



N° d'ordre :
N° de série :



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de
la Recherche scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER
ACADEMIQUE

En : Télécommunication

Spécialité : Systèmes de télécommunication

Par: boudina tahar, Matoug sadak, Matoug Tahar, Behir mohammed lakhader

Thème

**Impact de DC_{bias} sur les performances du
system VLC - OFDM**

Devant le jury composé de :

Mr.	M C A	Président
Mr.	M A A	Examineur
Mr. Touhami ridha	M C B	Encadreur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je suis dédié ce modeste travail à :

** Ma très chère mère.*

** Mon très cher père.*

** Mes soeurs et mes frères*

** toutes mes familles*

** Mon binôme*

** Tout mes amis.*

** Tout la promotion 2021/2022*

Remerciements

En préambule à ce mémoire

Nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous

ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nous tenant à remercier sincèrement Mr : Touhami ridha, en tant que Encadreur, qui à toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire,

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoir

Résumé

La communication par lumière visible (VLC) est un système prometteur dans la communication optique sans fil. En raison des avantages qu'il offre qui ne sont pas disponibles dans d'autres systèmes, tels que les interférences électromagnétiques qui n'existent pas et son exploitation du spectre visible. C'est aussi 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. nous nous sommes concentrés dans cette recherche sur l'étude et l'analyse du système DCO - OFDM.

Dans ce dernier cas, nous avons effectué une étude de simulation, en calculant PAPER, SNR et BER pour déterminer l'effet des performances DCbias du système VLC-OFDM.

Les mots clés : VLC (Communication par la lumière visible), OFDM (multiplexage par répartition en fréquences orthogonales),

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.

In the latter case, we performed a simulation study, calculating PAPER, SNR and BER to determine the effect of DCbias performance of the VLC-OFDM system.

Keywords: VLC (Visible Light Communication), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing),

ملخص

الاتصالات الضوئية المرئية (VLC) هي نظام واعد في الاتصالات اللاسلكية الضوئية. نظرًا لمزاياها، فهي تقدم غير متوفرة في الأنظمة الأخرى، مثل التداخل الكهرومغناطيسي غير الموجود واستغلاله للطيف المرئي. إنه أيضًا بديل لنظام الاتصال الداخلي اللاسلكي. ولأن VLC يتطلب معدلات بيانات عالية، فإن OFDM قادر على نقل معدلات بيانات عالية. جاءت تقنية DCO- OFDM لربط النظامين للوصول إلى أعلى مستوى لنقل المعلومات ؛ ركزنا في هذا البحث على دراسة وتحليل نظام DCO-OFDM.

في الحالة الأخيرة، أجرينا دراسة محاكاة، بحساب PAPER و SNR و BER لتحديد تأثير أداء DCbias لنظام VLC-OFDM. **الكلمات المفتاحية:** (اتصالات الضوء المرئي) VLC ، (مضاعفة تقسيم التردد المتعامد) OFDM.

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Modulation a porteuse multiple OFDM

I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique.....	4
I.3 Canal multi-trajets	4
I.3.1 Caractéristique d'un canal à trajets multiples.....	6
I.4 Notion d'orthogonalité	6
I.4.1 L'orthogonalité temporelle.....	7
I.4.2 L'orthogonalité fréquentielle	7
I.5 Principe et fonctionnement de l'OFDM.....	9
I.5.1. Modulation OFDM	10
I.5.2. Démodulation.....	11
I.6. Problème des interférences.....	13
I.6.1. Interférence entre symboles (ISI).....	13
I.6.2 Interférence entre sous porteuses (ICI).....	13
I.7 Intervalle de garde.....	14
I.8 Préfixe cyclique.....	14
I.9 Avantages et inconvénients de l'OFDM.....	15
I.9.1 Avantages.....	15
I.9.2 Inconvénients.....	15
I.10 Paramètres du système.....	16
I.10.1 Modulation.....	16
I.10.2 Point de fonctionnement.....	16
I.11 Conclusion.....	17

Chapitre II : Communications par lumière visible VLC

II.1 Introduction.....	19
II.2 Généralités	19
II.3 Historique des communications par lumière visible.....	20
II .4 Architecture d'un système VLC	22
II.4.1. Emetteur VLC.....	22
II.4.2. Récepteur VLC	23
II.5 Standardisation	23
II.5.1 Couche Physique	26
II.5.1.1 Structure de la trame PHY	27
II.5.2 Couche MAC	27
II.5.2.1 Structure de la trame MAC	28
II.6. Topologies de réseau VLC	29
II.7. Les modulations dans le domaine des VLC	29
II.7.1 La modulation OOK	30
II.7.2 La modulation VPPM.....	31
II.7.3 La modulation CSK.....	31
II.7.4 La modulation OFDM.....	33
II.8 Avantages des communications VLC.....	33
II.9 Limites et challenges des communications VLC.....	35
II.10 Applications.....	37
II.11 Activités relatives aux communications VLC menées dans le monde.....	38
II.12 Conclusion.....	40

Chapitre III : Le système DCO -OFDM

III.1 Introduction.....	42
III.2 Description du système VLC basé sur l'OFDM	42
III.3 Types d'OFDM – VLC	44
III.3.1 ACO-OFDM	44
III.3.2 DCO-OFDM	45
III.4. Paramètre d'évaluation	45
III. 4.1 BER.....	45

III. 4.2 SNR.....	46
III. 4.3 PAPR.....	46
III.5 Résultats de simulation.....	46
III.6 Conclusion.....	51
Conclusion générale :.....	53
Bibliographie.....	55

Liste des Figures

Fig. I.1:Schéma de principe de trajets multiples	5
Fig. I.2 : Exemple d'une base orthogonale	7
Fig I.3 : Principe d'orthogonalité des sous-porteuses en OFDM	8
Fig. I.4 : Spectre du signal OFDM pour 16 sous-porteuses	8
Fig. I.5 : Interprétation temps-fréquence d'un signal OFDM.....	9
Fig. I.6 Schéma de principe d'un modulateur OFDM	11
Fig. I.7 : Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM	11
Fig. I.8 : Schéma du principe d'un démodulateur OFDM	12
Fig.I.9 : Interférence inter-porteuse (ICI) en OFDM dans le domaine fréquentiel.....	13
Fig.I.10 : Illustration de l'effet de l'intervalle de garde précédent chaque symbole OFDM.....	14
Fig I.11 : Préfixe cyclique.....	15
Fig. II.1 :Spectre électromagnétique	20
Fig II.2 : Dispositifs d'émission et de réception du photophone.....	21
Fig II.3 : Schéma fonctionnel d'un système VLC.....	22
Fig II.4 : Architecture de périphérique VLC sous la norme IEEE 802.15.7.....	25
Fig II.5 : Multiplexage des types de PHY.....	26
Fig II.6 : Format de la trame PHY.....	27
Fig II.7 : Interactions des services de la couche MAC.....	28
Fig II.8 : Format de la trame MAC.....	29
Fig II.9 : Topologies MAC prises en charge par IEEE 802.15.7.....	30
Fig II.10 : Schéma de modulation OOK.....	31
Fig II.11: Modulation VPPM.....	31
Fig. II.12 Modulation CSK	32
Fig. III.1: Illustration du schéma fonctionnel du système de base OFDM-VLC.....	42
Fig. III.2 : système ACO-OFDM	44
Fig III.3 : système DCO-OFDM	45
Fig III.4 : Représente Sortie IFFT et signal continu après conversion D/A.....	46
Fig III.5: : Représente Signal OFDM	47
Fig III.6 : Représente BER fonction de SNR d'un système DCO-OFDM pour 64-QAM	48
Fig III.7: Représente CCDF du signal DCO-OFDM pour 64-QAM	48
Fig III.8: Représente BER fonction de SNR d'un système DCO-OFDM pour 16-QAM.....	49
Figure III.9: Représente CCDF du signal DCO-OFDM pour 16-QAM.....	50

Liste des Tableaux

Tab II.1 : Classification des périphériques IEEE 802.15.7.....	24
Tab II.2 : Modes de fonctionnement de la couche PHY	26
Tab III.1: Paramètres de simulation.....	47

Abréviations :

1G	Première Génération
2G	Deuxième Génération
3G	Troisième Génération
3GPP	The 3rd Generation Partnership Project
4G	Quatrième Génération
5G	Cinquième Génération
AWGN	Additive White Gaussian Noise Ber Bit Error Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Préfixe
CP-OFDM	Cyclic Préfixe Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DSP	Power Spectral Density
EMBB	Enhanced Mobile Broadband
FBMC	Filter Bank Based Multicarrier
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Finite Impulse Response
F-OFDM	Filtered- Orthogonal Frequency Division Multiplexing
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
GPS	Global Positioning System
ICI	Inter-Carrier Interference
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMT-2020	International Mobile Telecommunications-2020
ISI	Inter-Symbol Interference
KPI	Key Performance Indicator
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	Metals And Minerals Trading Corporation
NOMA	Non Orthogonal Multiple Access
OBE	Out Of Band
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OMA	Orthogonal Multiple Access
OOB	Out Of Band
PAPR	Peak-To-Average Power Ratio
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
SCMA	Sparse Code Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UFMC	Universal Filtered Multi Carrier
UF-OFDM	Universal Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing
UIT	Union International Des Telecommunications
VLC	Visible Light Communication

Introduction générale

Introduction générale

En raison de l'exigence croissante de débits de données élevés dans les systèmes de communication modernes, le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) a été intensivement étudié au cours des deux dernières décennies. L'OFDM en tant que mécanisme de modulation fournit un débit de données élevé avec une robustesse contre un canal d'évanouissement à trajets multiples. De plus, la technique OFDM est largement utilisée dans les communications filaires et sans fil en raison de ses avantages en termes de réduction des interférences et des problèmes de trajets multiples par rapport aux techniques conventionnelles de modulation à porteuse unique (SCM). La caractéristique unique de la technique OFDM est l'utilisation de l'orthogonalité entre les sous-porteuses individuelles. De plus, l'importance de l'OFDM est qu'il a la meilleure efficacité spectrale contre les interférences de radiofréquence (RF).

L'OFDM a également été mis en œuvre dans le système de communication par lumière visible (VLC) pour compléter la communication sans fil conventionnelle car la ressource du spectre RF devient saturée et le système de communication sans fil RF existant ne répondra pas aux demandes de trafic de données à l'avenir. D'ailleurs, un effort de recherche important a été dirigé vers le développement de systèmes VLC en raison de leurs nombreux avantages, tels que l'utilisation de la lumière visible pour la communication ainsi que l'éclairage, le spectre sans licence et les débits de données potentiellement élevés qui peuvent être atteints en plus le système VLC peut desservir différentes zones avec des signaux sans fil difficiles à atteindre avec les systèmes RF conventionnels.

L'utilisation du spectre électromagnétique pour la communication est en augmentation. La communication par lumière visible (VLC) avec une bande passante allant jusqu'à 390 THz devrait être une technologie alternative pour un système de communication sans fil. VLC comprend des diodes électroluminescentes (LED) sur l'émetteur et une photodiode sur le côté récepteur, où les LED peuvent être modulées à grande vitesse afin de permettre une communication sans fil à grande vitesse. L'une des techniques de modulation les plus potentielles pour VLC est le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), mais le défi est que le signal de sortie doit être réel et positif. Par conséquent, l'OFDM doit être modifié, en ajoutant une polarisation continue appelée OFDM optique polarisé en courant continu (DCO-OFDM) ou par écrêtage du signal appelé OFDM optique à écrêtage asymétrique (ACO-OFDM).

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

Introduction générale

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

Dans le chapitre 3, nous étudierons la relation OFDM-VLC et ses types DCO-OFDM. , ACO-OFDM. Et combien impactDC bias sur le système DCO-OFDM. pour cette étude, nous calculons; SNR.BER.PAPR.

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

Chapitre I

Modulation a porteuse

Multiple OFDM

I.1 Introduction

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexant) est une technique de modulation numérique qui joue sur l'efficacité et la rentabilité de transmission dans le canal radio mobile pour un environnement multi-trajet. Ce chapitre sera dédié pour l'étude de la technique OFDM qui trouve son application dans des standards comme ETSI hiperLAN et IEEE 802.11a/g de la famille WIFI (Wireless Fidelity). Dans un premier temps, nous aborderons les origines et l'évolution de cette modulation multi-porteuse avec ses applications. Ensuite, nous présenterons ce procédé de modulation dans les détails en parlant de son principe, les caractéristiques du signal OFDM, de ses avantages et de ses inconvénients. A la fin du chapitre, nous abordons la technique d'accès OFDMA et son principe.

I.2 Historique

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

I.3 Canal multi-trajets

Avant d'exposer le principe des modulations multi-porteuses OFDM, nous allons donner quelques caractéristiques du canal radio mobile pour lequel ce type de modulations est intéressant.

Dans un système de communication sans fil, les signaux de transmission interfèrent les uns avec les autres à cause de différents mécanismes. Le récepteur peut recevoir un signal sous plusieurs versions à travers des trajets multiples. On appelle ce phénomène l'effet multi-trajet. En effet, il existe cinq phénomènes principaux : la réflexion, la réfraction, la diffraction, la diffusion et le guidage d'onde qui ont un impact direct sur la propagation du signal. Les ondes émises lors de la communication radio subissent généralement une combinaison de ces divers phénomènes. Par conséquent, le signal reçu est une somme de tous les signaux arrivants au récepteur sur les différents trajets, et cette somme peut s'effectuer d'une manière constructive ou destructive. Les obstacles peuvent être considérés comme un avantage ou un inconvénient pour la transmission. [5].

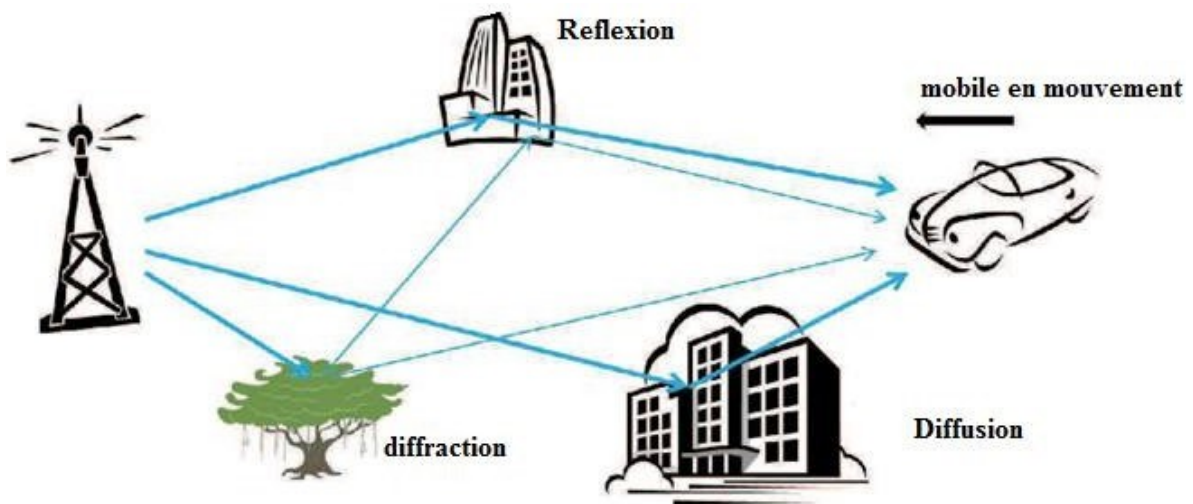


Figure I.1: Schéma de principe de trajets multiples.

De façon générale, supposons le signal émis s'écrit :

$$S(t) = \text{Re}[S_1(t) \cdot e^{2j\pi f_k t}] \quad (\text{I.1})$$

Tel que f_k est la fréquence de la porteuse.

$S_1(t)$ est un signal électrique émis.

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

$$x(t) = \sum \alpha_n(t) s(t - \tau_n(t)) \quad (\text{I.2})$$

Chaque chemin provoque une atténuation α_n et un retard τ_n qui varient en fonction du temps [6].

I.3.1 Caractéristique d'un canal à trajets multiples

L'évaluation des systèmes de transmission est faite selon deux caractéristiques : la qualité de la transmission et la complexité de calcul liée aux opérations de modulation/démodulation. Les grandeurs permettant de quantifier la qualité de la transmission sont :

- **Le taux d'erreur binaire (TEB)** : permet de mesurer la fréquence à laquelle les erreurs se produisent, il correspond au rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total des bits émis.
- **Erreur quadratique moyenne (EQM)** : détermine l'écart moyen de puissance entre les symboles émis et les symboles reçus.
- **L'efficacité spectrale** : mesure le débit binaire par unité de fréquence pour une transmission de q bits sur une durée T_s et une largeur de bande B allouée à la transmission. Le débit binaire étant donné par le rapport q/T_s , l'efficacité spectrale est exprimée donc par le rapport q/BT_s .
- **Le rapport signal sur bruit (RSB)** : est généralement adopté en transmission numérique comme paramètre d'entrée du récepteur pour lequel on va évaluer la qualité du message numérique restitué, il permet ainsi de qualifier la sensibilité du récepteur aux perturbations subies par le signal lors de sa propagation dans le canal. Le RSB est déterminé par le rapport E_b/N_0 avec N_0 la densité spectrale de puissance du bruit blanc à l'entrée du récepteur et E_b l'énergie moyenne par bit du signal modulé.
- **La bande de cohérence** : est une mesure statistique de la bande de fréquence dans laquelle le canal peut être considéré comme plat [7].

I.4 Notion d'orthogonalité

On définit l'orthogonalité de deux fonction $f(t)$ et $g(t)$ dans l'intervalle $[a, b]$ par la relation suivante :

$$\int_a^b f(t) \cdot g(t) = 0 \quad (I.3)$$

Cela signifie que ces deux fonctions sont disjointes sur le segment $[a, b]$. Pour réaliser une base orthogonale à N dimensions, il suffit de trouver N fonctions orthogonales (deux a deux). Comme le montre la figure 1.2, un ensemble de N fenêtres rectangulaires régulièrement espacées d'un intervalle Δ sur l'axe des temps constitue une base orthogonale

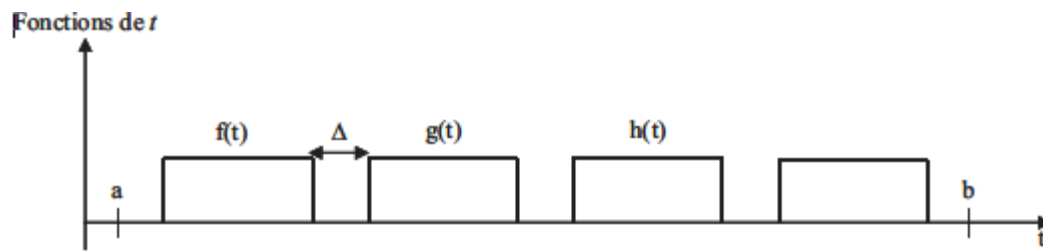


Figure I.2 : Exemple d'une base orthogonale.

L'orthogonalité est la propriété fondamentale qui permet de transmettre des signaux d'informations multiples dans un même canal et de les détecter sans interférence.

I.4.1 L'orthogonalité temporelle

Envisageons tout d'abord des signaux continus, donc non encore échantillonnés. Dans ce cas, un signal OFDM est composé d'une somme de N sinusoides de fréquences respectives f_k , Transmises durant une durée T_u , k variant de 1 à N , et définie par $f_k = k / T_u$, cette condition Permettant d'avoir un nombre entier de sinusoides sur chaque sous-porteuse

durant T_u . Chaque sous-porteuse $s_k(t)$ réelle et non modulée peut se mettre sous la forme :

$$s_k(t) = \begin{cases} \sin\left(2\pi \frac{k}{T_u} t\right), & 0 < t < T_u \text{ pour } k \in [1, N] \\ 0 & ; \text{ ailleurs} \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Deux sous-porteuse $s_1(t)$ et $s_2(t)$ de fréquences f_1 et f_2 , définies par l'équation (I.4), sont orthogonales sur l'intervalle $[0, T_u]$, puisqu'elles vérifient l'équation (I.3).

I.4.2 L'orthogonalité fréquentielle

On peut percevoir la notion d'orthogonalité du signal OFDM dans le domaine fréquentiel.

Chaque sous-porteuse OFDM a une réponse en fréquence en sinus cardinal :

$$\text{Sinc}(f) = \sin(f) / \pi f.$$

La figure I.3 montre que l'espace entre chaque sous-porteuse $1/T_u$ permet, lorsque le spectre d'une sous-porteuse est maximal, d'annuler le spectre de toutes les autres : C'est la condition d'orthogonalité. Cette condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale et d'éviter les interférences entre sous-porteuses si l'échantillonnage est fait précisément à la fréquence d'une sous-porteuse.

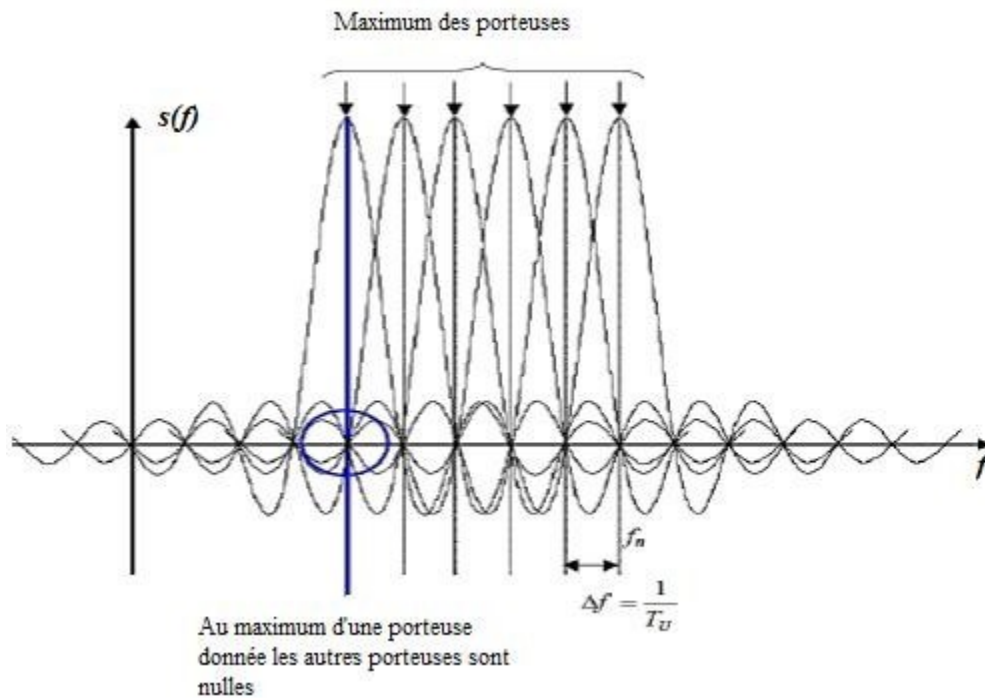


Figure : I.3 : Principe d'orthogonalité des sous-porteuses en OFDM [7].

Tous les symboles C_k sont envoyés pendant la durée de symbole T_u , donc le spectre total est la somme des spectres individuelle comme indique la figure 1.4.

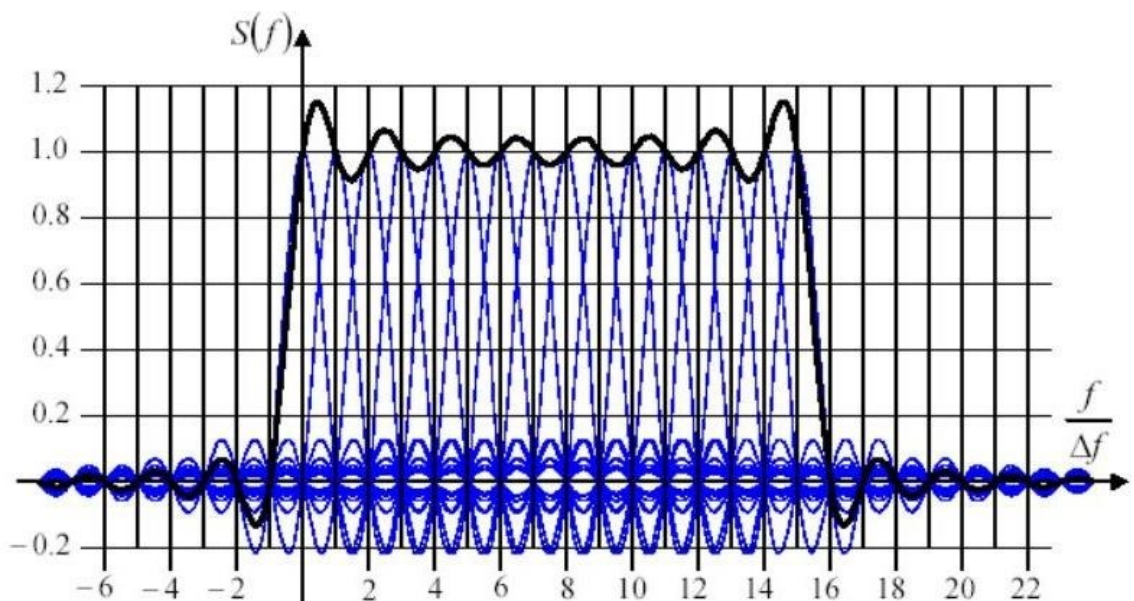


Figure I.4 : Spectre du signal OFDM pour 16 sous-porteuses.

La figure 1.4 montre qu'alors, la bande de fréquences est occupée de façon optimum puisque le spectre est presque plat dans cette bande.

La bande occupée est à peu près $B = k/T_u$ (en excluant les lobes secondaires de part et d'autre de la bande) [7].

I.5 Principe et fonctionnement de l'OFDM

Le principe de l'OFDM est de transmettre les informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles, ainsi le spectre du signal présente une occupation optimale de la bande allouée [8]. Comme le montre la Figure I.3, l'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes du temps et des fréquences. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée. L'information à transmettre est répartie sur l'ensemble de ces porteuses, modulée chacune à faible débit par une modulation du type QPSK ou QAM. Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant t .

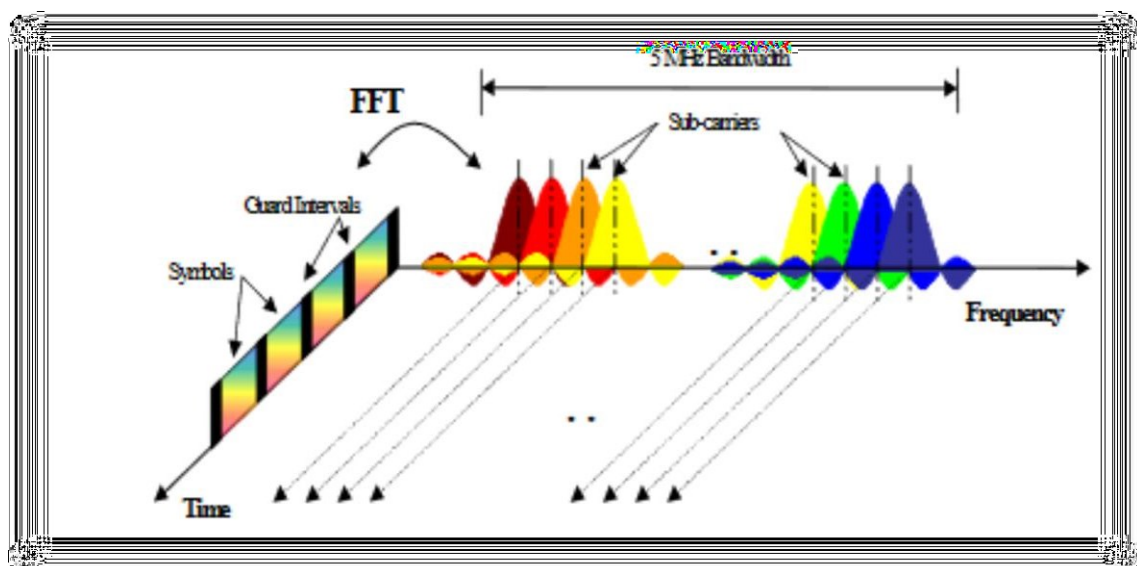


Figure I.5 .Interprétation temps-fréquence d'un signal OFDM

La technique de transmission OFDM est basée sur l'émission simultanée sur n bandes de fréquence (situées entre 2 et 30 MHz) [9] de N porteuses sur chaque bande. Figure I.5.

I.5.1 Modulation OFDM

Comme nous venons de le voir, le signal OFDM se compose de N sous-porteuses de fréquence f_k , avec $k \in [0, \dots, N - 1]$ utilisées pour la transmission en parallèle de N symboles, Ces symboles notés c_k . L'expression du signal OFDM en bande de base généré durant l'intervalle $[0, T_u]$ est donnée par :

$$S(t) = \sum^{N-1} c_k e^{i2\pi f_k t} \quad (I.5)$$

Les données numériques c_k sont des nombres complexes définis à partir d'éléments binaires par une constellation de modulation d'amplitude en quadrature QAM à plusieurs états (4, 16, 64, de façon générale à 2^q états). Ces données sont des symboles q -aires formés par groupement de q bits. On les appelle symboles numériques.

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est $1/T_u$ alors :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_u} \quad (I.6)$$

Et l'expression (1.5) peut s'écrire

$$S(t) = e^{i2\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{i2\pi \frac{kt}{T_u}} \quad (I.7)$$

L'équation (1.7) représente la transformée de Fourier inverse des symboles c_k déduis de la constellation QPSK ou QAM, donc il suffit d'appliquer l'algorithme de la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) sur ces symboles c_k pour réaliser la modulation OFDM. Voici le schéma de principe de la modulation OFDM.

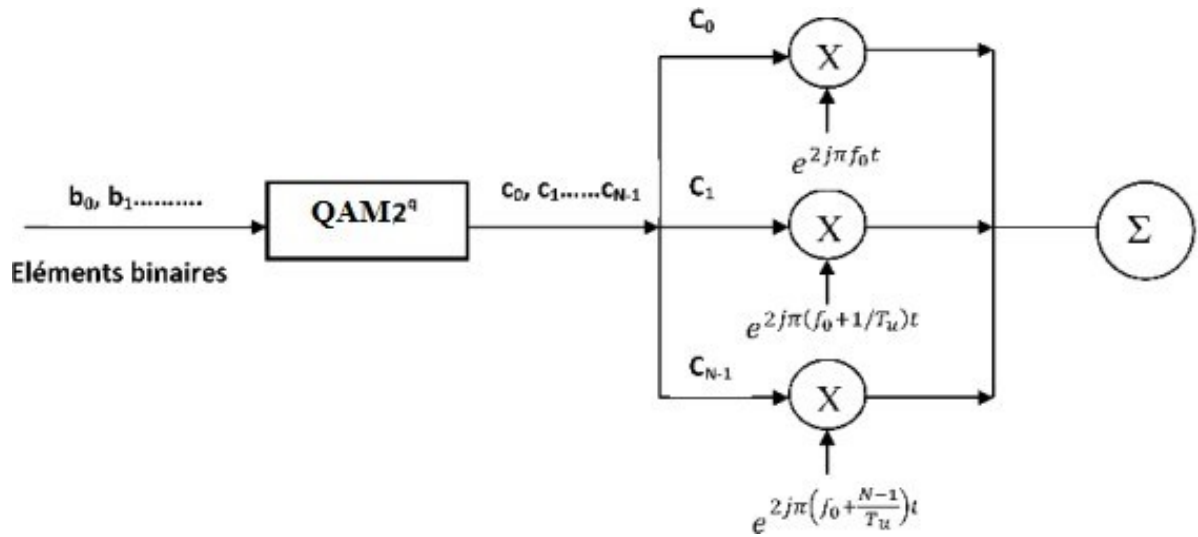


Figure I.6 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM.

Les spectres des différentes porteuses sont présentés sur la figure 1.7. Le spectre d'un signal OFDM est la somme de tous ces spectres.

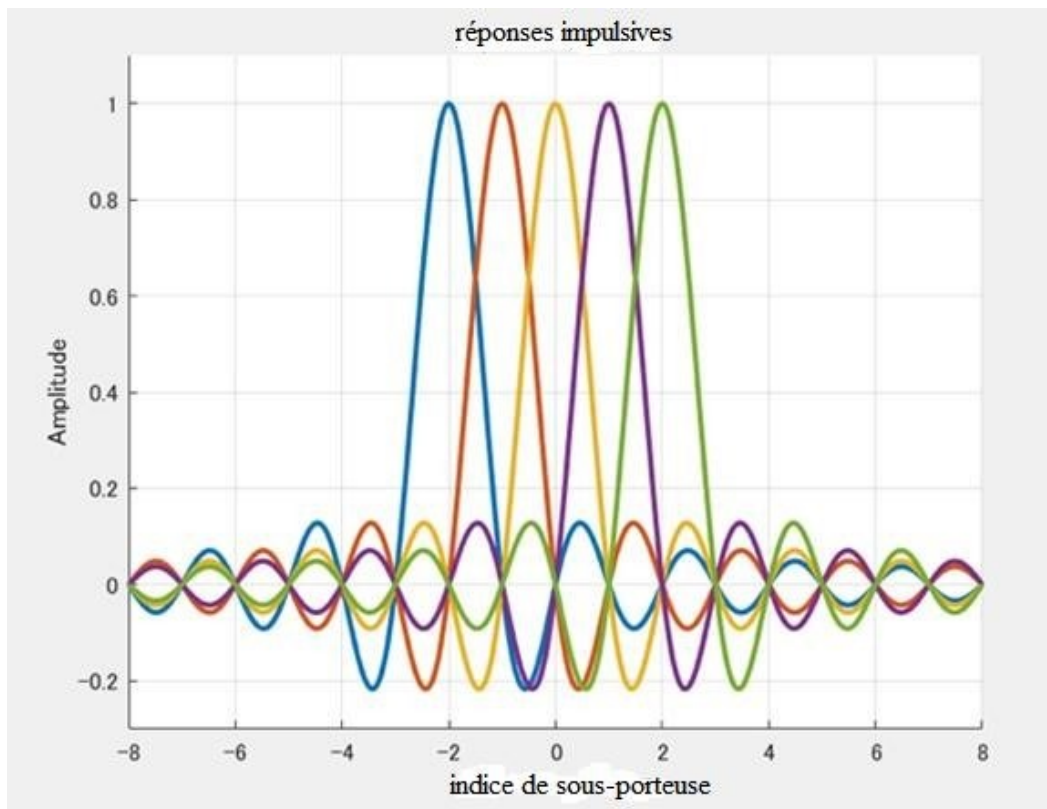


Figure I.7 : Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM

I.5.2 Démodulation

Le signal parvenant au récepteur s'écrit, sur une durée symbole T_u :

$$y(t) = \sum_{K=0}^{N-1} c_K H_K(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_u})t} \tag{1.8}$$

$H_k(t)$ est la réponse impulsionnelle du canal au niveau de la sous-porteuse. La démodulation classique consisterait à démoduler les N sous-porteuses suivant le schéma classique :

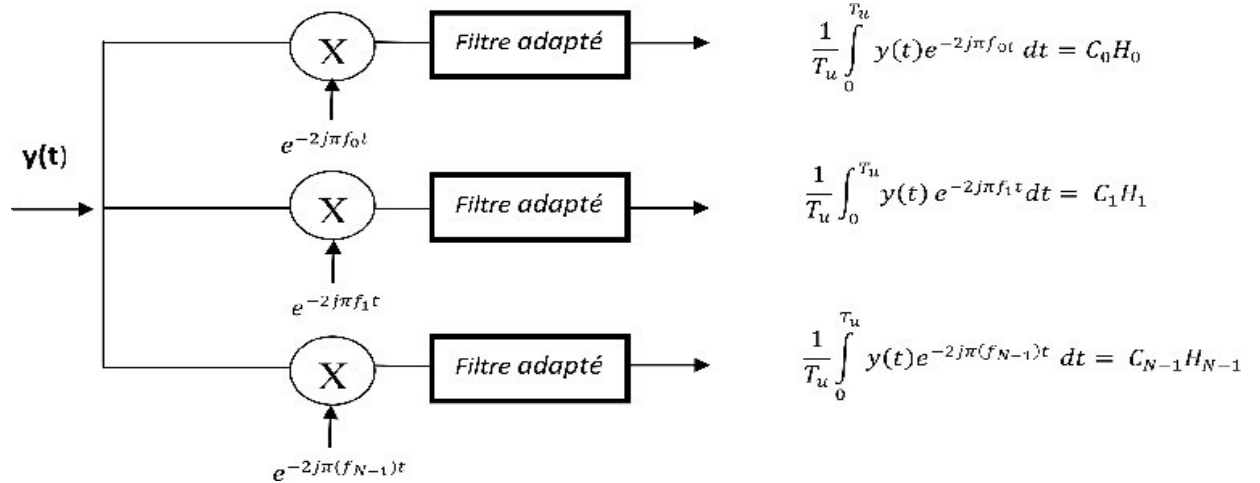


Figure I.8 : Schéma du principe d'un démodulateur OFDM.

En pratique, comme pour le modulateur, le démodulateur est basé sur la transformée de Fourier directe (FFT) comme une opération inverse [10].

La condition d'orthogonalité nous montre que :

$$\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} y(t) e^{-2j\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_u} \sum_{K=0}^{N-1} \int_0^{T_u} c_K H_K(t) e^{2j\pi(k-i)\frac{1}{T_u}t} dt = C_i H_i \tag{I.9}$$

Par ce que :

$$\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} e^{2j\pi(k-i)\frac{1}{T_u}t} dt = 0 \text{ si } k \neq i \tag{I.10}$$

I.6 Problème des interférences

I.6.1 Interférence entre symboles (ISI)

Les signaux OFDM sont transmis à des intervalles égaux, et ils doivent parcourir un certain trajet pour atteindre le récepteur. Dans le cas d'un canal multi-trajets, un symbole transmis prend différents retards pour arriver au récepteur à cause des différents chemins de propagation, ce qui cause des étalements temporels différents. La prolongation de la durée des symboles fait chevaucher les symboles entre eux, ce qui donne naissance à l'interférence entre symboles (IES) [11].

I.6.2 Interférence entre sous porteuses (ICI)

L'orthogonalité dans un système OFDM signifie qu'au maximum de chaque spectre d'une sous porteuse, tous les spectres des autres sous porteuses s'annulent, ainsi les spectres des sous-porteuses se recouvrent mais demeurent orthogonaux entre eux. L'interférence entre porteuse (IEP) est causée par une perte d'orthogonalité fréquentielle suite à un décalage fréquentiel ce qui se traduit par la présence des symboles de données des sous-porteuses adjacentes dans la sous-porteuse actuelle [11].

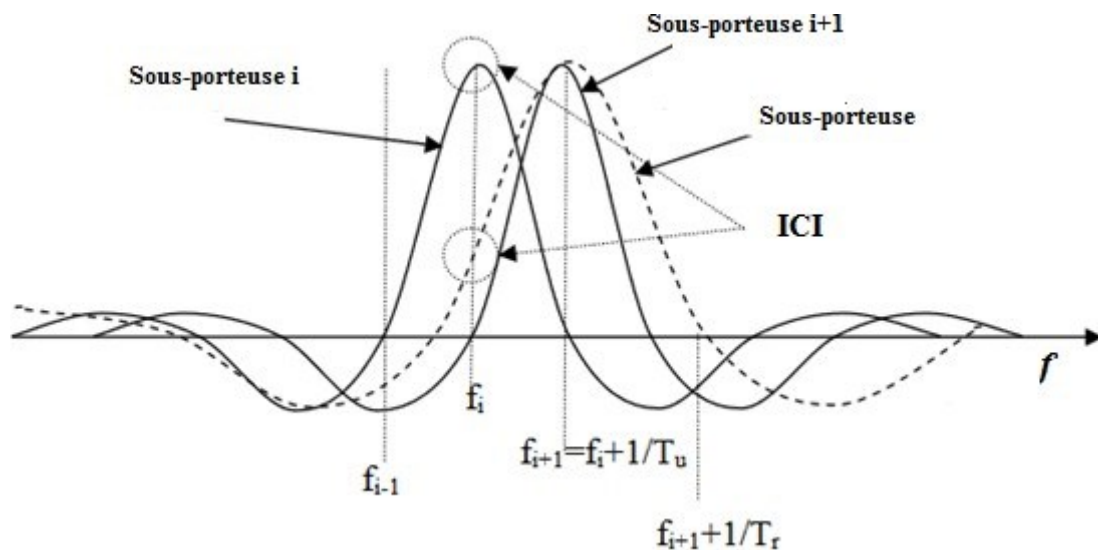


Figure I.9 : Interférence inter-porteuse (ICI) en OFDM dans le domaine fréquentiel.

I.7 Intervalle de garde

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 iT_s peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période $(i-1)T_u$, il se produit alors des interférences entre les symboles. Pour éviter ces interférences, on ajoute un intervalle de garde d'une durée T_g . Chaque symbole est précédé par une extension périodique du signal lui-même, la durée du symbole totale transmis est alors $T_s = T_u + T_g$, afin que les interférences soient éliminées

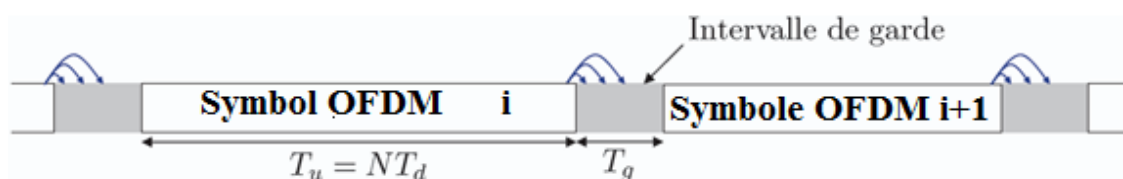


Figure I.10 : Illustration de l'effet de l'intervalle de garde précédant chaque symbole OFDM.

Avec :

T_u : La durée de la partie utile de chaque symbole OFDM.

$1/T_d$: le débit de la modulation mono-porteuse initiale.

T_g : La durée de l'intervalle de garde.

$T_s = T_g + T_u$: la durée de chaque symbole

I.8 Préfixe cyclique

Est une technique qui consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre en amont de ce bloc. Plus clairement, il s'agit de récupérer une partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début du bloc, on appelle ce mécanisme Préfixe Cyclique (CP-OFDM).

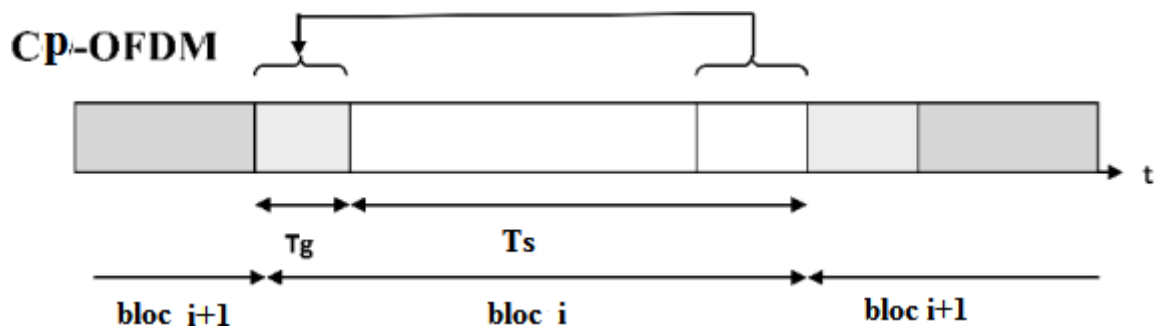


Figure I.11 : Préfixe cyclique.

Ainsi, le préfixe cyclique permet d'éviter les interférences causées par les effets des trajets multiples et maintenir l'orthogonalité temporelle entre les symboles.

I.9 Avantages et inconvénients de l'OFDM

I.9.1 Avantages

OFDM a été utilisé dans de nombreux systèmes sans fil haut débit en raison des nombreux avantages :

- La simplicité d'utilisation, car exploite les transformées et transformées inverses de Fourier rapide (IFFT et FFT) pour répartir l'information entre un nombre important de sous porteuses orthogonales aussi proche que possible les uns des autres.

- Favorise une exploitation optimale de la bande passante disponible et une haute efficacité spectrale.

- Grande résistance à la sélectivité fréquentielle.

I.9.2 Inconvénients

La bande entière doit utiliser le même espacement de sous-porteuse

- L'OFDM est sensible aux non linéarités des amplificateurs. Le signal peut présenter un PAPR (Peak to Average Power Ratio) très élevé, engendrant la saturation des blocs analogiques.

- L'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de décalage en fréquence (frequency) et de synchronisation.

I.10 Paramètres du système

I.10.1 Modulation

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

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

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

I.10.2 Point de fonctionnement

Les performances du système sont évaluées dans cette étude hors codage canal. Nous considérons les points de fonctionnement les plus faibles associés à ces modulations avant codage dans les standards DVB-S et DVB-S2 [12], [13], [14].

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

I.11 Conclusion

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

Chapitre II

Communications par lumière visible VLC

II.1 Introduction

Le monde a connu un grand développement des appareils d'éclairage à l'état solide (SSL, Solid State Lighting), en particulier des diodes électroluminescentes (LED, Light Emitting Diode) ont connu une croissance considérable. A l'époque actuelle, les LEDs sont extrêmement fiables, efficaces et ont une durée de vie qui dépasse de loin les sources de lumière classiques. Suite à ces nombreux avantages, les LEDs ont commencé à être utilisées dans de plus en plus d'applications d'éclairage et il est considéré que, dans un proche avenir, elles remplaceront complètement les sources d'éclairage traditionnelles.

Outre ces caractéristiques remarquables, les LEDs sont capables de commuter rapidement, ce qui leur permet d'être utilisées non seulement pour l'éclairage mais aussi pour la communication. Cette fonctionnalité a donné naissance à une nouvelle technologie de communication, connue sous le nom de communication par lumière visible (VLC, Visible Light Communication), permettant d'utiliser des luminaires à LED pour le transfert de données à grande vitesse.

Dans ce chapitre, les généralités et les caractéristiques des communications par lumière visible sont présentées. Le principe de fonctionnement de cette technologie et l'architecture nécessaire à une telle communication sont également détaillés, suivi des domaines d'application possibles.

II.2 Généralités

Cette technique VLC est un sous-ensemble des communications sans fil optique (OWC, Optical Wireless Communications). Les longueurs d'onde des communications OWC comprennent la lumière infrarouge, visible et ultraviolette, tandis que les communications VLC concernent uniquement la partie visible du spectre de longueurs d'onde comprises entre 380 et 750 nm [15], correspondant à un spectre de fréquences de 430 THz à 790 THz [16], comme illustré à la figure I.1.

La raison pour laquelle le VLC est devenue une technologie en soi tient du fait que sa lumière peut être vue par l'œil humain et peut donc fournir à la fois un éclairage et une communication, contrairement aux OWC qui ne peuvent fournir qu'une communication.

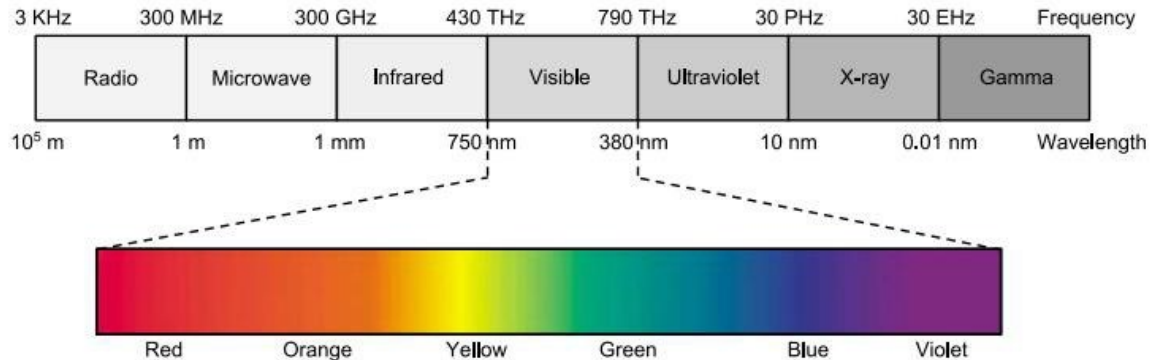


Figure II.1 : Spectre électromagnétique. [17]

Les systèmes VLC peuvent utiliser toute la gamme du spectre de la lumière visible. Le problème de la faible bande passante de la communication RF est résolu dans ces communications grâce à une grande disponibilité de la bande passante (plus de 10 000 fois supérieure à la largeur de bande du spectre RF). [18]

II.3 Historique des communications par lumière visible

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

Au début des années 1800, l'héliographe, un télégraphe solaire sans fil basé sur des éclairs réfléchis en code morse, a été mis au point par l'armée américaine. Ce dispositif permettait grâce à un miroir de renvoyer la lumière du soleil dans une direction pour communiquer en code morse. [16]

Ce n'est qu'en 1880, année de l'invention du photophone d'Alexander Graham Bell (figure I.2), que le premier véritable dispositif de communication par optique sans fil ait pu voir le jour. [19] Le photophone permettait de transmettre le son de la voix par communication lumineuse sans fil. Grâce à un miroir, la lumière du soleil est redirigée d'un point à un autre. Ce miroir est déformable. Les ondes sonores de la voix sont envoyées sur ce miroir.

Alors déformé. La lumière du soleil renvoyée par le miroir est donc modulée. Une parabole est utilisée en réception. Elle est couplée à un dispositif permettant de convertir l'information lumineuse en électricité puis d'amplifier le signal. Le signal sert ensuite à émettre le son vers l'utilisateur. Bien que le photophone soit resté au stade de prototype fonctionnel, cette invention est la première utilisation complexe de la communication sans fil par lumière visible. [20]

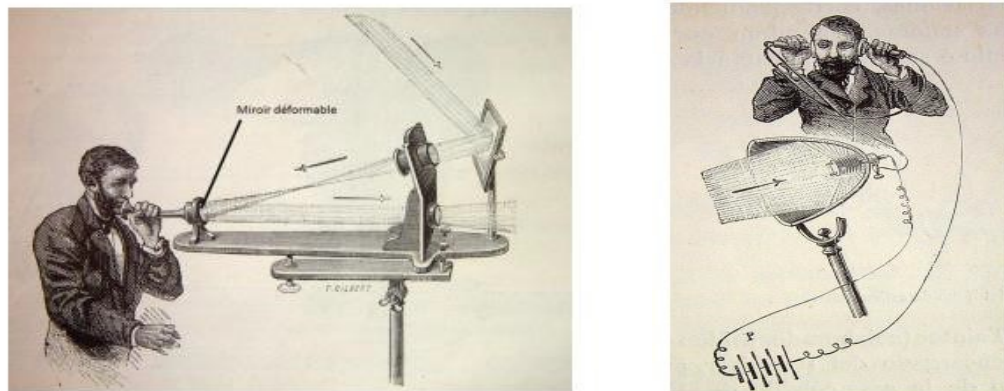


Figure II.2 : Dispositifs d'émission et de réception du photophone. [20]

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

Il faut attendre les années 60 avec l'invention des premières diodes électroluminescentes LED, et des dispositifs laser pour voir ressurgir cette technologie. De nombreuses expérimentations se sont déroulées jusque vers les années 70 correspondant au développement des fibres optiques qui supplantent alors l'optique sans fil pour les transmissions longues distances. [19]

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

À mesure que l'industrie de l'éclairage à LED progressait, la caractéristique de commutation rapide des LEDs à lumière visible incitait des recherches actives sur le VLC à haute vitesse. Un concept a d'abord été proposé par Pang et al. En 1999, en utilisant le feu tricolore LED comme émetteur de signal optique. Par la suite, S. Haruyama et M. Nakagawa ont mené une série d'études fondamentales à l'Université Keio au Japon. Ils ont étudié la possibilité de fournir un éclairage et une communication simultanés à l'aide de LEDs blanches

pour les systèmes VLC. Ils ont non seulement examiné et analysé les effets de la réflexion de la lumière et de l'ombrage sur les performances du système, mais ils ont également exploré les applications VLC à des vitesses relativement faibles. [20]

En 2004, les premières démonstrations de communication à haut débit à l'aide de diodes LEDs ont été effectuées au Japon au moyen de photodiodes. Grâce à la multiplication des téléphones cellulaires équipés de caméras, ces dispositifs ont pu être utilisés comme récepteurs VLC. Des chercheurs ont commencé à utiliser des écrans à affichage de cristaux liquides (LCD, Liquid Crystal Display) et d'autres éléments d'affichage en tant qu'émetteurs. Le Visible Light Communications Consortium (VLCC) du Japon a été l'un des premiers organismes de normalisation à mener des travaux sur une norme relative aux communications VLC. En 2008, cet organisme a élargi la portée de la norme élaborée par l'Association sur les données infrarouge (IrDA, Infrared Data Association) pour les communications infrarouges, de façon à y inclure le spectre de la lumière visible. [15]

II.4 Architecture d'un système VLC

Un système VLC est constitué principalement d'un émetteur qui module la lumière produite par les LEDs et d'un récepteur basé sur un photodétecteur, utilisé pour extraire le signal modulé de la lumière. L'émetteur et le récepteur sont séparés physiquement les uns des autres, mais sont connectés via le canal VLC [21] comme représenté sur la figure II.3.

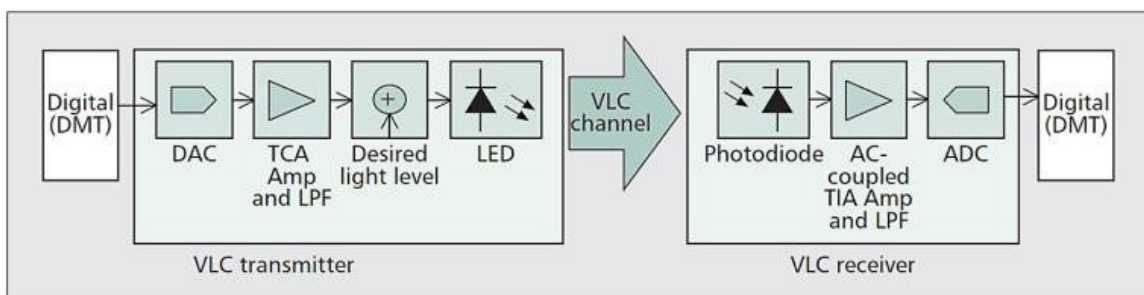


Figure II.3 : Schéma fonctionnel d'un système VLC. [22]

I.1.1 Emetteur VLC

Un émetteur VLC est un dispositif transducteur électro-optique qui transmet des informations en utilisant des ondes lumineuses visibles sur un support de transmission sans fil.

[23] L'émetteur est constitué d'un convertisseur numérique-analogique (DAC, Digital to Analog Converter) qui prend en charge la modulation des bits de l'information et les convertit en un signal de courant analogique, d'un amplificateur à transconductance (TCA,

Transconductance Amplifier), de filtres passe-bas (LPF, Low Pass Filter) et de LEDs à haute vitesse. [24] 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. [22]

II.4.1 Récepteur VLC

Au niveau du récepteur, la photodiode convertit la puissance optique reçue en un signal électrique, qui est ensuite amplifié, démodulé et décodé par un amplificateur transimpédance (TIA, Transimpedance Amplifier), suivi d'un filtre passe-bas LPF. Un convertisseur analogique-numérique (ADC, Analog to Digital Converter) est utilisé pour transformer le signal du courant analogique en un signal numérique afin de récupérer les bits du message de l'utilisateur.

Il existe de nombreux types de photodétecteurs, tels que *les photomultiplicateurs, les photoconducteurs, les phototransistors et les photodiodes*, chacun possédant des qualités spécifiques. Cependant, les photodiodes sont les dispositifs les plus appréciés en tant que photodétecteur en raison de leur petite taille, de leur grande sensibilité et de leur réponse rapide. Les diodes P-I-N (Positive Intrinsic Negative Diode) et les photodiodes APD (Avalanche Photodiode) sont les types favoris de photodiodes utilisées en tant que photodétecteur. [25]

II.5 Standardisation

Avec l'évolution rapide des technologies VLC, il a été impératif d'élaborer des normes pour standardiser les protocoles de la couche physique (PHY) et ceux de la couche de contrôle d'accès au médium (MAC, Media Access Control). De nombreux organismes nationaux de normalisation se sont intéressés à cette technologie considérée comme très prometteuse en raison du développement rapide de l'éclairage à semi-conducteurs.

La normalisation du VLC a été réalisée par le Consortium De Communication De Lumière Visible (VLCC) au Japon et par l'organisme IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Le VLCC a publié les normes JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association) CP-1221, JEITA Cp-1222 et JEITA Cp-1223. La norme 802.15.7 est la norme complétée par l'IEEE en 2011 pour les couches physique et MAC. [16]

La norme IEEE 802.15.7 fournit une référence minimale pour le développement de nouveaux produits. Les trois différentes classes d'appareils prises en compte par cette norme sont les véhicules, les mobiles et les infrastructures comme indiqué dans le tableau I.1.

En 2014, un nouveau groupe de travail 802.15.7r1 a été formé pour apporter des modifications à la norme précédente. La nouvelle norme, appelée IEEE 802.15.7r1, a été publiée en 2017. [26]

En 2018, une nouvelle norme IEEE 802.15.7m a été créée pour faire évoluer le premier standard en incluant les communications utilisant un capteur d'image ou caméra (OCC, Optical Camera Communication) et les communications faible débit unidirectionnelles utilisant des LEDs, tandis que la norme IEEE 802.15.13 a pris en charge le développement des communications OWC à haute vitesse (Multi-Gigabit/s Optical Wireless Communications).

Tableau II.1 : Classification des périphériques IEEE 802.15.7. [16]

	Infrastructure	Mobile	Véhicule
Coordinateur fixe	Oui	Non	Non
Source de courant	Ample	Limitée	Modérée
Facteur de forme	Non contraint	Contraint	Contraint
Source de lumière	Intense	Faible	Intense
Mobilité physique	Non	Oui	Oui
Intervalle	Court/Long	Court	Long
Débit de données	Elevé/Bas	Elevé	Bas

L'architecture IEEE 802.15.7, comme représentée sur la figure I.4, est définie par un nombre de couches et de sous-couches afin de simplifier le standard. Chaque couche est responsable d'une partie de la norme et offre des services aux couches supérieures. L'interface entre les différentes couches sert à définir des liens logiques. [27]

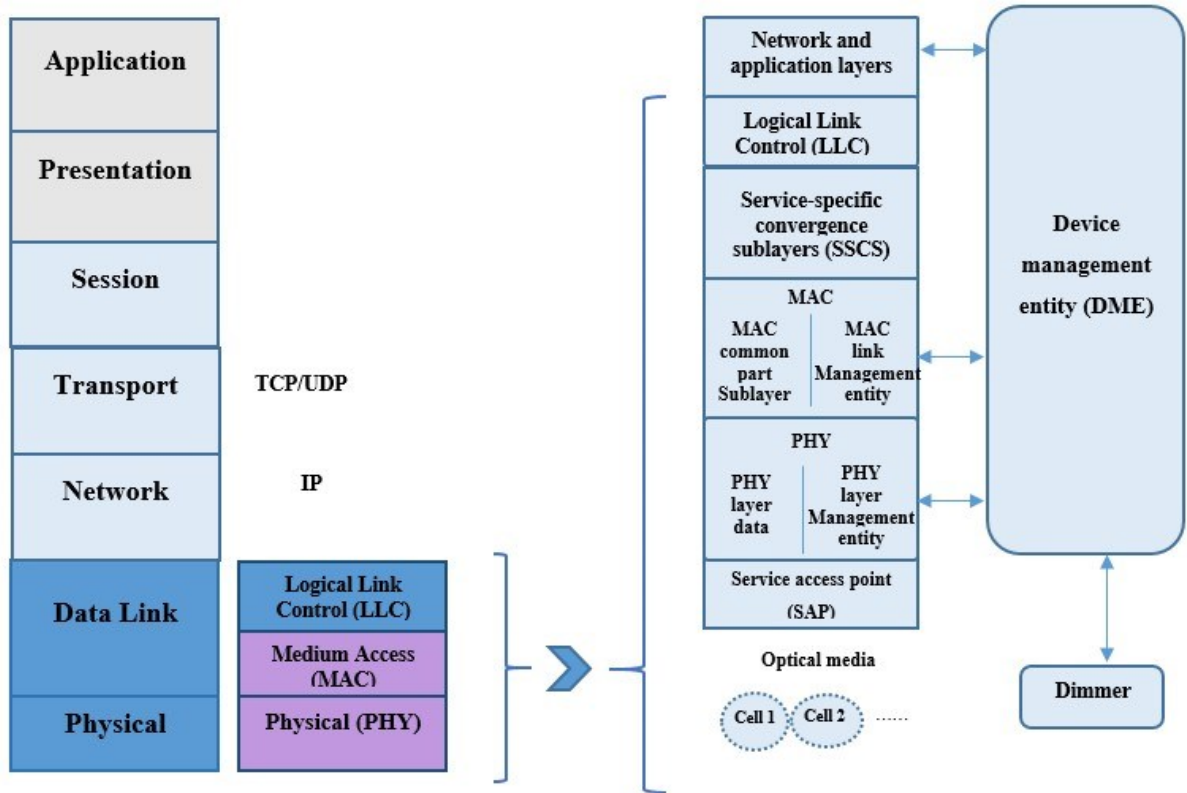


Figure II.4 : Architecture de périphérique VLC sous la norme IEEE 802.15.7.

Les couches supérieures (upper layers) sont constituées d’une couche réseau et d’une couche application. La définition de ces couches n’est pas prise en charge par la norme IEEE 802.15.7.

La couche LLC (Logical Link Control) peut accéder à la couche MAC par le biais de la sous-couche SSCS (Service-Specific Convergence Sub-layer). Une entité DME (Device Management Entity) est également prise en charge dans l'architecture et permet d’accéder à certains attributs associés au dimmer (gradateur) provenant du MLME (MAC Link Management Entity) et du PLME (PHY Layer Management Entity) afin de fournir des informations de gradation collectées à la couche MAC et PHY. Le DME peut également contrôler le commutateur PHY en utilisant le PLME pour la sélection des sources optiques et des photodétecteurs. Les détails du DME ne sont pas compris dans le domaine d'application de cette norme. Le commutateur PHY assure l'interface avec le point d'accès au service optique SAP (Service Access Point) et peut se connecter au support optique, qui peut être constitué d'un ou plusieurs émetteurs/récepteurs. [27-28].

II.5.1 Couche Physique

La couche PHY est responsable de la transmission, de la réception, de l'activation et de la désactivation de l'émetteur-récepteur optique. Cette couche est également responsable de la détection de l'état du canal de transmission, s'il est en état de repos ou occupé. Il y a 3 modes de fonctionnement dans la couche PHY. Ces différents modes sont présentés dans le tableau I.2.

Tableau I.2 : Modes de fonctionnement de la couche PHY. [29]

Mode de fonctionnement	Usage	Catégorie	Débit
PHY I	Outdoor	Faible	11.6 Kbps – 266.6 Kbps
PHY II	Indoor	Modéré	1.25 Mbps – 96 Mbps
PHY III	Émetteur- récepteur optique multiple	Modulation CSK	12 Mbps – 96 Mbps

Les trois types de PHY peuvent coexister mais ne peuvent pas inter-opérer. Les types PHY I et PHY II occupent différentes régions spectrales dans le spectre de modulation et coexistent en utilisant le multiplexage par répartition en fréquence (FDM, Frequency Division Multiplexing) (voir figure II.5). [21] Les mécanismes PHY I et PHY III occupent également différentes régions spectrales dans le spectre de modulation avec des débits de données différents et un support de débit optique différent assurant ainsi une coexistence entre eux.

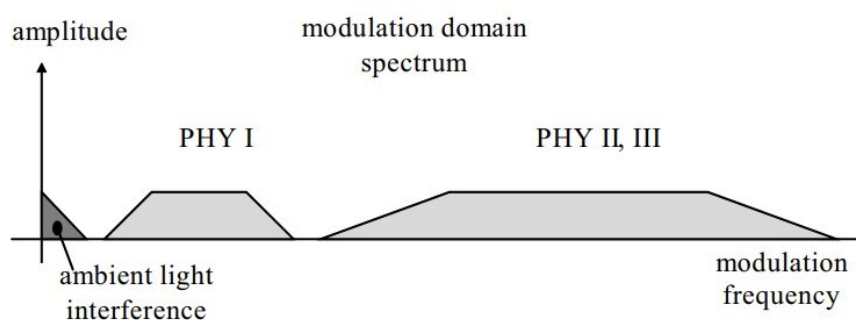


Figure II.5 : Multiplexage des types de PHY. [27]

Toutefois, les fréquences d'horloge optique utilisées pour PHY II et PHY III se chevauchent, ce qui entraîne un chevauchement important dans le spectre du domaine fréquentiel. De plus, tous les appareils ne prennent pas en charge plusieurs bandes de fréquence optique nécessaires pour PHY III. Par conséquent, tous les périphériques PHY III utilisent un périphérique PHY II pour la découverte de périphériques afin de prendre en charge la coexistence avec PHY II. [27].

II.5.1.1 Structure de la trame PHY

La structure de la trame PHY, comme illustrée à la figure I.6, est composée de trois parties principales : un en-tête de synchronisation SHR (Synchronization Header), un en-tête PHR (PHY header) et une unité de données de service PHY PSDU (PHY Service Data Unit). Les champs SHR, PHR et PSDU forment ensemble la trame PHY ou l'unité de données de couche PHY (PPDU, PHY Layer Data Unit). [27]

Preamble	PHY header	HCS (CRC)	Optional fields	PSDU
SHR	PHR			PHY payload

Figure II.6 : Format de la trame PHY.

- L'en-tête de synchronisation (SHR) est composé du préambule utilisé pour obtenir la synchronisation d'horloge.
- Le bloc PHR est composé d'un en-tête PHY, d'un champ HCS (Header Check Sequence) et de champs facultatifs. L'en-tête PHY contient des paramètres indiquant comment les données doivent être transmises, la partie HCS permet de vérifier les erreurs éventuelles et les champs facultatifs permettent de proportionner des informations plus spécifiques.
- Le bloc PHY Service Data Unit (PSDU) contient la charge utile de la trame. [30]

II.5.2 Couche MAC

La couche MAC a plusieurs rôles importants à réaliser :

- Gestion du mécanisme d'accès au support.
- Garantir l'intégrité des données.
- Supporte les associations et dissociations au réseau personnel de communication en lumière visible (VPAN, VLC Personal Area Network).
- Stabilisation de la couleur.
- Gestion des mécanismes de support d'éclairage et de gradation.
- Gestion des mécanismes de prise en charge de la mobilité.
- Fournir un lien fiable entre différentes entités MAC. [27-28]

La couche MAC fournit deux services aux couches supérieures : SAP (Service Access Point) :

- Service de données : MCPS-SAP (MAC Common Part Sublayer);
- Service de gestion : MLME-SAP (MAC Layer Management Entity).

La couche MAC reçoit deux services de la couche physique qui est la couche inférieure.

- Service de données : PD-SAP (PHY Data service);
- Service de gestion : PLME-SAP (PHY Layer Management Entity). [31]

La Figure II.7 propose une illustration des interactions des services proposés et reçus par la couche MAC.

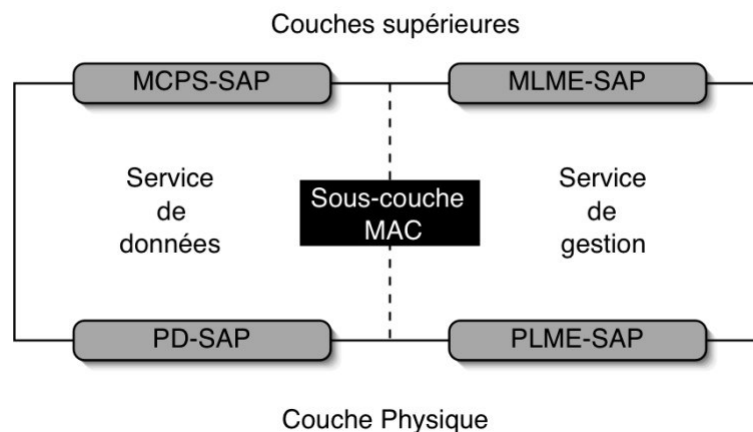


Figure II.7 : Interactions des services de la couche MAC. [31]

II.5.2.1 Structure de la trame MAC

Comme illustré à la figure I.8, chaque trame MAC comprend les composants de base suivants :

- un en-tête MAC (MHR, MAC Header) comprenant le contrôle de trame, le numéro de séquence, les informations d'adresse et les informations relatives à la sécurité.
- Une unité de données de service MAC (MSDU, MAC Service Data Unit) de longueur variable, qui contient des informations spécifiques au type de trame. Les trames d'accusé de réception ne contiennent pas de charge utile.
- Un champ MAC Footer (MFR) contenant une séquence de contrôle de trame (FCS, Frame Control Sequence). [32]

Frame Control	Sequence Number	Dest. VPAN Identifier	Addressing Fields	Auxiliary Security Header	Frame Payload	FCS
MHR					MSDU	MFR

Figure II.8 : Format de la trame MAC.

II.6 Topologies de réseau VLC

La norme IEEE 802.15.7 relatives aux réseaux VPAN prend en charge trois topologies : pair à pair, étoile et mode diffusion (voir figure II.9).

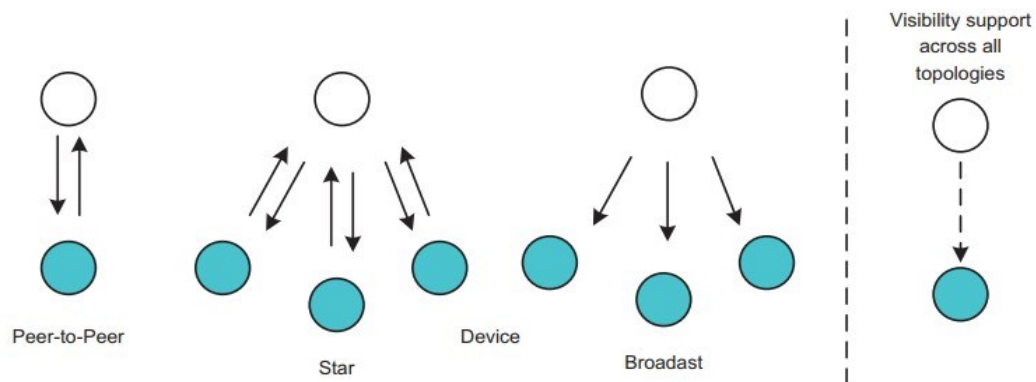


Figure II.9 : Topologies MAC prises en charge par IEEE 802.15.7. [16]

- **Topologie en pair-à-pair (peer to peer) :** Les échanges peuvent se faire directement entre deux dispositifs sans passer par un coordinateur réseau.
- **Topologie en étoile :** Les échanges de données passent par un coordinateur réseau.
- **Topologie en mode diffusion :** L'appareil en mode diffusion peut transmettre un signal à d'autres appareils sans former de réseau. La communication est unidirectionnelle et l'adresse de destination n'est pas obligatoire. [27]

II.7 Les modulations dans le domaine des VLC

Il existe plusieurs techniques de modulations associées aux communications par optique sans fil. Dans le cadre des VLC, la sélection d'une modulation en particulier se fait selon deux critères :

• **Besoin en éclairage** : Différentes activités nécessitent des éclairagements différents, tels que 30–100 lux requis pour des activités visuelles normales dans des lieux publics. Il existe une relation non linéaire entre la lumière mesurée et la lumière perçue, leur relation est donnée par l'équation II.1 :

$$\text{Lumière perçue (\%)} = 100 * \frac{\sqrt{\text{Lumière mesurée}}}{100} (\%) \quad (\text{II.1})$$

• **Adaptation à l'effet de scintillement** : Les changements de luminosité de la lumière modulée doivent être effectués de manière à ne pas entraîner de fluctuations perceptibles par l'homme. Selon l'IEEE 802.15.7, la commutation doit être effectuée à un taux plus rapide que 200 Hz pour éviter des effets nocifs. [16]

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

Les trois premières modulations sont retrouvées dans la couche physique (PHY) de la norme IEEE 802.15.7. Les types PHY I et PHY II sont définis pour une source lumineuse unique et prennent en charge les technologies OOK et VPPM, tandis que le type PHY III utilise plusieurs sources optiques à plusieurs fréquences (couleurs) en utilisant la modulation CSK. Les trois systèmes peuvent coexister offrant une atténuation de scintillement et une prise en charge de la gradation et permettent un compromis entre les débits de données et les plages de gradation. [33]

II.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.[23] Cinq débits différents sont utilisés, à savoir 11.67 kbit/s, 24.44 kbit/s, 48.89 kbit/s, 73.3 kbit/s et 100 kbit/s. [21].

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. [35]

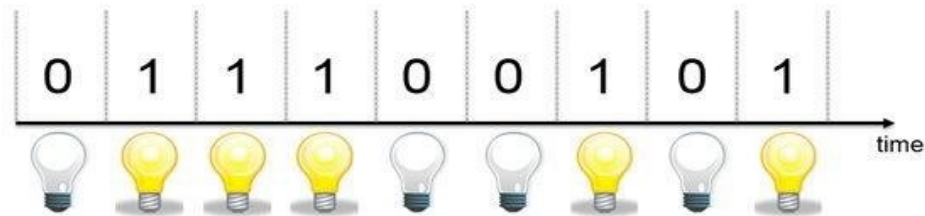


Figure II.10 : Schéma de modulation OOK. [36]

II.7.2 La modulation VPPM

La modulation VPPM est une variante de la Pulse Position Modulation (PPM), développée spécifiquement pour les VLC. En modulation PPM, l'information est représentée par la position de l'impulsion dans le temps. La variante VPPM introduit en plus la variation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse Width Modulation), en fonction du niveau d'intensité lumineuse (voir figure II.11). 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. [19]

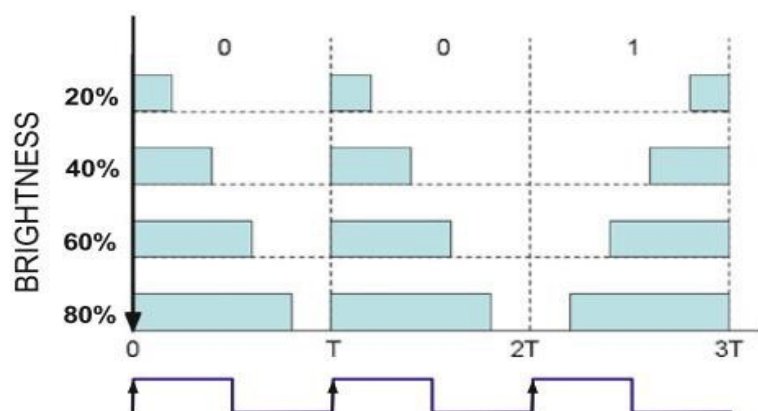


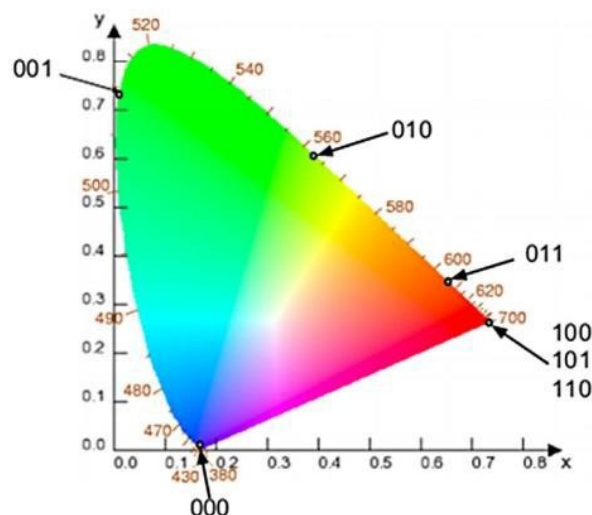
Figure II.11 : Modulation VPPM. [34]

II.7.3 La modulation CSK

A l'instar de la modulation VPPM, la modulation « Color-Shift Keying » est spécifique aux VLC. Elle a été proposée dans la norme IEEE 802.15.7 pour améliorer le débit de données

qui était faible dans d'autres types de modulation. La capacité de commutation ralentit en produisant une lumière blanche à l'aide de phosphore jaune et de LEDs bleues. Par conséquent, une autre façon de produire la lumière blanche consiste à utiliser trois LEDs distinctes, le vert, le bleu et le rouge. Elle est spécialement définie en utilisant l'intensité des trois couleurs d'une source LED RGB (Red Green Blue). La modulation CSK dépend du diagramme de chromaticité de l'espace colorimétrique. Contrairement aux autres modulations, les symboles sont ici sélectionnés de manière à ce que l'émission lumineuse reste constante alors que les différentes composantes chromatiques associées à chaque couleur varient. Cette modulation mappe toutes les couleurs perceptibles à l'œil sur deux paramètres de chromaticité tels que x et y . La

figure II.12 illustre les sept bandes de longueur d'onde visibles par l'œil présentées dans un tableau avec leurs centres représentés sur le diagramme. [16-19]



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, 0.597)
588-633	011	611	(0.669, 0.331)
633-679	100	656	(0.729, 0.271)
679-726	101	703	(0.734, 0.265)
726-780	110	753	(0.734, 0.265)

Figure II.12 : Modulation CSK. [16]

Cette technique permet de s'affranchir complètement des problèmes de scintillement. De plus, comme le flux lumineux émis est constant, le courant de commande reste constant lui aussi, diminuant ainsi grandement les contraintes sur les sources.

La limitation de cette modulation est liée à la complexité et à la nécessité en réception d'être capable de recevoir chaque couleur. [19]

II.7.4 La modulation OFDM

Le principe de cette modulation est de considérer que les données sont envoyées sur plusieurs canaux en parallèle en utilisant différentes sous porteuses. Ainsi, le temps de chaque symbole correspondant à chaque sous porteuse est bien plus grand que son équivalent pour une porteuse unique, réduisant ainsi grandement l'impact de l'IES tout en permettant d'optimiser la bande passante.

Pour les applications hauts débits, on se retrouve rapidement confronté aux problèmes de limitation de la bande passante des sources ainsi que de génération de l'IES (Interférence entre symboles). Afin de répondre au mieux à ces problématiques, on peut utiliser une modulation de type OFDM.

L'utilisation d'un intervalle de garde permet également d'éliminer l'interférence entre sous-porteuses. Le principal avantage est alors de pouvoir réaliser une égalisation très simple en réception. De plus, il est possible de maximiser les performances en définissant différents débits et puissances transmises pour chaque sous porteuse.

Dans le cas d'un système IM/DD (Intensity-Modulated/Direct-Detected), les signaux portant l'information doivent être des réels positifs. Il s'agit de la différence majeure entre l'OFDM pour l'optique et pour les RF.

Différentes techniques ont été proposées pour adapter l'OFDM à un canal IM/DD. On peut citer en particulier la modulation DCO-OFDM (Direct Current biased Optical-OFDM) ou la modulation ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical-OFDM).

Malgré les nombreux avantages, la mise en œuvre de cette modulation est complexe, augmentant ainsi le prix des systèmes utilisant cette méthode. [19]

II.8 Avantages des communications VLC

Comparées aux technologies RF, les communications par lumière visible présentent de nombreuses caractéristiques très avantageuses, comme expliquées dans [19] et [20].

- **Large bande passante :** Le spectre des ondes radio est limité, de 3 kHz à 300 GHz, alors que le spectre de la lumière visible est d'au moins 10000 fois plus grand, qui est de 430 THz à

790 THz. Contrairement aux RF, elle s'étend sur plusieurs THz et peut être utilisée sans restriction. Cet avantage permet de répondre au problème croissant de la congestion du spectre RF, limitant de plus en plus le déploiement de nouveaux appareils et réseaux de communications.

- **Pas d'interférence électromagnétique** : L'utilisation d'ondes lumineuses ne cause aucune perturbation électromagnétique. Les systèmes VLC conviennent aux communications dans les environnements d'immunité aux interférences électromagnétiques (EMI, Electromagnétique Interférence), tels que les hôpitaux, les centrales nucléaires, et les avions.

- **Sécurisé** : Etant donné que les rayons lumineux ne traversent pas la matière et ne peuvent pénétrer dans les objets opaques, ils sont donc généralement confinés dans leur environnement. L'interception des données est ainsi impossible de l'extérieur. C'est un avantage qui permet d'améliorer la sécurité de l'information et d'assurer des liaisons de communications plus sûres.

- **Absence de risques pour la santé** : Étant donné que l'éclairage des LEDs ne génère pas de rayonnement, contrairement aux dispositifs à fréquence radio ou à micro-ondes, aucun risque évident n'est encouru pour l'environnement et la santé des utilisateurs.

- **Mise en œuvre facile et bas coût** : La mise en œuvre d'un système VLC est relativement simple. Au lieu de concevoir un système de communication sans fil complet, cette technologie permet de combiner les fonctions d'éclairage et de communication, seul quelques modules supplémentaires sont ajoutés au système d'éclairage. Ainsi, les besoins en termes d'installation et de maintenance sont réduits. Grâce au développement rapide de l'industrie des LEDs, le coût de la production massive d'émetteurs-récepteurs VLC ne cesse de diminuer.

- **Economique et écologique** : Les systèmes VLC peuvent réduire la consommation d'énergie car ils utilisent les éclairages à LED reconnus comme dispositifs d'éclairage écologique capables de réduire de 80% cette consommation par rapport à celle des sources d'éclairage traditionnelles. Si toutes les sources d'éclairage sont remplacées par des LEDs, la consommation mondiale d'électricité devrait être réduite de 50%. Selon un rapport récent du département américain de l'énergie, il est possible d'économiser jusqu'à 207 Téra Watt Heures (TWh) d'ici à 2025 grâce à l'adoption de la technologie d'éclairage à LED.

II.9 Limites et challenges des communications VLC

Malgré ses avantages intrinsèques par rapport aux autres systèmes de communication, VLC doit encore faire face à de nombreux défis qu'il faut résoudre. VLC est en phase de développement et, pour une éventuelle adoption commerciale, plusieurs problèmes ou limitations nécessitent une attention particulière.

Bande passante de modulation : L'un des principaux défis des communications VLC est la faible bande passante de modulation disponible pour les LEDs, qui est généralement de plusieurs mégahertz. Cette faible bande passante limite le débit de données réalisable. Il existe plusieurs méthodes pour améliorer la bande passante disponible pour les communications à l'aide de LED à lumière blanche, notamment le filtrage bleu, dans lequel le composant luminescent jaune du récepteur est bloqué à l'aide d'un filtre bleu, ce qui améliore la bande passante de modulation jusqu'à 20 MHz.

Interférence et bruit : D'autres sources de lumière artificielles et naturelles, telles que les lampes fluorescentes, à incandescence et solaires, créent un bruit de fond et des interférences car elles partagent la même bande de longueur d'onde que la transmission VLC. Il faut supprimer ces interférences dans la bande pour augmenter le rapport signal sur bruit parasite (SINR, Signal-to-Interference-plus-Noise) au niveau du récepteur. Les filtres optiques sont une méthode simple pour éliminer la grande majorité des interférences de source naturelle et artificielle. Combinés à un filtrage analogique et numérique supplémentaire après le photodétecteur, ils permettent de garantir que les interférences restantes soient négligeables. Le codage Manchester a fait preuve de sa résistance aux éclairages fluorescents à basse fréquence et a permis la réduction des bruits de fond optiques générés par les LEDs fonctionnant à des basses fréquences inférieures à 500 KHz. [33]

Non linéarité : Le défi majeur de la communication par la lumière visible est la non-linéarité des LEDs. La relation entre un flux d'électrons et la lumière émise par les LEDs n'est pas linéaire. Cela influe sur la configuration de la communication en lumière visible basée sur le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) qui inclut un rapport crête/moyenne plus élevé et provoque une augmentation du taux d'erreur (BER, Bit Error Rate) et des interférences entre porteuses (ICI). Afin de contrôler la non-linéarité des LEDs, il est nécessaire de rechercher un point de fonctionnement en courant continu optimal et une puissance de signal OFDM optimale pour moduler l'intensité de la LED.

Canaux de liaison montante (uplink) : VLC peut être utilisé pour la transmission de données par voie descendante (downlink) mais pas pour la voie montante (uplink). La tâche fondamentale de l'illumination rend VLC naturellement adapté aux applications de diffusion mais la fourniture d'une liaison montante adaptée aux structures d'émetteur a posé problème. La lumière visible ne convient pas pour la liaison montante, sinon le récepteur devra également être muni d'une LED en état de marche pour demander la donnée, ce qui n'est pas vraiment le but recherché. Néanmoins, pour des raisons de coût et de bande passante élevée, VLC peut être mis en œuvre pour fournir une liaison descendante non encombrée de grande capacité, tandis que le Wi-Fi ou l'IR peuvent fournir une liaison montante fiable, là où la congestion est moins probable. Plusieurs approches de liaison montante ont été proposées, y compris les émetteurs- récepteurs IR (Infrarouge), proche UV (Ultraviolet), RF et rétro réfléchissants, mais des études supplémentaires doivent être menées pour rechercher d'autres solutions et comparer les performances de toutes ces options.

Niveaux d'illumination : Etant donné que les communications VLC sont basées sur une source d'éclairage, il est important de minimiser la dégradation des performances de transmission des informations lorsque le niveau d'éclairage change pour ainsi pouvoir communiquer même dans les situations où la lumière est généralement éteinte. Lorsque des lieux sont occupés, les lumières sont généralement allumées à des fins d'éclairage, ce qui permet aux communications VLC de se dérouler sans frais d'énergie. Mais dans les conditions où les lumières ont tendance à être éteintes, le VLC ne peut pas avoir lieu. C'est pour cela qu'il est nécessaire que les lumières soient allumées mais avec une luminosité atténuée pour fournir la puissance nécessaire à la transmission VLC sans que l'éclairage soit remarqué. En général, il est nécessaire d'ajuster la luminosité des LEDs à mesure que le temps change tout en maintenant la transmission avec des performances acceptables. Cela exige le contrôle des puissances des LEDs, le contrôle des fonctions de transmission de données et le contrôle de gradation.

Ligne de vue : Le lien LoS (Line of Sight) correspond au trajet qui relie directement l'émetteur au récepteur. Dans une communication VLC, les récepteurs sont censés avoir une ligne de vue claire avec le système d'éclairage, ce qui constitue un certain avantage car le signal sera plus puissant. Les signaux lumineux visibles peuvent être réfléchis mais ne pénètrent pas dans la plupart des objets, ce qui peut constituer un désavantage en termes de couverture.

Un nombre de sources lumineuses doit être distribué pour maintenir un rapport signal sur bruit élevé. Si les niveaux de lumière sont faibles et que les récepteurs VLC n'ont pas de lien LoS, la communication est fortement limitée et le débit binaire est donc réduit. Le blocage de la ligne de vue est connu sous le nom de shadowing. Une modulation adaptative et un codage permettant de s'adapter en fonction des changements de canal peuvent être effectués pour empêcher les phénomènes de blocages.

Mobilité : La mobilité des utilisateurs est un point essentiel. Si le récepteur ou l'émetteur est mobile, la liaison peut être perdue en raison du mouvement ou de la rotation du terminal. Par conséquent, il est nécessaire et important de disposer de techniques de récupération de lien, de techniques d'adaptation de débit et de mécanismes de transfert pour maintenir le bon fonctionnement de la communication.

Distorsion par trajets multiples : Lorsque les émetteurs-récepteurs sont équipés d'un large faisceau, les copies du même signal provenant de plusieurs chemins arrivent à la destination avec des retards différents, car chaque chemin a une distance différente de la source à la destination. Cela crée une distorsion par trajets multiples pouvant entraîner des interférences entre symboles qui dégradent gravement la performance de la communication. [33]

II.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.

Comme représenté dans [21] et [34], voici quelques une 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'aéronefs et chacun de ces éclairages pourrait être un potentiel émetteur VLC pour fournir à la fois des services d'éclairage et des services multimédias aux passagers. De plus, cela réduira les coûts de construction de l'avion et son poids.

- **Éclairage intelligent :** Les bâtiments intelligents nécessitent un éclairage esthétique. L'éclairage intelligent avec VLC fournit l'infrastructure nécessaire à la fois pour l'éclairage et la communication et réduit les circuits et la consommation d'énergie au sein d'un édifice.

- **Hôpitaux** : Dans les hôpitaux, certains équipements sont susceptibles d'interférer avec les ondes radio. L'utilisation du VLC présente de nombreux avantages dans ce domaine.

- **Communications sous-marines** : VLC peut prendre en charge des débits de données élevés sous l'eau, là où d'autres technologies sans fil comme les RF ne fonctionnent pas. Ainsi, les communications entre les plongeurs ou les véhicules télécommandés sont possibles.

- **Véhicule et transport** : Les feux de circulation et de nombreuses voitures utilisent des lumières à LED. Les voitures peuvent communiquer entre elles pour prévenir de quelconque accident et les feux de circulation peuvent également communiquer avec les voitures pour assurer la sécurité routière.

- **Environnements dangereux** : Dans des environnements tels que les usines pétrochimiques, les mines,...etc., les radiofréquences sont potentiellement dangereuses car il existe des risques d'explosion, ce qui rend la communication difficile. VLC peut être utilisée dans ce domaine, car il s'agit d'une technologie sûre qui fournit à la fois un éclairage et une communication.

- **Localisation** : Les personnes pourraient tirer parti des LEDs à distribution dense pour les références de localisation et utiliser des algorithmes de triangulation pour prévoir la position des périphériques. Il en résulte que le positionnement et la navigation à l'intérieur deviennent très précis grâce aux LEDs, comme le GPS (Global Positioning System) pour les satellites en extérieur. Les LEDs pourraient également envoyer des signaux de commande à un robot intelligent et guider son mouvement précis le long d'un itinéraire pour atteindre sa destination prédéfinie.

- **Li-Fi** : Le Li-Fi est un système de communication sans fil à lumière visible bidirectionnel à haute vitesse entièrement connecté. Il est analogue au Wi-Fi qui utilise la fréquence radio pour la communication. Un Li-Fi prête aussi soutien à l'Internet des objets (IoT). Une vitesse allant jusqu'à 10 Gbits/s peut être obtenue en utilisant le Li-Fi, qui est 250 fois plus grande que la vitesse du très haut débit. Cette technologie est expliquée plus en détail au cours du chapitre suivant.

II.11 Activités relatives aux communications VLC menées dans le monde

Les avantages potentiels de la technologie VLC ont convaincu des groupes de recherche de différentes régions du monde de s'efforcer de développer cette technologie. Cependant, durant les premières années, la recherche VLC était principalement prise en compte dans les pays asiatiques. Comme l'énorme potentiel du VLC a commencé à être révélé, des laboratoires de recherche européens et américains ont commencé à travailler dans ce domaine et à ajouter des contributions significatives aux progrès du VLC.

En Chine : Huawei, China Telecom, Sanan Optoelectronics, Shenzhen Absen, Unilumin et Cnlight figurent au nombre des entreprises chinoises spécialisées dans la mise au point de produits basés sur les communications VLC.

Au Japon : Le laboratoire Nakagawa de l'Université Keio, Panasonic Corporation, CASIO, NEC et FUJI Electric figurent au nombre des institutions/entreprises qui mènent des travaux de recherche ou conçoivent des produits sur les communications VLC au Japon.

En Corée : L'Université nationale des sciences et des technologies de Seoul, l'Université Kookmin, l'Université Kongju, l'Université Namseoul, Samsung, LG et ETRI comptent parmi les institutions/entreprises qui mènent des travaux de recherche ou conçoivent des produits sur les communications VLC en Corée du Sud.

Au Pays-Bas : L'Université de technologie d'Eindhoven, le groupe des communications électro-optiques et Signify (connu aujourd'hui sous le nom de Philips Lighting), KPN et KIEN participent également à des projets relatifs aux communications VLC.

En Turquie : Les principales institutions menant des travaux de recherche sur les communications VLC sont Tubitak Bilgem, Okatem, l'Université Ozyegin et l'Université Medipol d'Istanbul. Ford Otosan, Farba, Aselsan et Turk Telekom participent également à des projets relatifs aux communications VLC.

En France : L'université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, la start-up Lucibel, la start-up Oledcomm, la start-up Luciom pour la localisation en intérieur participent également au développement des technologies VLC.

En Allemagne : L'Université de Brême et l'institut Fraunhofer pour les télécommunications de l'Institut Heinrich Hertz (IHH) sont l'un des groupes de recherche les plus importants du VLC. Le travail de l'IHH était axé sur le développement de systèmes VLC à haut débit.

En Angleterre : Y figurent spécialement l'Université d'Oxford pour le développement de systèmes VLC à haut débit. En utilisant des systèmes MIMO, l'université de Northumbria groupe de recherche sur l'utilisation de LEDs organiques (OLED) pour le traitement VLC et la start-up PureLiFi pour la mise sur le marché des technologies de communication par lumière visible.

Aux Etats-Unis d'Amérique : La startup Basic6, le centre de recherche en génie de l'éclairage intelligent de l'Université de Boston, la société LVX system se sont particulièrement intéressés à toutes les formes de système VLC. [15] [21]

II.12 Conclusion

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

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

Chapitre III

Le système DCO -OFDM

III.1 Introduction

Dans les systèmes de communication par lumière visible (VLC), le multiplexage optique par répartition orthogonale en fréquence (O-OFDM) est un schéma de modulation attrayant. Récemment, un certain nombre de schémas O-OFDM ont été proposés. Parmi eux, le courant continu O-OFDM (DCO-OFDM) est un schéma largement utilisé pour son efficacité spectrale élevée et sa faible complexité. Étant donné que VLC implique une combinaison d'éclairage et de communication, une puissance optique différente est souvent nécessaire pour atteindre un certain niveau d'éclairage.

Dans ce chapitre impact DCbias performance ce de système DCO-OFDM, pour calcule ; SNR.BER.PAPR.

III.2 Description du système VLC - l'OFDM

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

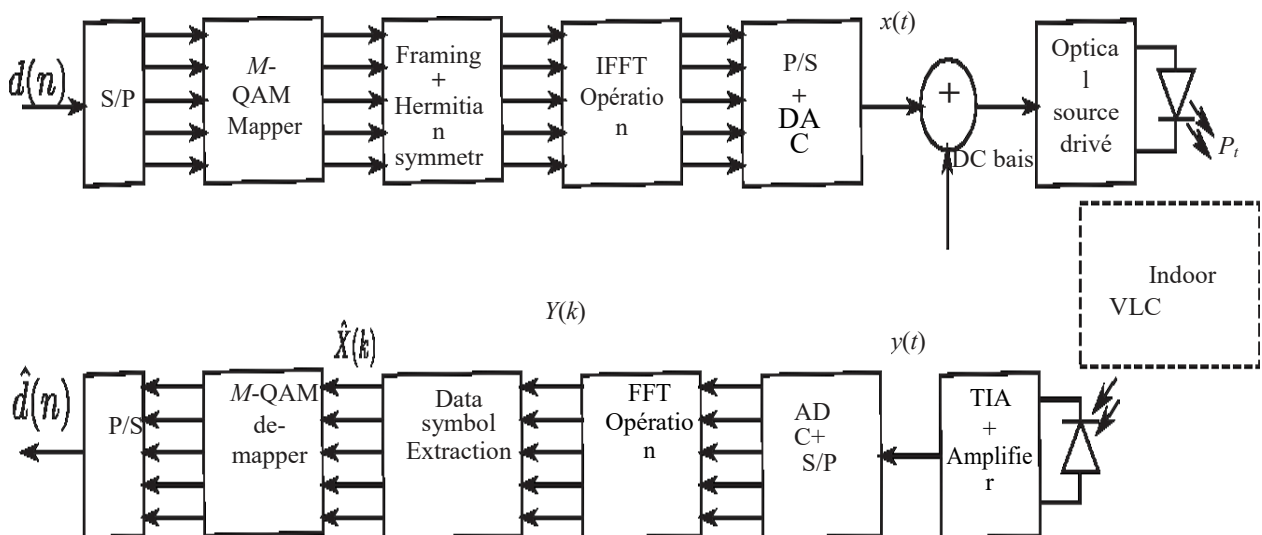


Figure III.1 : Illustration du schéma fonctionnel du système de base OFDM-VLC

L'OFDM optique est similaire à celui utilisé dans les communications radio, sauf que le signal doit être réel et unipolaire. Le site le signal $X(k)$ avant l'opération IFFT comme représenté dans la première condition est remplie en imposant la symétrie hermitienne sur (III.1) :

$$X_H = \left[1, X(k), \underbrace{0,0, \dots, 0}_{\frac{N(L-1)}{2}}, 0, \underbrace{0,0, \dots, 0}_{\frac{N(L-1)}{2}}, X^*(NL - K) \right] \quad (III.1)$$

Où $(N)2(N_{sub})$ et $X^*(.)$ représente le conjugué complexe de $X(.)$. Le signal est sur-échantillonné L fois afin de capturer adéquatement tous les pics du signal. Le signal correspondant $x(n)$ dans le domaine temporel, sur-échantillonné L fois, est donc donné par: [36]

$$X(n) = \frac{1}{\sqrt{NL}} \sum_{m=0}^{NL-1} X_H(m) e^{[j2nm/NL]}; 0 \leq n \leq NL - 1 \quad (III.2)$$

La deuxième condition est remplie en ajoutant une polarisation en courant continu au signal du domaine temporel $x(t)$ à la sortie du module P/S et DAC ; on obtient alors un OFDM polarisé en courant continu (DCO-OFDM). Il convient de mentionner que certaines autres variantes de l'OFDM optique sont unipolaires par conception et ne nécessitent aucune polarisation en courant continu. Dans cette catégorie, on trouve notamment l'OFDM à écrêtage asymétrique et l'OFDM unipolaire, dans [37], [38].

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

$$P_t = K(X_{dc} + \alpha x(t)) \quad (III.3)$$

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

Où α représente l'indice de modulation optique et K est le coefficient de conversion du

signal électrique en puissance optique du modulateur. Pour éviter l'écrêtage du signal dû à une polarisation continue insuffisante, la condition $\geq |\min[x(t)]|$ doit être satisfaite.

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

L'OFDM reste un défi majeur en raison de son PAPR élevé, et le système doit donc être amélioré pour tenter de réduire son impact négatif.

III.3 Types d'OFDM – VLC

III.3.1 ACO-OFDM

Dans ACO-OFDM, seules les sous-porteuses impaires transportent des symboles de données, tandis que les sous-porteuses paires forment un signal de polarisation qui garantit que le signal OFDM transmis répond à l'exigence de non-négativité. La figure 2 montre un système ACO-OFDM. Le signal d'entrée de l'IFFT est composé uniquement de composants impairs.

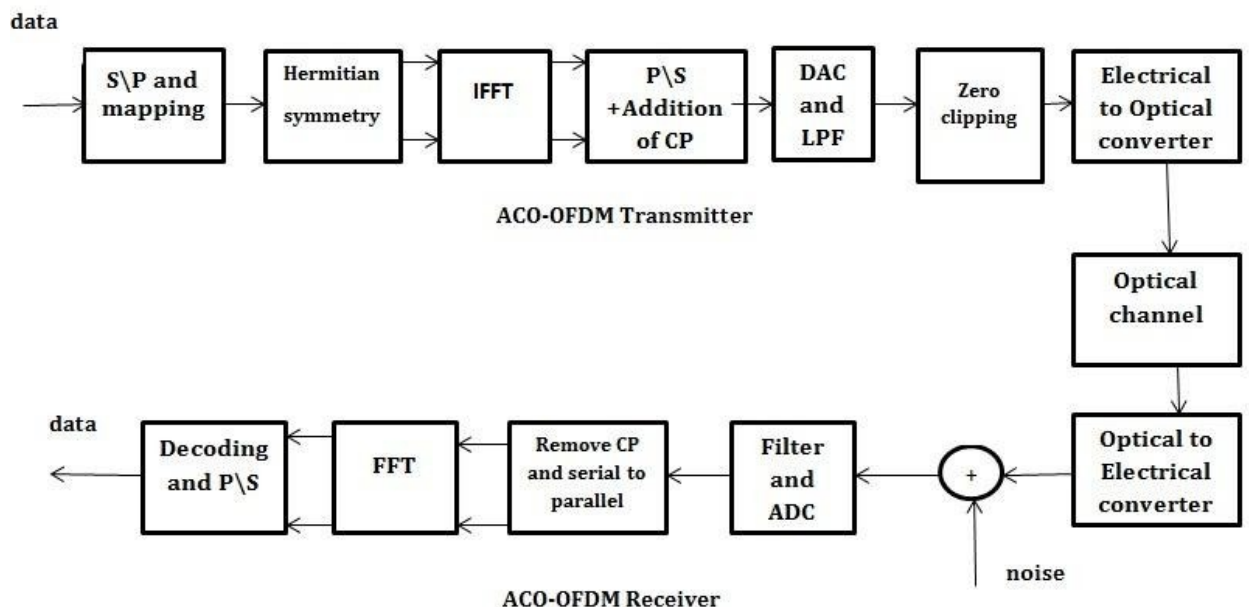


Figure III.2: système ACO-OFDM

Qui se traduit par le signal ACO-OFDM. Du fait de l'anti-symétrie du signal, l'écrêtage n'entraîne aucune perte d'information. Le signal ACO-OFDM est ensuite transmis en entrée à un modulateur optique idéal et le signal résultant est transmis sur un canal AWGN. Le traitement dans le récepteur est similaire à un récepteur DCO-OFDM, sauf que dans ACO-OFDM, seules

les sous-porteuses impaires sont démodulées, car seules elles transportent les symboles de données.

III.3.1. DCO-OFDM

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

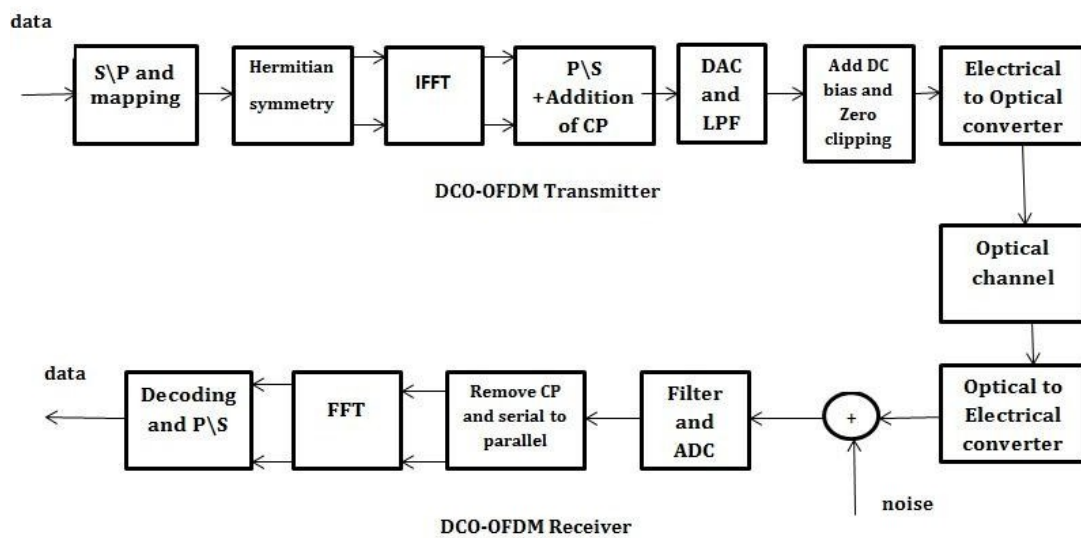


Figure III.3 : système DCO-OFDM.

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

III.4 Paramètre d'évaluation

III. 4.1 BER

Le BER est le rapport des bits d'erreurs au nombre total de bits transmis pendant l'intervalle de temps, c'est-à-dire

- $BER = (\text{bits d'erreur}) / (\text{nombre de bits transmis})$

III. 4.2 SNR

Le SNR est le rapport de l'énergie du bit (E_b) à la puissance du bruit densité spectrale (N_0) et s'exprime en db.

- $SNR = E_b / N_0$

Pour tout schéma de modulation, le BER est exprimé en termes de SNR. Le BER est mesuré en comparant le signal transmis avec le signal reçu, et calculer le nombre d'erreurs sur le nombre total de bits transmis.

III. 4.3 PAPR

La forme discrète du signal OFDM $x(n)$ est donnée par

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=0}^{n-1} X_k e^{j2\pi kn/N}, \text{ pour } n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$$

Le PAPR du signal transmis OFDM en bande de base en temps continu $\mathbf{x}(t)$ est le rapport de la puissance maximale instantanée et la puissance moyenne. Par définition

$$PAPR = \max[x(t)]^2 / E\{|x(t)|^2\}, \text{ pour } 0 \leq t \leq NT$$

Où, désigne l'opérateur d'attente et $E\{|x(t)|^2\}$ est la puissance moyenne $x(t)$ de ainsi que T est une période symbolique originale.

III.5 Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation de la DCO-OFDM.

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

Tableau III.1 : Paramètres de simulation.

Parameters	Valeur
Taille IFFT (N)	256
Modulation	4-QAM, 16-QAM, 64 QAM
Longueur CP	16; 64

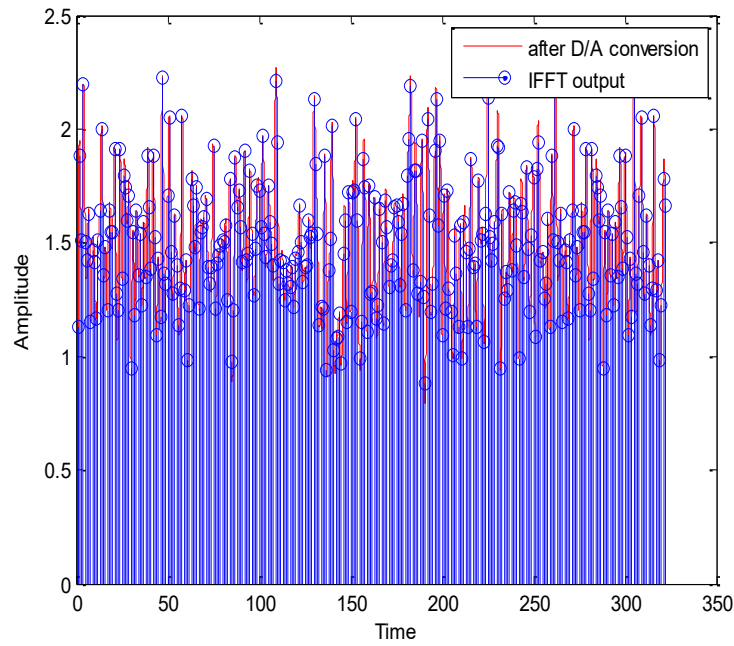


Figure III.4 : Représente Sortie IFFT et signal continu après conversion D/A

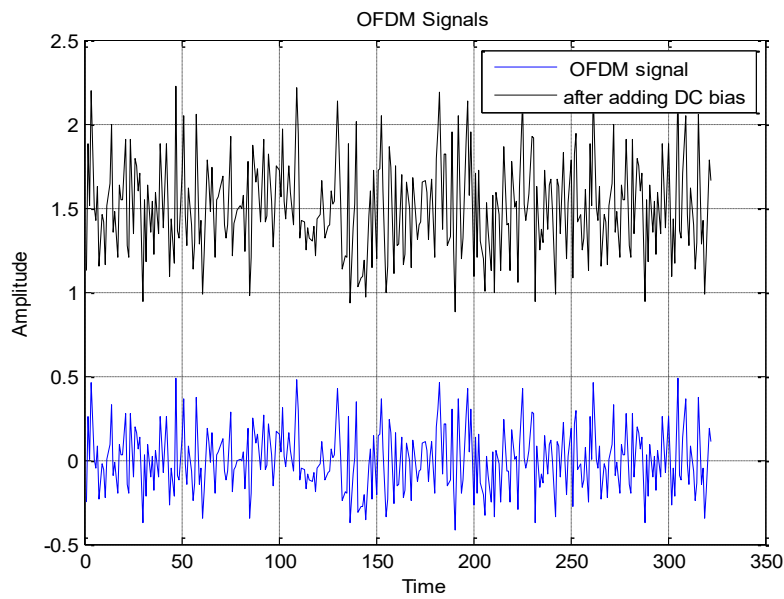


Figure III.5 : Représente Signal OFDM

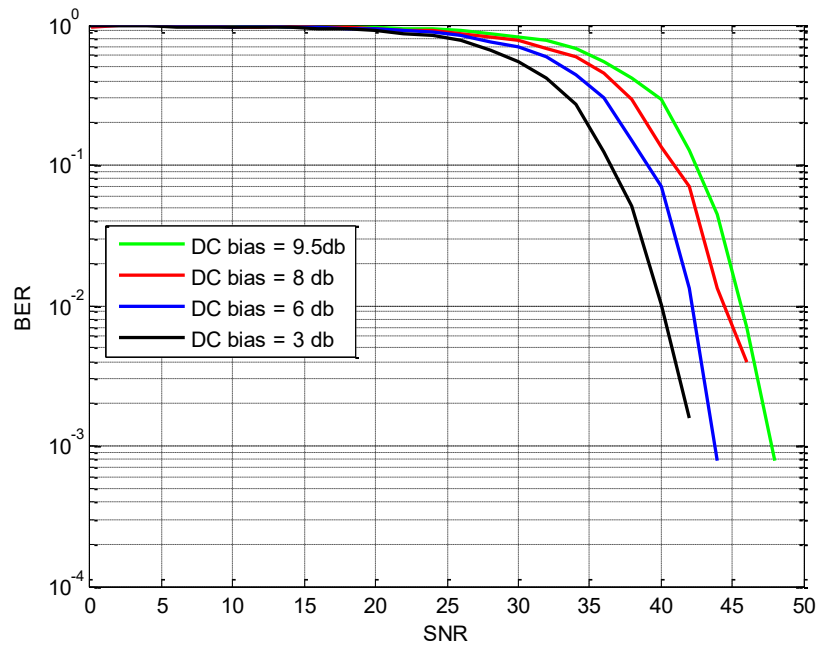


Figure III.6 : Représente BER fonction de SNR d'un système DCO-OFDM pour 64-QAM

La courbe montre (III.6) variation de BER /SNR

A titre D'exemple pour $BER = 10^{-2}$. Un SNR d'evenir (40db, 42db, 44db, 46db) pour DCbias (3,6,8,9.5) respectivement.

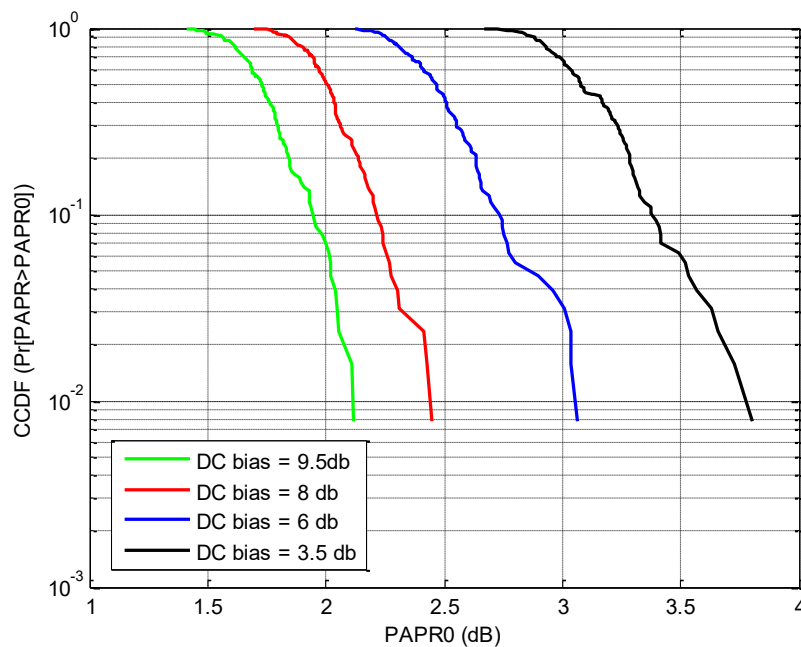


Figure III.7: Représente CCDF du signal DCO-OFDM pour 64-QAM

La courbe montre (III.7) variation de CCDF / PAPR0(dB)

A titre D'exemple pour CCDF = 10^{-1} . PAPR0(1.9db, 2.25db, 2.75db, 3.3db) pour DCbias (3,6,8,9.5) respectivement.

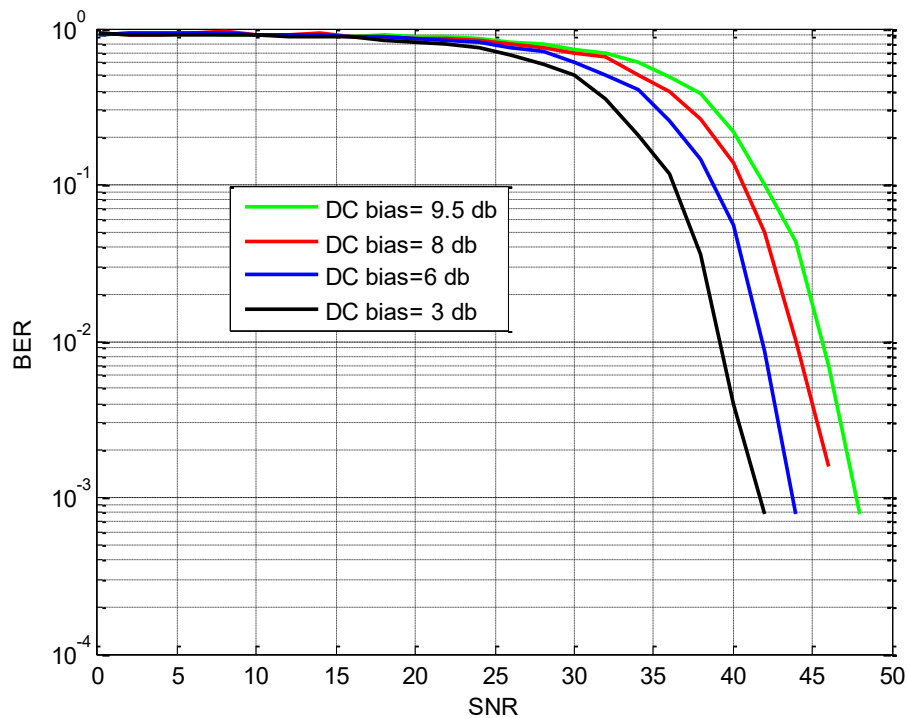


Figure III.8: Représente BER fonction de SNR d'un système DCO-OFDM pour 16-QAM

La courbe montre (III.8) variation de BER / SNR

A titre D'exemple pour BER = 10^{-2} . Un SNR d'evenir (38db, 42db, 44db, 47db) pour DCbias (3,6,8,9.5) respectivement.

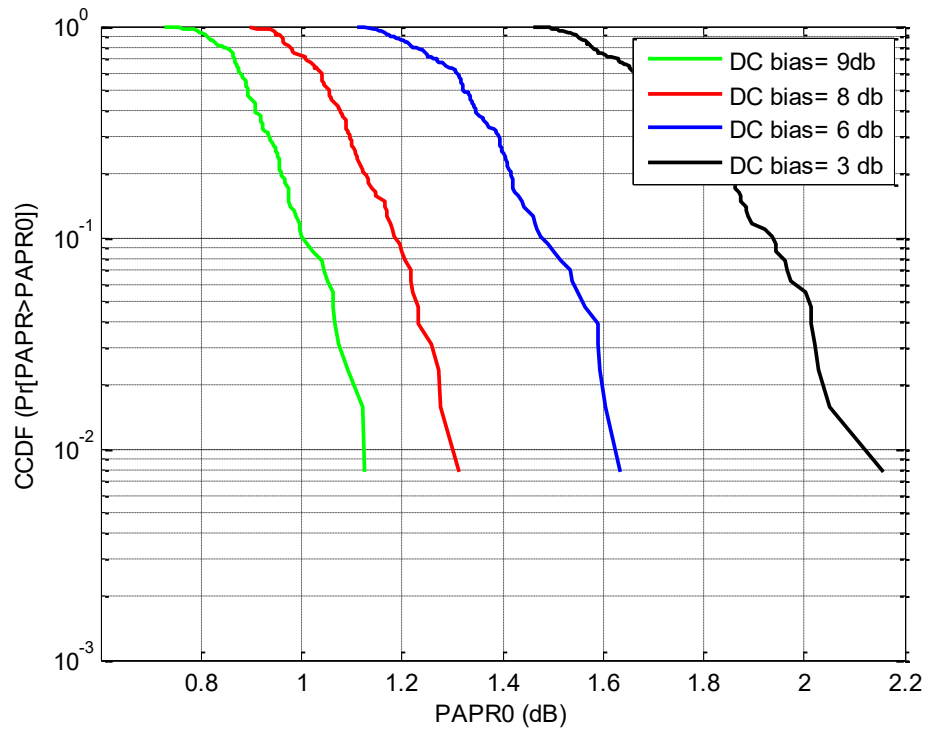


Figure III.9: Représente CCDF du signal DCO-OFDM pour 16-QAM

La courbe montre (III.9) variation de CCDF / PAPR₀(dB)

A titre D'exemple pour CCDF = 10⁻¹. PAPR₀(1db, 1.19db, 1.49db, 1.95db) pour DCbias (3,6,8,9) respectivement.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté de la relation OFDM-VLC et des technologies DCO-OFDM et ACO-OFDM les plus importantes.

Après avoir calculé PAPER, SNR et BER, nous avons découvert l'effet des performances DCbias sur le système DCO-OFDM.

Conclusion générale

Conclusion générale

La modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est un type particulier de transmissions multi-porteuses dont l'originalité est de multiplexer l'information sur des sous-porteuses orthogonales.

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

Plusieurs technologies se concentrent sur l'évolution du système VLC (conclu que la LED et le photo détecteur sont les sources et les détecteurs les plus largement utilisés) ainsi que de nouvelles approches dans la littérature du système basé sur O-OFDM, ce système utilisant l'OFDM traditionnel gagne un débit de données élevé avec robustesse par rapport au canal multivoie. Cependant, nous devons faire face à certaines limitations, à la fois que le signal O-OFDM doit être réel et passif, c'est pourquoi de nombreux modèles OFDM sont conçus pour répondre aux exigences. des fonctions LED telles que DCO-OFDM et ACO-OFDM.

Nous avons discuté de la relation OFDM-VLC et des technologies DCO-OFDM et ACO-OFDM les plus importantes.

Après avoir calculé PAPER, SNR et BER, nous avons découvert l'effet des performances DCbias sur le système DCO-OFDM.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Chang, R. W., "Synthesis of Band Limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission," *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 45, December 1966, pp. 1775–1796.
- [2] Salzberg, B. R., "Performance of an Efficient Parallel Data Transmission System," *IEEE Trans. Communications*, Vol. COM-15, December 1967, pp. 805–813.
- [3] Mosier, R. R., and R. G. Clabaugh, "Kineplex, a Bandwidth Efficient Binary Transmission System," *AIEE Trans.*, Vol. 76, January 1958, pp. 723–728.
- [4] "Orthogonal Frequency Division Multiplexing," U.S. Patent No. 3,488,4555, filed November 14, 1966, issued January 6, 1970.
- [5] Salvatore RAGUSA. « Écrêtage Inversible pour l'Amplification Non-Linéaire des Signaux OFDM dans les Terminaux Mobiles ». Université Joseph Fourier. 16 juin 2016.
- [6] Annick Le Glaunec. « Modulations Multi porteuses ».
- [7] Helmi BEN HNIA, Abdennaceur KACHOURI, Ossama BEN BELGHITH, Lotfi KAMOUN. « Etude des performances de la modulation OFDM pour l'utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4G ». International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, Tunisie, 15-20 Mars 2004.
- [8] Pierre GRUYER, Simon PAILLARD. « Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM », 12 décembre 2005.
- [9] Samir Arab. « Une étude sur la réduction du PAPR dans un système OFDM », Mémoire du grade de Maître et science (M. Se.), Université Laval, Canada, 2010.
- [10] P. Moose, „A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction“, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 42, No. 10, Octobre 1994, pp. 2908 – 2914.
- [11] Eric Phillip LAWREY BE (Hons). "Adaptive Techniques for Multiuser OFDM". Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering Thesis , science School of Engineering, JamesCook University ,December 2001.
- [12] Digital Video Broadcasting (DVB) : Framing structure, channel coding and

Bibliographie

modulation for 11/12 GHz satellite services - Ref. ETSI EN 300 421 v1.1.2, Aug. 1997.

[13] Digital Video Broadcasting (DVB) : Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications - Ref. ETSI EN 302 307 v1.1.1, June 2004.

[14] Digital Video Broadcasting (DVB) : User guiderlines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2) - Ref. ETSI TR 102 376 v1.1.1, Feb. 2005.

[15] R. U.-R. Sm, « Utilisation de la lumière visible pour les communications à large bande », Union Internationale des Télécommunications, 2018.

[16] L. U. Khan, « Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges », Digital Communications and Networks, vol. 3, no 2, p. 78-88, mai 2017.

[17] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, et P. Mohapatra, « Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges », IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 17, no 4, p. 2047-2077, Fourthquarter 2015.

[18] « AASA inc. Li-Fi - Visible Light Communication (VLC) - Light Fidelity (Li-Fi) - LED ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.aasainc.com/vlc.htm>. [Consulté le: 04-févr-2019].

[19] C. Le Bas, « Système de télésurveillance médicale utilisant la technologie de transmission optique sans fil », Université de Limoges, 2017.

[20] C. L. Dizes, O. Coponet, R. Pavec, S. Dorgere, et S. Jeanneteau, « Les enjeux et les opportunités offertes face au Wi-Fi », Institut national des sciences appliquées, Rennes, 2015.

[21] Z. Wang, Q. Wang, W. Huang, et Z. Xu, Visible light communications: modulation and signal processing. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2017.

[21] 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.

[22] P. Goswami et M. K. Shukla, « Design of a Li-Fi Transceiver », Wireless Engineering and Technology, vol. 08, no 04, p. 71-86, 2017.

[23] N. Kumar, « Visible Light Communication Based Traffic Information Broadcasting

Bibliographie

Systems », International Journal of Future Computer and Communication, p. 26-30, 2014.

[24] S. Dimitrov et H. Haas, Principles of LED Light Communications, Cambridge University Press. 2015.

[25] T. Cevik et S. Yilmaz, « An Overview of Visible Light Communication Systems », International journal of Computer Networks & Communications, vol. 7, no 6, p. 139-150, nov. 2015.

[26] M. Uysal, F. Miramirkhani, O. Narmanlioglu, T. Baykas, et E. Panayirci, « IEEE 802.15.7r1 Reference Channel Models for Visible Light Communications », IEEE Communications Magazine, vol. 55, no 1, p. 212-217, janv. 2017.

[27] « IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks–Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light », IEEE Std 802.15.7-2011, p. 1-309, sept. 2011.

[28] A. Boucouvalas, P. Chatzimisios, Z. Ghassemlooy, M. Uysal, et K. Yiannopoulos,

« Standards for indoor Optical Wireless Communications », IEEE Communications Magazine, vol. 53, no 3, p. 24-31, mars 2015.

[29] E. Ramadhani et G. P. Mahardika, « The Technology of LiFi: A Brief Introduction »,

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 325, p. 11, mars 2018.

[30] J. Albà, « Development of embedded transmitter for visible light communication system for indoor environment », Master en science de l'ingénieur et gestion des télécommunications, Université polytechnique de Catalogne, 2014.

[31] J. VERNEZ, « Adaptation de la couche MAC du standard IEEE 802.15.4 à une couche physique Ultra Wide Band », La Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains, Suisse, 2003.

[32] G. Blinowski et K. Szczypiorski, « Steganography in VLC Systems », p. 25, 2017.

[22] C. Medina, M. Zambrano, et K. Navarro, « LED BASED VISIBLE LIGHT COMMUNICATION: TECHNOLOGY, APPLICATIONS AND CHALLENGES – A SURVEY », vol. 8, no 4, p. 15, 2015.

Bibliographie

- [33] 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.
- [34] « 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].
- [35] « 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].
- [36] J. Armstrong, “OFDM for Optical Communications,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 189–204, Feb. 2009.
- [37] D. Tsonev, S. Sinanovic, and H. Haas, “Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for Optical Wireless,” in *Proc. of the Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, IEEE, Yokohama, Japan: IEEE, May 6–9 2012.
- [38] J. Armstrong and B. J. C. Schmidt, “Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN,” *IEEE Communication Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 343–345, May 2008.