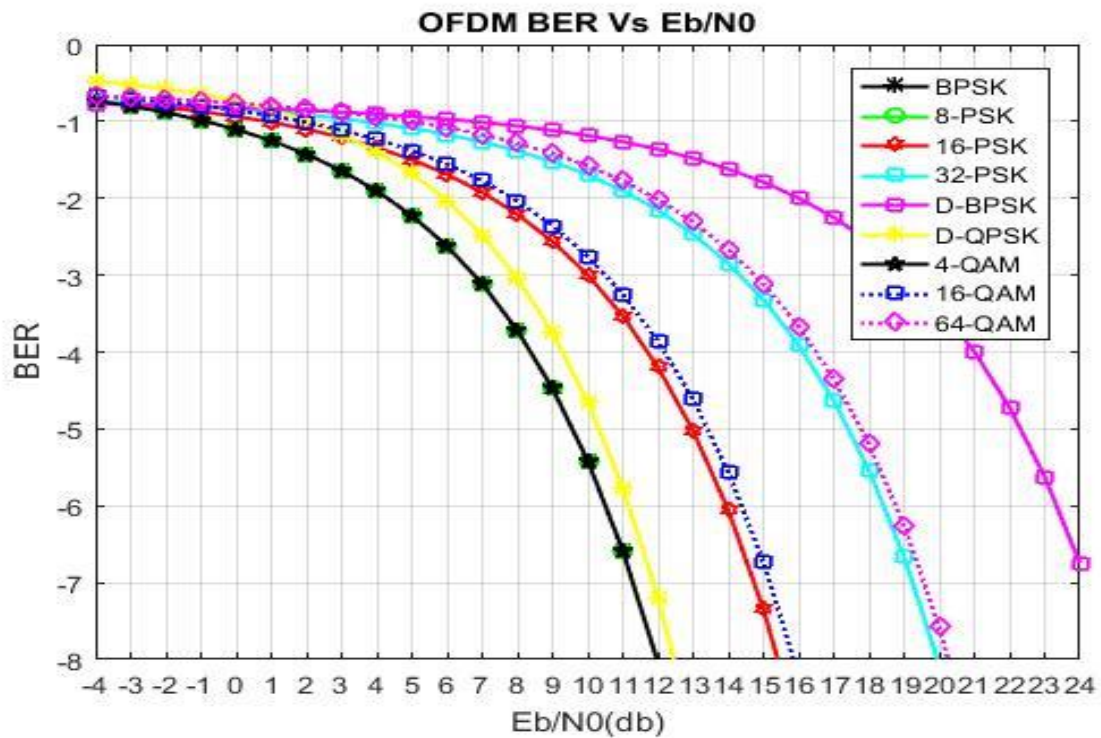


Figure1.9 : BER vs SNR pour différentes modulations QAM et PSK pour OFDM.

- Interprétation des résultats**

Les résultats présentés ci-dessus sont pour $M = 32$, où M = nombre de sous-porteuses. De même, les performances BER pour 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, QPSK, BPSK dans la figure respectivement. , On observe que lorsque nous augmentons le SNR, le BER diminue pour chaque technique de modulation.

Parmi toutes les techniques de modulation, nous découvrons que OFDM fournit les meilleurs résultats BER pour QPSK, BPSK et 8-PSK, la modulation, suivie de 4-QAM et 16-QAM, 64QAM et la performance BER moyenne est obtenue pour le reste des techniques de modulation.

1.12 Conclusion

Le succès du déploiement des systèmes de communication de la téléphonie mobile, et la fusion entre les réseaux informatiques et les systèmes de communication sans fil ont promis d'un bon future dans le monde de communication sans fil à haut débit comme l'accès à l'Internet et les applications multimédia. Un des majeurs problèmes que rencontre la transmission à débit élevé est le problème de trajet multiple. L'OFDM apparaît comme une bonne solution pour les trajets multiples, et ceci en divisant la bande de transmission en N sous-canaux orthogonaux. Un préfixe cyclique (Intervalle de Garde) est ensuite ajouté au début du symbole et ce préfixe est identique au segment de même longueur à la fin du symbole. La longueur de cet intervalle est choisie de façon à être supérieure à la valeur maximale de délai dû à l'effet de trajet multiple.

L'OFDM présente une grande simplicité dans la modulation et la démodulation ayant besoin d'un seul modulateur et d'un seul démodulateur. Ceci a lieu dans le cas où les différents éléments fondamentaux sont correctement sélectionnés : Nombreuses porteuses orthogonales, intervalle de garde, entrelacement et des bonnes informations sur l'état du canal.[4]

Chapitre II : Communication par lumière visible

2.1 Introduction:

Ces dernières années, la société moderne a présenté un intérêt croissant pour les technologies de communication sans fil et la demande de transfert de données sans fil devrait augmenter de façon exponentielle dans les années prochaines années. La solution à cette demande sans précédent était, dans l'immédiat, satisfaite par des communications de type radiofréquence (RF). En raison du niveau de maturité et de l'acceptation générale, les communications RF sont à cette époque la meilleure solution pour les communications sans fil. Cependant, cette technologie a ses inconvénients, tels que la bande passante limitée. En outre, il existe des cas ou des scénarios où l'utilisation de RF peut causer des interférences, comme dans les avions, les aéroports ou les hôpitaux.

Pendant ce temps, le développement des dispositifs d'éclairage d'état solide, en particulier des diodes électroluminescentes (LED), a eu une croissance énorme. De nos jours, les LED sont très fiables, économes en énergie et ont une durée de vie qui dépasse de loin les sources lumineuses classiques. Compte tenu des nombreux avantages, les LED ont commencé à être utilisés dans des applications de plus en plus d'éclairage, ils remplaceront complètement les sources d'éclairage traditionnelles. Outre ces caractéristiques remarquables, les LED sont capables de commutation rapide, ce qui leur permet d'être utilisés non seulement pour l'éclairage mais aussi pour la communication.

La communication par lumière visible (VLC) représente une nouvelle technologie de communication qui utilise des LED pour l'éclairage et la transmission sans fil des données. VLC utilise la lumière visible (380-780 THz) comme moyen de communication, qui offre des largeurs de bande énormes gratuitement, il n'est pas limité par aucune loi et il est sûr pour le corps humain, permettant des transmissions de haute puissance. VLC a le potentiel de fournir à faible coût, haute vitesse de communication de données sans fil. Même si VLC est une nouvelle technologie, il a eu un développement rapide, qui est une preuve de son énorme potentiel, le débit maximal rapporté pour les systèmes VLC a évolué de 80 Mb / s en 2008 à 3000 Mb / s en 2014. [8]



Figure 2.1: LED communications[9].

2.2 Contexte historique:

L'utilisation de la lumière pour envoyer des messages est une très ancienne idée . La signalisation du feu et de la fumée a été utilisée dans les civilisations anciennes. Par exemple, les anciens Grecs ont utilisé des boucliers polis pour réfléchir la lumière du soleil pour signaler la bataille et les enregistrements romains indiquent que des plaques métalliques polies ont été utilisées comme miroirs pour refléter la lumière du soleil pour la signalisation longue distance. Les Chinois ont commencé à utiliser des phares avant que les Romains et les Américains utilisent des signaux de fumée. Au début des années 1800, l'armée américaine utilisait un télégraphe solaire sans fil appelé "Heliograph" qui signale l'utilisation de la lumière Morse Reflète par un miroir. Les flashes sont réalisés en faisant pivoter temporairement le miroir ou en interrompant le faisceau avec un obturateur. La marine utilise souvent des feux clignotants, c'est-à-dire des lampes Aldis, pour envoyer des messages en utilisant le code Morse d'un navire à l'autre. En 1880, le premier exemple de technologie VLC a été démontré par Alexander Graham Bell avec son «photophone» qui utilisait la lumière du soleil réfléchi sur un miroir vibrant et une cellule photo en sélénium pour envoyer de la voix sur un faisceau lumineux. Les communications radio et radar étaient plus efficaces que les communications optiques (OC). OC a commencé à attirer l'attention sur l'invention de l'amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement (laser) et diode laser (LD) dans les années 1960, suivie dans les années 1970 par le développement de fibres optiques pour transmettre des informations En utilisant la lumière visible, dans les années 1980, et l'invention du réseau de fibres Bragg dans les années 1990. Ces inventions ont servi de base à la révolution des télécommunications de la fin du XXe siècle et ont fourni l'infrastructure pour Internet. Le prix Nobel de physique 2009 a été consacré à trois scientifiques (Charles K. Kao, Willard S. Boyle, George E. Smith), qui ont joué un rôle important dans le développement des technologies de l'information modernes dans la transmission de la lumière dans la communication optique. Les avancées dans les dispositifs optoélectroniques basiques tels que les diodes électroluminescentes et LD, les photodiodes p-intrinsèques (PIN) et les photodiodes à avalanche (APD) et divers composants optiques ont attiré les ingénieurs pour considérer les sources Optique Pour la transmission de données sans fil qui a conduit à Communications sans fil optiques modernes (OWC). Le premier système OWC à Plusieurs décennies. En 1979, Gfeller et Bapst ont présenté un système OWC interne . Dans leur système, le rayonnement optique diffus dans la région IR a été utilisé pour interconnecter un groupe de terminaux situés dans une pièce à un contrôleur de cluster commun. Au cours de la dernière décennie, nous avons assisté à l'émergence de communications lumineuses visibles

(VLC) alimentées par la technologie d'éclairage à l'état solide (SSL). SSL est un domaine de développement rapide, à la fois en termes d'exploitation commerciale et de recherche universitaire et industrielle. Des LED avec une large gamme de couleurs sont disponibles, y compris la lumière blanche. La puissance de sortie et l'efficacité de l'appareil augmentent rapidement. Le champ des applications est également en expansion. Les LED blanches sont généralement utilisées comme pièces de rechange pour lampes à incandescence grâce à plus de 10 fois l'efficacité énergétique améliorée.

Par conséquent, l'éclairage LED doit révolutionner la façon dont nous illuminons nos maisons, nos bureaux, nos bâtiments publics et nos rues. Ces sources SSL, étant des périphériques semi-conducteurs, comportent des fonctionnalités supplémentaires. Leur intensité lumineuse peut être modifiée à des vitesses très élevées, de sorte que leur fonctionnalité peut être prolongée au moyen de la modulation d'intensité (IM) pour devenir également un dispositif de communication sans fil. VLC est originaire du Japon et le consortium de Communications par lumière Visible (VLCC) a été créé en novembre 2003. La VLCC a des sociétés importantes au Japon et vise à publier et à standardiser la technologie VLC. La formation de VLCC a stimulé l'intérêt mondial pour la technologie VLC et la première norme IEEE pour VLC - IEEE 802.15.7 - a émergé récemment. Les universitaires de l'Université d'Édimbourg ont travaillé sur VLC depuis 2004 et ont développé des schémas de modulation améliorés pour atteindre des débits de données élevés à l'aide d'ampoules LED.[10]

2.3 Description du système :

VLC est une technologie de communication optique qui utilise des rayons lumineux, ces rayons se situent entre [400-800] THz, en tant que support optique pour la transmission de données par illumination. Il utilise des impulsions de lumière rapides, qui ne peuvent pas être détectées par l'œil humain, pour transmettre des données. Il comprend toute utilisation de la partie de lumière visible du spectre électromagnétique pour transmettre des informations. Le processus de normalisation VLC est effectué dans le réseau local sans fil IEEE (802.15). Nous pouvons évidemment voir que l'utilisation de la partie optique du spectre garantit une bande passante d'environ 10 000 fois supérieure à celle de l'utilisation des fréquences RF[9]. Voir La figure (2.2) ci-dessous

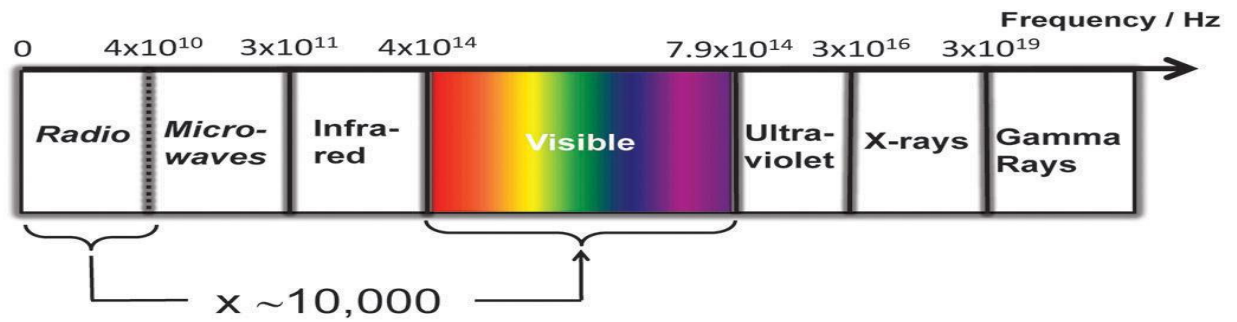


Figure 2.2: Emplacement de la lumière visible et des fréquences RF au spectre électromagnétique. [9]

2.3.1 Composants: [9]

VLC est un système de communication qui consiste en un émetteur, un récepteur et un canal de communication. Les principaux composants des systèmes VLC sont:

* Diodes électroluminescentes à haute luminosité (LED) ou toute source lumineuse, qui agit comme



Figure2.3: Diodes électroluminescentes[10]

* Une photodiode en silicium possède le rouleur d'un détecteur et elle montre une bonne réponse à la longueur d'onde visible.



Figure2.4: Photodiodes[10]

* Le canal de communication est l'air ou la fibre optique.



Figure 2.5: Fibre optique [10]

Habituellement, nous ajoutons à ces composants certains circuits nécessaires comme un circuit de conduite et un circuit de réception. Le circuit de commande se compose d'un circuit de commande et d'un étage de sortie pour modifier les données et le rendre prêt à être envoyé et le circuit de réception consiste en un filtre pour sélectionner l'étage d'amplification de la bande requise pour fournir le rapport Signal / bruit requis pour démoduler le signal. Nous montrons un schéma bloc du système VLC à la figure (2.6). [11]

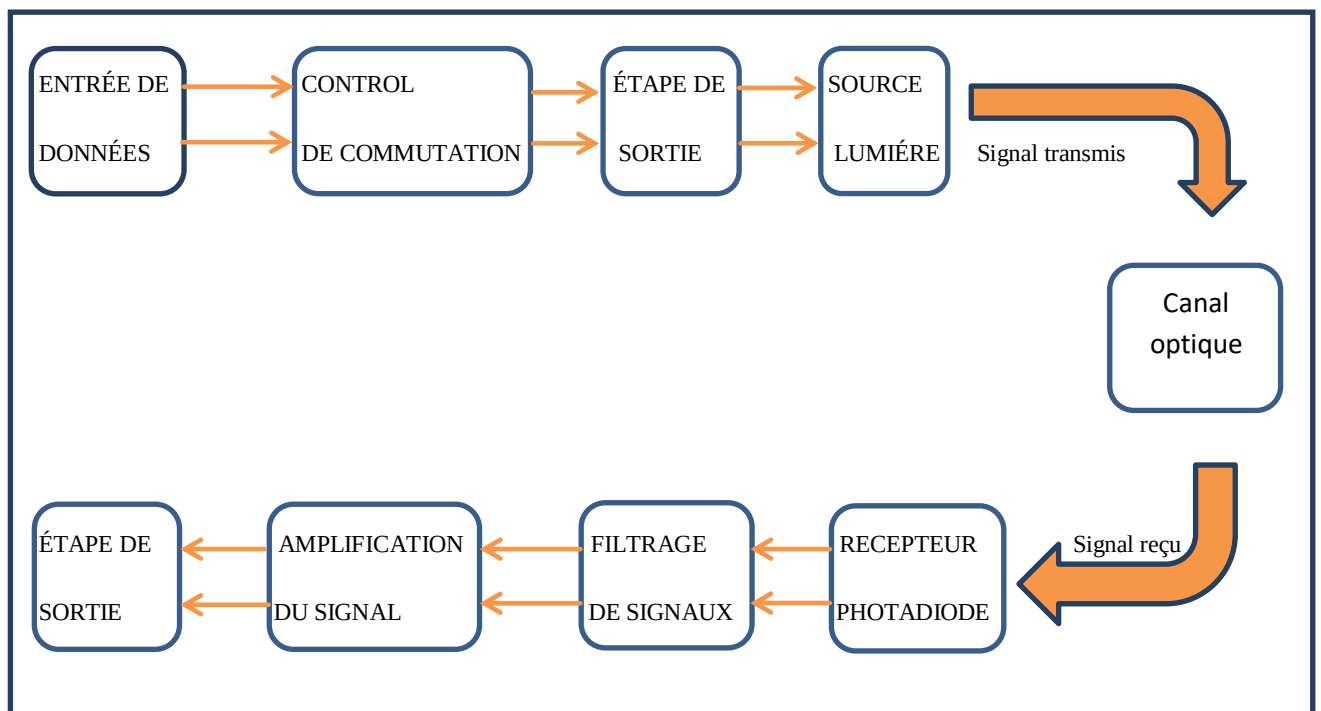


Figure 2.6: Schéma de blocs du système VLC. [9]

2.3.2 L'émetteur VLC

Un émetteur VLC est un dispositif qui transforme des données dans les messages qui peuvent être envoyées sur le milieu optique de l'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 des données ne doit pas affecter l'objectif principal de l'appareil qui est l'éclairage ou la signalisation. A partir de cette préoccupation, l'émetteur VLC doit pouvoir s'adapter aux exigences d'éclairage. Cela signifie qu'il est censé utiliser la même puissance optique ou si l'application l'exige, pour permettre la gradation. En outre, l'émetteur VLC ne doit pas induire de scintillement notable.

La composante principale de l'émetteur VLC est l'encodeur qui convertit les données en un message modulé. Le codeur commande la commutation des LED selon les données binaires et le débit de données imposé. Les données binaires sont ainsi converties en un faisceau lumineux modulé en amplitude. En général, la lumière produite par les LEDs est modulée en courant avec la modulation d'amplitude d'On-Off Keying (OOK), mais d'autres techniques de modulation, telles que la modulation orthogonale différentielle de fréquence OFDM, la modulation multi-tonalité discrète (DMT) ou le spectre de propagation de séquence directe (DSSS) être utilisés. Une solution rentable pour l'encodeur 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 FPGA (Field Programmable Gate Array) qui sera capable de fournir des performances améliorées à l'aide de techniques de traitement de signaux numériques.

Les paramètres de l'émetteur VLC sont principalement limités par les caractéristiques des LED. Le débit de données (fréquence d'émission) dépend des capacités de commutation des LED tandis que la zone de service de l'émetteur dépend de la puissance d'émission et du modèle d'illumination (angle d'émission). Actuellement, l'industrie SSL est capable de produire des LED qui peuvent offrir des fréquences de commutation de quelques dizaines de mégahertz. [8]

2.3.3 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. Selon les performances requises et les 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 influencent le mieux les performances du système VLC, déterminant la plage de communication et la résilience contre les interférences.

Généralement, les récepteurs VLC sont basés sur des éléments photosensibles qui ont une bande passante élevée et offrent la possibilité de communications à grande vitesse. Cependant, étant donné que la lumière incidente n'est pas seulement due à l'émetteur, mais également à d'autres sources lumineuses (artificielles ou naturelles), le récepteur est soumis à des interférences importantes. Les performances du récepteur VLC peuvent être améliorées à l'aide d'un filtre optique qui rejette les composantes indésirables du spectre, telles que la composante IR. De plus, dans les applications à grande vitesse utilisant des LED blanches, le filtre optique permet seulement le passage d'un rayonnement à bande étroite, correspondant à la couleur bleue. La raison de ce choix est que la lumière blanche est obtenue à partir de LED bleues et de luminophore jaune, et comme le temps de commutation des LED bleues est plus court, des débits de données plus élevés sont activés .

L'effet des interférences peut également être réduit en réduisant le champ de vision du récepteur FOV (Field of View) qui influence la zone de service. Un FOV plus large permet une zone de service plus large mais présente l'inconvénient de capturer plus de bruit, conduisant à la dégradation SNR. Cependant, les applications à courte portée à l'intérieur nécessitent une mobilité accrue et la possibilité de rétrécir la FOV n'est pas prise en compte dans la plupart des cas. D'autre part, pour les applications à longue portée à l'extérieur, où la gamme induit de petits angles, la FOV étroite est une solution efficace. Des études théoriques et expérimentales ont montré qu'une FOV étroite aide les systèmes VLC à améliorer leur robustesse au bruit en raison de la lumière du jour ou d'autres émetteurs VLC . Le récepteur est déterminé par le FOV du système optique, qui concentre également la lumière sur le photodétecteur en utilisant une lentille. Le photodétecteur est habituellement basé sur une photodiode de silicium polarisée inversement fonctionnant en mode photoconducteur qui génère un courant proportionnel à la lumière incidente. La valeur du photocourant dépend également de la sensibilité spectrale des photodiodes.

De cette raison, l'augmentation de la zone du photodétecteur peut améliorer les performances du système. Cependant, la zone du photodétecteur influence fortement sa capacité, qui à son tour influe sur la bande passante réalisable. Dans ces circonstances, le choix de la zone de photo-détecteurs représente un compromis entre le SNR et la bande passante. Ensuite, en raison des faibles valeurs du photocourant généré, un circuit de transimpédance est utilisé pour transformer le petit Courant en une tension. La solution de

transimpédance offre un commerce équitable entre le gain de bande passante produit (GBP) et le bruit.

La tension fournie par le circuit de transimpédance est amplifiée et filtrée pour supprimer le bruit de 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 de données décode l'information à partir du signal reconstruit obtenant le message binaire. [8]

2.3.4 Le canal VLC

Les deux composantes principales de VLC sont interconnectées à travers le canal de communication optique en espace libre. Comme la lumière visible est un rayonnement électromagnétique, semblable à 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 bas.

De plus, le canal VLC pourrait contenir de nombreuses sources de bruit optique. En journée, la source de bruit la plus importante est le soleil. D'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 lumière artificielle ou les conditions dynamiques rendent 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 du brouillard puissant peuvent affecter la liaison VLC en provoquant la diffusion de la lumière contenant les données. La multitude de sources de bruit, ainsi que les signaux faibles, en particulier à longue distance, affecte significativement le SNR dans VLC. Une autre caractéristique du canal VLC provient des conditions LoS (Line of Sight) strictes, ce qui limite la propagation par trajets multiples. Dans le VLC, le multitrajet a un effet limité qui n'est connu que pour des distances courtes émetteur - récepteur. Comme on l'a déjà mentionné, le SNR peut être amélioré au récepteur en utilisant des filtres optiques, par une conception adéquate du système optique ou en utilisant un gain adaptatif et un filtrage adaptatif. [8]

2.4 Avantages et inconvénients :

2.4.1 Avantages :[12]

- * Ce est gratuit
- * Ne cause pas de problèmes de santé
- * Pas d'interférence EM
- * Leds facilement disponible
- * Sûr à utiliser dans les hôpitaux
- * Moins cher
- * Commutation rapide

2.4.2 Inconvénients :

Les limites et les inconvénients que nous devons considérer incluent le bruit provenant de la lumière ambiante et la ligne de visée du système. Si l'intensité de la lumière ambiante est supérieure à celle de la lumière de notre système, le rapport signal / bruit (SNR) est faible, ce qui faussera les données transmises. Pour compenser cela, le SNR sera maximisé en définissant des seuils sur le FPGA en fonction des signaux de tension produits par la lumière ambiante en conjonction avec le signal de l'émetteur. En outre, le système ne sera maximisé que si les LED sont directement face au capteur. Si l'angle est modifié même légèrement, la portée maximale du système diminue considérablement. [12]

2.5 Applications VLC:

Les applications VLC ne sont pas limitées aux applications intérieures. Certaines applications principales de VLC sont détaillées ci-dessous.

***Li-Fi**

Une des applications les plus importantes envisagées pour VLC est Light-Fidelity Ou "Wi-Fi Optical". Grâce à la large bande passante disponible, VLC pourrait permettre une connexion Internet haute vitesse à partir du plafonnier. Le Li-Fi est favorisé dans ce cas par le fait que les distances impliquées ne sont que quelques mètres, ce qui équivaut à la distance entre le plafond et le bureau.

Dans ce domaine, VLC est considéré comme capable de fournir plusieurs connexions - Gb / s. Comme le montre la figure 2.7, les données d'Internet sont transformées par un routeur Li-Fi en un signal appliqué à la source lumineuse. La source lumineuse s'allume et s'éteint à des fréquences impénétrables par l'homme, selon les données à envoyer. Le récepteur transforme le signal lumineux en données numériques qui seront livrées au terminal mobile. En ce qui concerne le téléchargement, il peut être fait en utilisant un lien infrarouge. [8]

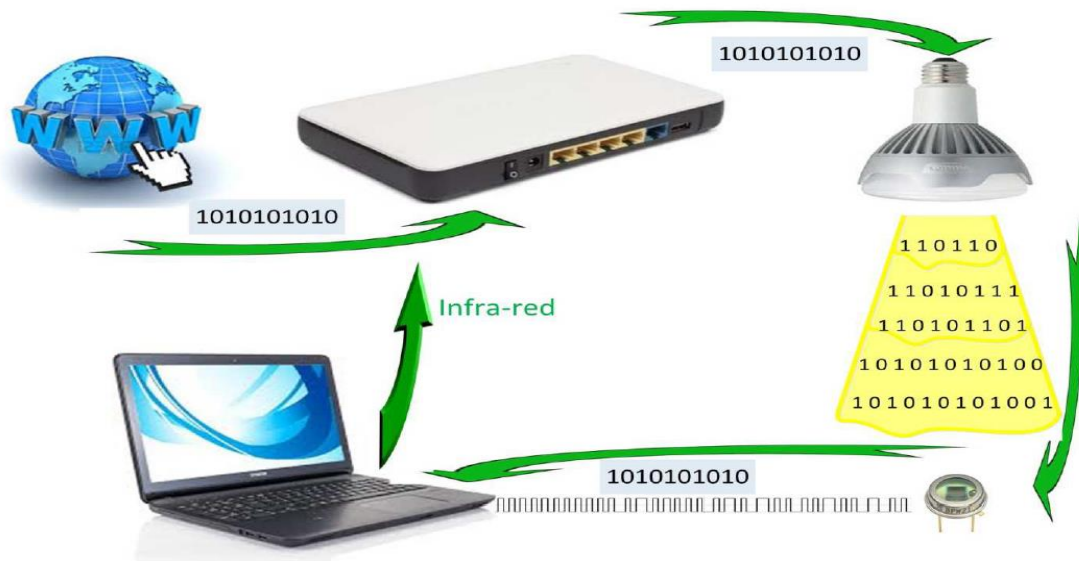


Figure 2.7: utilisation VLC pour internet sans fil (Li-Fi). [8]

L'évolution rapide et l'énorme potentiel de la technologie Li-Fi ont contribué à la Fondation du consortium Li-Fi en 2011. L'organisation rassemble les leaders Entreprises et institutions de recherche de la technologie de la communication optique et vise à Contribuant au développement de la technologie.

*** Véhicule et transport:**

les LED blanches peuvent également être utilisées dans le domaine de l'automobile pour la communication de données audio ou numériques entre voitures, entre infrastructures de trafic et voitures, entre robots ou même des avions. Les premières voitures qui emploient des LED comme phares apparaissent maintenant. affiche une communication lumineuse visible entre la tête et les feux arrière de deux voitures. [13]

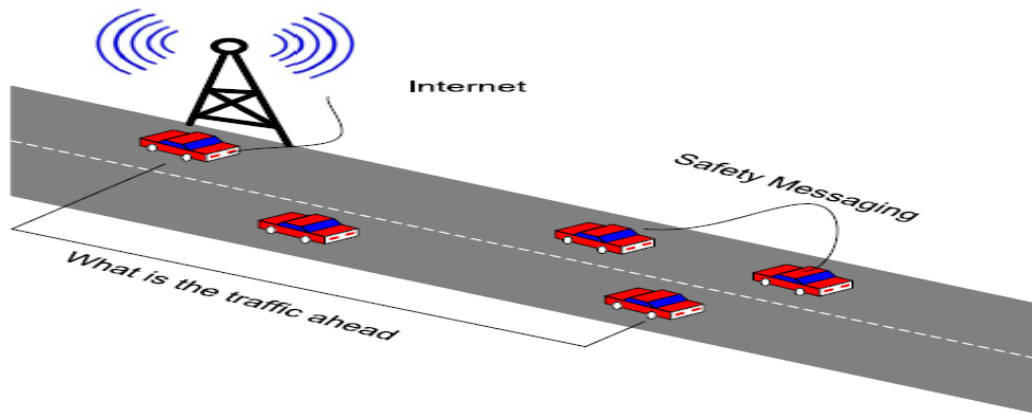


Figure 2.8: VLC pour les réseaux de véhicules[11]

*** Hôpitaux et soins de santé:**

La lumière visible est bien adaptée à la communication dans les hôpitaux et les soins de santé, en particulier autour des scanners IRM et dans les salles d'opération où le rayonnement RF est souhaitable. Il existe un projet en cours au Japon pour intégrer les applications VLC dans les hôpitaux et les soins de santé. [13]

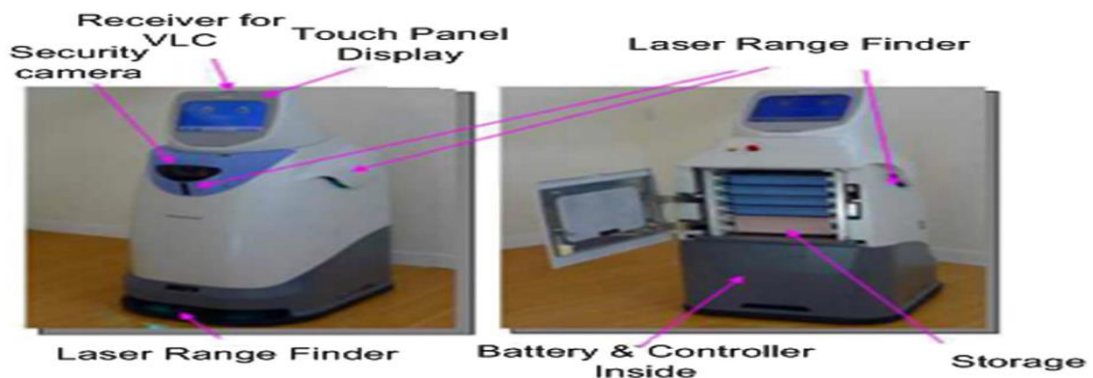


Figure 2.9: Robot HOSPI[11]

*** Environnements dangereux:**

les communications lumineuses visibles sont un choix attrayant pour les zones où il y a un risque d'explosion (mines, usines pétrochimiques, plates-formes pétrolières, etc.) Car il fournit à la fois un éclairage et des communications sécurisés. [13]

*** Services basés sur l'emplacement:**

certaines applications pour VLC peuvent être utilisées pour estimer l'emplacement de l'utilisateur. L'Autorité d'information géospatiale (GSI) au Japon a déjà commencé l'activité d'estimation intérieure en utilisant des LED blanches.[13]

*** Services de défense et de sécurité:**

la lumière visible est un candidat fort pour les nouveaux systèmes de défense et de sécurité. Le fait que la lumière visible ne puisse pas être détectée de l'autre côté d'un mur. Avantages pour la sécurité. [13]

*** Aviation:**

les diodes électroluminescentes sont déjà utilisées dans les avions pour l'éclairage et peuvent également être mises à la disposition des fournisseurs. Une telle application réduit le coût et le poids de l'avion car il n'y a pas besoin de fils. [13]

*** Communications sous-marines:**

La lumière visible est très attrayante pour les environnements où les ondes radio ne se propagent pas sur une longue distance. Étant donné que les ondes radio ne fonctionnent pas bien à travers l'épaisseur Conducteurs électriques comme l'eau, VLC peut être utilisé comme alternative pour supporter les communications sous-marines. Un tel avancement peut avoir permis aux véhicules sous-marins et aux plongeurs de communiquer entre eux. Le travail utilise le feu vert Pour les communications sous-marines jusqu'à 30 mètres. Sous l'eau visible, la communication de la lumière est également illustrée.[13]

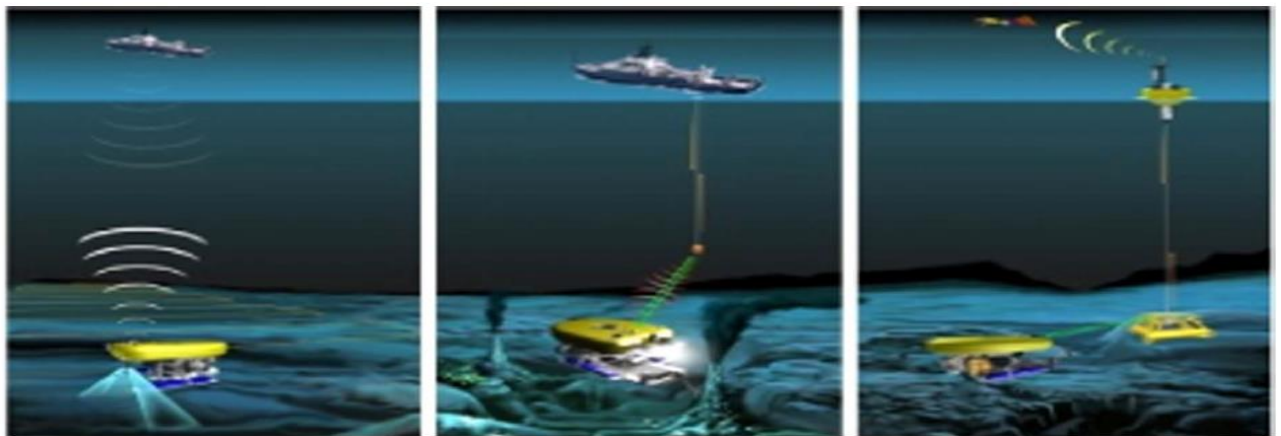


Figure 2.10: Fonctionnement d'UTROV[11]

2.6 Conclusions:

Ce chapitre a introduit les principes de base de VLC, présentant l'architecture d'un tel système. En soulignant les avantages de cette technologie, les principales applications de VLC ont été identifiées alors qu'en mettant en évidence les points faibles de VLC, les principaux défis ont été présentés

***Chapitre III : Application OFDM
sur le system VLC (Simulation
et résultats)***

3.1 Introduction:

La communication avec la lumière visible a suscité un intérêt grandissant et peut être un candidat prometteur complémentaire à la communication RF conventionnelle. VLC peut fournir l'éclairage et la transmission de données simultanément via la lumière visible on utilise la technique de modulation OFDM. Il y a plusieurs méthodes pour appliquer cette technique dans ce système, parmi eux ACO-OFDM, DCO-OFDM...[14]

Dans ce chapitre, nous simulerons le système de VLC en utilisant OFDM et en examinant le taux d'erreur de bits par rapport au rapport signal / bruit.

La méthode choisie dans notre travail, est DCO-OFDM .

3.2 Description du système DCO-OFDM

Dans ce système il y a d'émetteur et de récepteur et canal sont représentés sur la figure .31

3.2.1 l'émetteur

Lors de la première étape de la procédure de modulation, une séquence de données en série binaire à débit élevé est divisée en plusieurs flux de données de débit inférieur parallèles qui sont transmis simultanément sur un certain nombre de sous-porteuses. Chaque flux de données passe par une cartographie de constellation où tous les bits $\log_2(M)$ sont mappés sur des valeurs complexes selon une technique de modulation d'amplitude en quadrature QAM. Pour $X_n = A_n + jB_n$ où, $n = 0, 1, \dots, N-1$ désigne le numéro de sous-porteuse, la symétrie hermitienne est prise par miroir conjugué complexe comme défini ci-dessous,

$$X_{N-n} = X_n^*$$

où $n = 0, 1, \dots, N/2$ et $X_0 = X_{N/2} = 0$. En prenant le N-point IFFT, le K^{th} échantillon de valeur réelle est désigné par x_k

$$x_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right)$$

Ainsi, un symbole DCO-OFDM est généré avec une séquence de données bipolaire de valeur réelle N point. Par la suite, le préfixe cyclique (CP) est ajouté dans chaque symbole OFDM et envoyé au convertisseur parallèle à série pour la transmission de données en série. Enfin, le biais DC est ajouté et coupé le signal à zéro étiquette pour assurer une transmission de données non négative. [14][15]

3.2.2 Canal

La fibre optique en ajoutant le bruit Gaussien blanc additif (AWGN) est considéré dans le canal de propagation pour inclure l'effet de bruit sur les données reçues.[15]

3.2.3 Récepteur

Au récepteur, le cadre DCO-OFDM est divisé en flux de données parallèles ($N + N_{CP}$). Le nombre de symboles DCO-OFDM obtenus à partir de ce processus de conversion en série vers parallèle est exactement égal à celui des symboles transmis. Le préfixe cyclique est ensuite retiré de chaque symboles et la démodulation est effectuée successivement à l'aide de N FFT. Les flux de données complexes évalués peuvent être générés à partir de l'opération FFT,

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(\frac{-j2\pi nK}{N}\right)$$

La sortie de ce processus FFT est dé-mise en miroir et appliquée au démodulateur QAM pour récupérer les flux de données binaires transmis d'origine. À la fin, les flux de données parallèles sont de nouveau converties en flux de données en série sous forme binaire et se comparent aux données d'émission pour la mesure BER.[15]

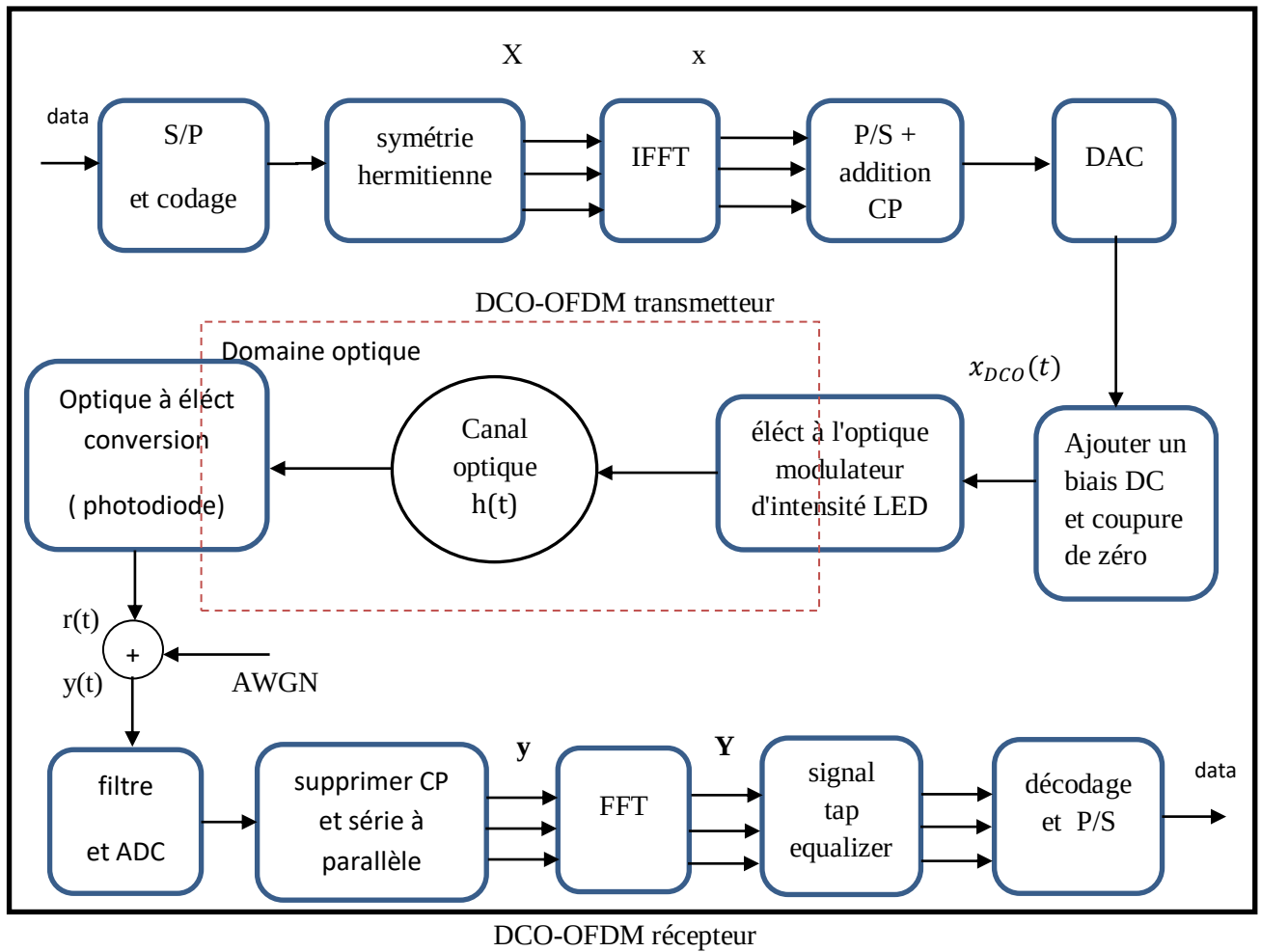


Figure 3.1: système DCO-OFDM. [14]

3.3 Simulations et résultats:

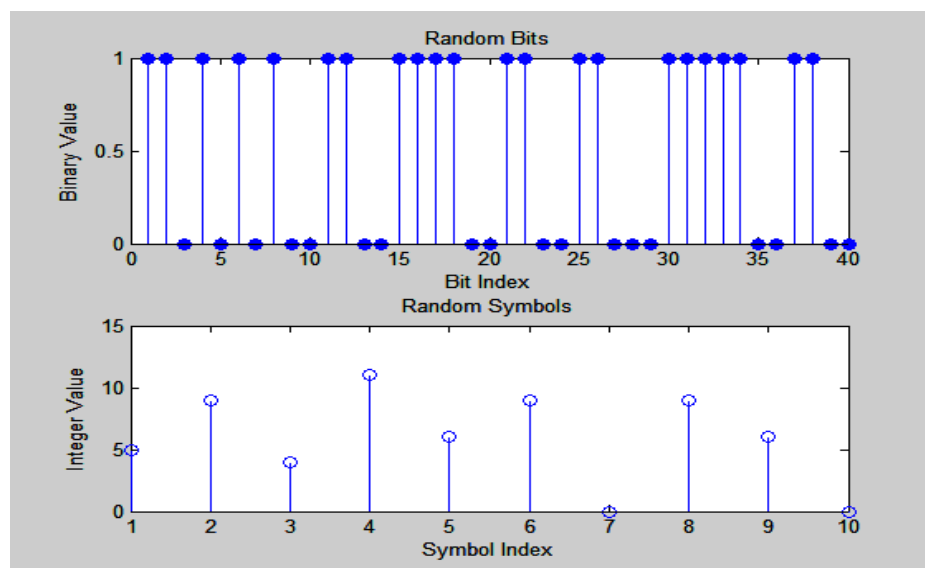


Figure 3.2: les données binaires générées

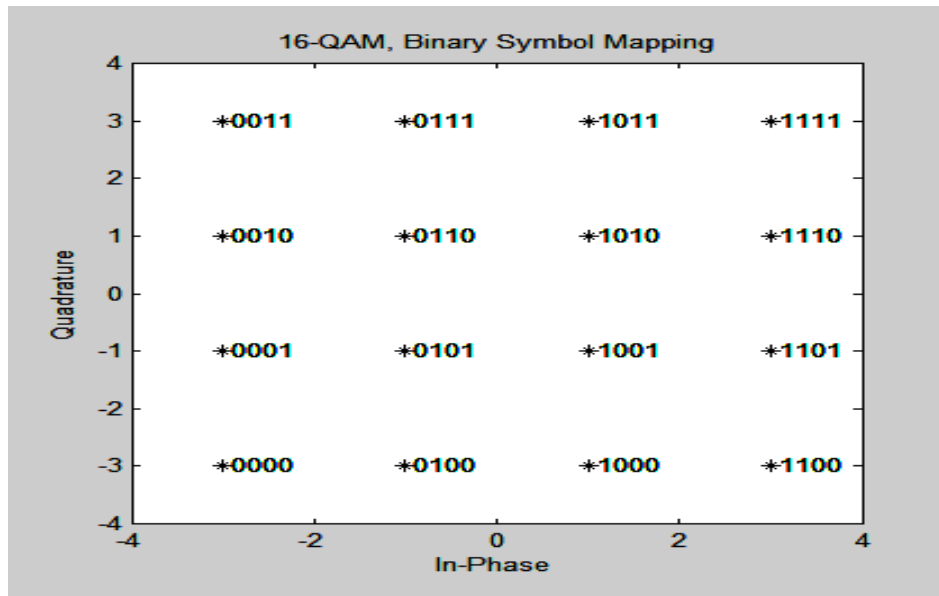


Figure 3.3: les constellations du modulation 16-QAM

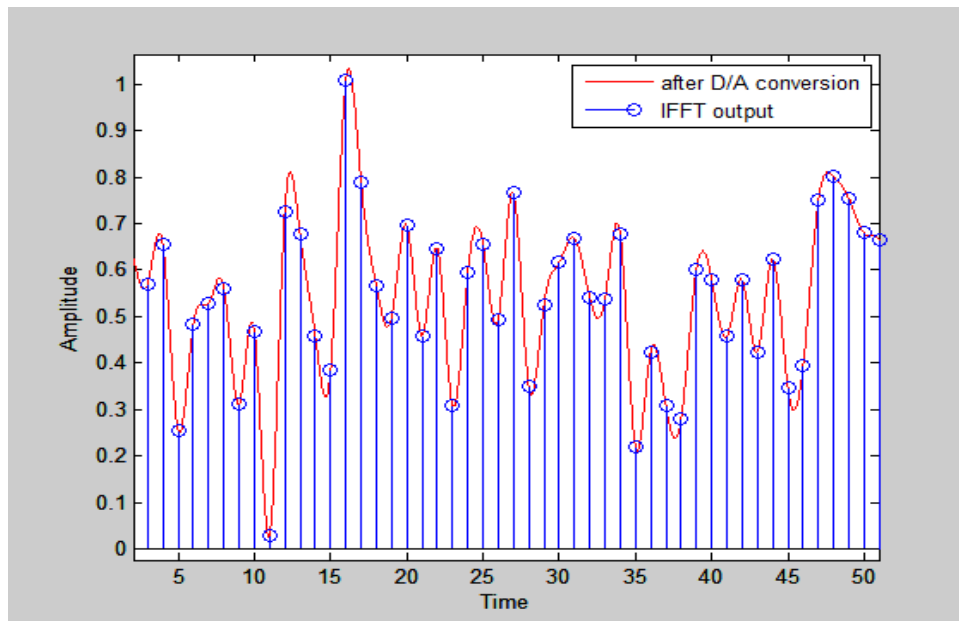


Figure 3.4: le signal après IFFT

Une fois qu'on introduit un convertisseur D/A, le signal devient continu comme montré par la figure 3.4.

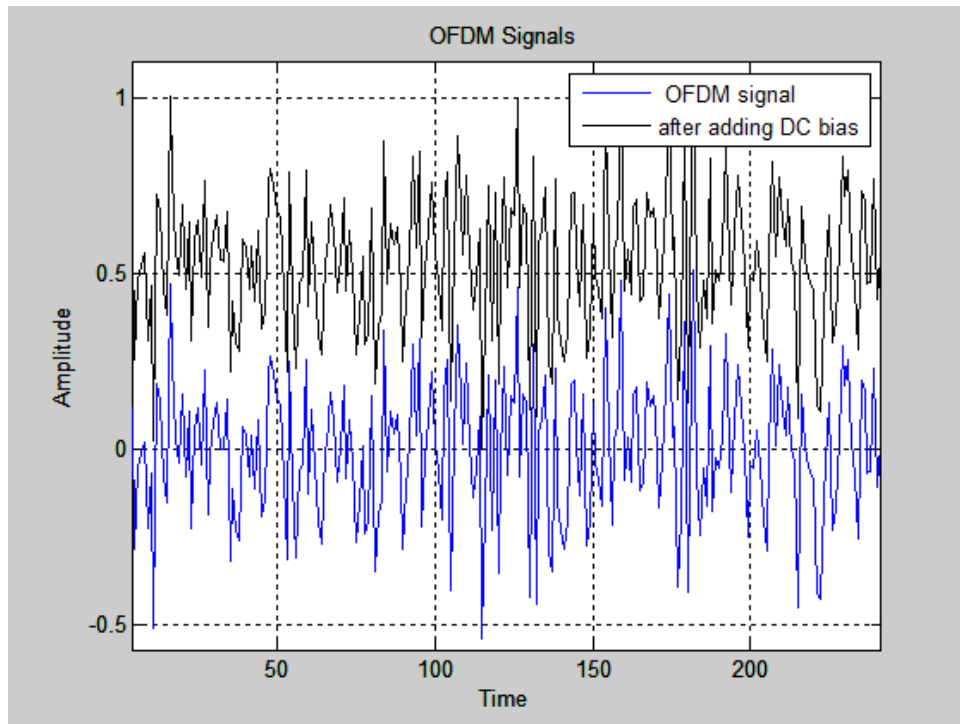


Figure3.5: le signal OFDM avant et après l'ajout de 'DC bias'

La figure montre que le signal OFDM augmente lorsqu'on ajoute le signal « DC bias ».

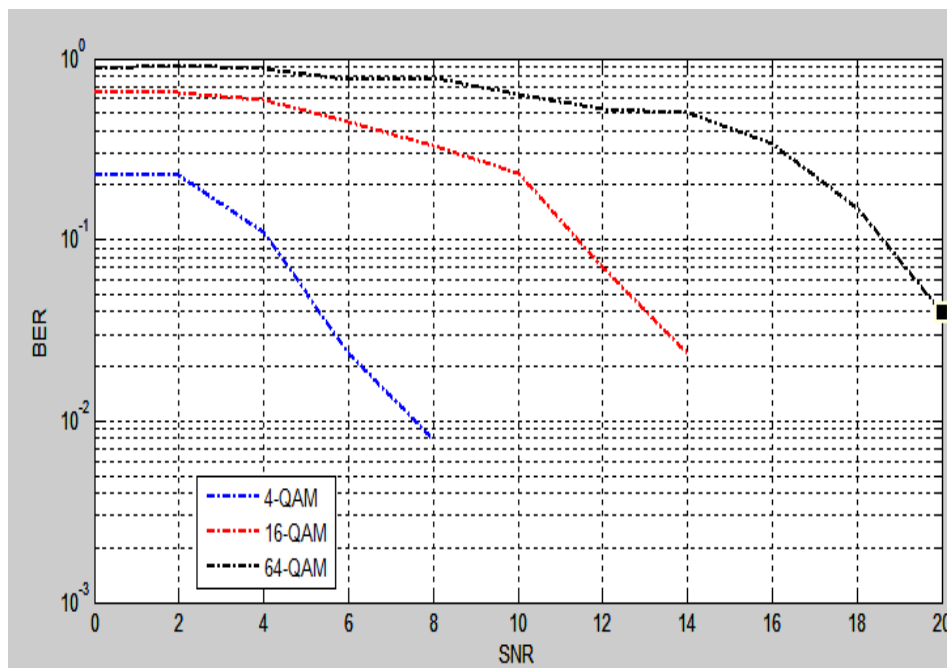


Figure3.6:BER en fonction de SNR

L'effet des différents constellations QAM sur la performance BER en fonction de SNR

La courbe montre que l'augmentation de l'ordre de QAM, le taux d'erreur sur les bits (BER) augmente, de sorte que le même pourcentage de SNR lorsque QAM passe de bas en haut, SNR est plus élevé.

Par exemple pour SNR de 8 dB de BER

4-QAM = 0,007813 et 16-QAM = 0,3281, 64-QAM = 0,7

3.4 Conclusions:

Dans ce chapitre Nous avons expliqué les différentes étapes du signal d'entrée de l'émetteur à la sortie dans le récepteur, grâce à l'utilisation DC-biais et des algorithmes IFFT et FFT de l'OFDM un modèle optique a été développé. Nous avons simulées la technique de modulation multi-porteuses (OFDM) sur le système VLC les résultats obtenus montre que la modulation plus performant que 4-QAM celle de 16-QAM et 64-QAM en examinant le taux d'erreur de bits par rapport au rapport signal / bruit (BER/SNR).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons expliqué l'une des dernières technologies de communication sans fil qui verront bientôt l'application mondiale de la technologie d'encastrement OFDM sur le système de communication par lumière visible, qui comporte de nombreuses fonctionnalités la lumière + la communication.

Dans le premier axe, nous avons discuté de la technique d'encastrement OFDM et de toutes ses caractéristiques, des étapes dans lesquelles le signal passe de l'émetteur au récepteur et des réponses et des négatifs qu'il contient.

En ce qui concerne le deuxième chapitre, nous avons étudié le système de communication par lumière visible VLC, qui dépend de la LED et la photodiode, ce système peut combiner entre la communication et la diffusion de la lumière.

Dans le troisième chapitre l'appliquer de la technique OFDM sur le système VLC a été expliqué, ensuite nous avons simulé cette application et nous avons obtenu des résultats souhaités qui confirment la possibilité d'utiliser cette technologie dans le système de communication par lumière visible, en outre les résultats de BER en fonction SNR montre que l'ordre de modulation QAM augmente, le BER augmente, donc pour le même SNR, après QAM passe d'un ordre inférieur à un ordre supérieur. le SNR être plus élevé.

Références:

- [1] **Xiaojing Zhang, Peng Liu, Jiang Liu.** An advanced A-law companding algorithm in VLC-OFDM. Consumer Electronics (GCCE), 2014 IEEE 3rd Global Conference on
- [2] **Galyna piskonova.** transmission ofdm pour la téléphonie cellulaire. Montréal 19 décembre 2003.
- [3] **Touhami Ridha.** Thème DEVELOPPEMENT D'UN MODEL OFDM POUR LA 4^{ème} GENERATION DU MOBILE DE COMMUNICATION UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF UFAS (ALGERIE).
- [4] **Jawad Nakad .** Allocations de ressources radio dans un réseau local sans fil (WLAN) de type OFDM. Sous l'égide de l'Agence Universitaire de la Francophonie AUF.
- [5] **BAOUNI ABDELKHALEK.** Estimation du Canal et Elimination des Interférences ICI dans les Communications Mobiles avec Modulation OFDM. UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
- [6] **BOUKENNA Mounir.** THEME Allocation dynamique des sous porteuses multi utilisateurs dans un système 4G. UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF 1- UFAS (ALGERIE).
- [7] **HO Anh Tai.** Application des techniques multiporteuses de type OFDM pour les futurs systèmes de télécommunications par satellite. DOCTORAT de l'université de toulouse.
- [8] **Alin-Mihai CĂILEAN.** Study, implementation and optimization of a visible light communications system. Application to automotive field. UNIVERSITÉ "STEFAN CEL MARE" DE SUCEAVA. Décembre 2014.
- [9] **Abdulhafid Egjam, Nizar Zarka.** Overview Li-Fi Technology Syrian Arab Republic Higher Institute for Applied Sciences and Technology Communications Department. April 2015
- [10] **Inrenet wikipedia.** Historique de communication par lumière visible.
- [11] **Latif Ullah Khan.** Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. Department of Electrical Engineering, University of Engineering & Technology, Peshawar, Pakistan. 18 July 2016
- [12] **Mohamed Amir Aly, Mohamed Ibrahim El-Desouky, Moaaz Roushdy, Amr Hamdy Mosaab Mahmoud.** VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEMS OVER FPGA. CAIRO UNIVERSITY. July, 2015
- [13] **KASRA ASADZADEH, B.Sc.** Efficient OFDM Signaling Schemes For Visible Light Communication Systems. July 2011

- [14] **Sakshi Verma, Shruti Vashist.** Performance of DCO-OFDM in Optical Wireless Communication System (June 2016).
- [15] **M. F. Sanya, Leopold Djogbe, Christelle Aupetit-Berthelemot, Antoine Cokou Vianou.** DC-Biased Optical OFDM for IM/DD Passive Optical Network Systems 10 March 2015.