

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 8 mai 1945 – Guelma

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electronique et télécommunications



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de master g académique

Domaine : **Sciences et technologie**

Filière : **Télécommunications**

Spécialité : **Réseaux et Télécommunications**

*Etude et implémentation des formes
d'ondes multi-porteuses candidates
pour la 5G*

Présenté par :

Boufeken Houđa

Sous la direction de :

Dr. Boukharouba Abdelhak

2022

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

Remerciement

Je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la force et m'accordé la patience pour achever ce travail.

Je voudrais exprimer, avec ce travail humble, ma gratitude, ainsi que mes sincères remerciements à « M. Boukharouba Abdelhak » pour sa proposition, son suivi et sa correction, et pour veiller à ce que ce travail soit achevé.

Je voudrai également remercier les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarque et critiques.

Je tiens aussi à remercier monsieur le chef département de télécommunication de l'université de Guelma.

Je voudrais bien remercier la famille universitaire de en particulier tous les professeurs qui nous ont fourni la meilleure formation pendant notre étude.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mes frères qui m'ont accompagné pendant mes études, à ma famille, à mes amis et à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à ce travail.

Merci à tous

Dédicace

Tous les mots ne peuvent exprimer la gratitude, l'amour, le respect et l'appréciation que
j'ai, dédiés simplement ce souvenir

A mes chers parents

Grâce à leurs encouragements bienveillants et à leurs grands sacrifices, ils ont su créer une
atmosphère affectueuse propice à la poursuite de mes études, aucune dévotion ne pouvant
exprimer mon respect, ma reconnaissance et mes sentiments profonds à leur égard. Je prie
pour les bénir, les réveiller, dans l'espoir qu'ils seront toujours fiers de moi.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

Ma deuxième maman khaira est bonne.

Merci pour vos conseils et vos prières, vous n'arrêtez pas de m'encourager

Sans toi rien n'aurait été possible

Aucune dévotion ne peut exprimer mon amour, mon respect et ma dévotion mon respect
pour toi

A mes chers frères et leur femme, que Dieu vous accorde santé et longue vie, en particulier
mon frère Khaled

A ma famille, mes amis (doudou, Lina, Amina, Roumaïssa,) et tous ceux qui ont
contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



HOUDA

Résumé

Résumé

La technique de transmission multi porteuses OFDM utilisée dans la 4G souffre de plusieurs inconvénients qui empêchent son utilisation dans un contexte de réseaux mobiles 5G. une technique multi-porteuse à base de bancs de filtres (FBMC) a été proposée comme une alternative permettant d'offrir quelques avantages par rapport à l'OFDM. Un des principaux avantages est l'amélioration de l'efficacité spectrale grâce à l'absence du préfixe cyclique (CP) et aux formes d'onde bien localisées en temps et en fréquence, la FBMC utilise un schéma de modulation différent et un filtre prototype pour conserver les avantages de l'OFDM et améliorer ses points faibles.

L'objectif de ce mémoire est d'analyser les performances d'une transmission sans fil via la technique multi porteuse FBMC, et comparer les résultats obtenus avec la technique classique OFDM. Dans ce travail, nous commençons par les exigences de la 5ème génération (5G). Ensuite, nous entamons les modulations multi-porteuses OFDM et FBMC. En fin, une comparaison basée sur le BER entre OFDM et FBMC-OQAM est effectuée. Les différents résultats ont été simulés sous logiciel MATLAB.

Mots clés : 5G, OFDM, FBMC, OQAM

Abstract

The OFDM Multi-Carrier transmission technique used in 4G suffers from several drawbacks that prevent its use in the context of 5G mobile networks. A multicarrier technique based on filter banks (FBMC) has been proposed as an alternative allowing to offer some advantages compared to OFDM. One of the main advantages is the improvement of the spectral efficiency thanks to the absence of the cyclic prefix (CP) and to the waveforms well localized in time and frequency, FBMC uses a different modulation scheme and a prototype filter to retain the advantages of OFDM and improve its shortcomings.

The objective of this thesis is to analyze the performances of a wireless transmission via the FBMC multi-carrier technique, and to compare the results obtained with the classic OFDM technique. In this work, we start with the 5th generation (5G) requirements. Then we start the OFDM and FBMC multi-carrier modulations. Finally, a BER-based comparison between OFDM and FBMC-OQAM is performed. The different results were simulated using MATLAB software.

Keywords : 5G, OFDM, FBMC, OQAM

Table des matières :

Remerciements

Dédicace

Résumé

Table des matières I

Liste des figures IV

Liste de tableaux VII

Listes des abréviations VIII

Introduction générale 1

CHAPITRE I : Introduction à la 5^{ème} génération

Table des matières

I.1. Introductions	4
I.2. Évolution des réseaux mobiles	4
I.2.1. Première génération 1G	5
I.2.2. Deuxième génération 2G	5
I.2.3. Troisième génération 3G	5
I.2.4. Quatrième génération 4G	6
I.2.4.1. Définition de la 4 ^{ème} génération	6
I.2.4.2. Architecture de la 4G	6
I.3. Cinquième génération 5G	7
I.3.1. Architecture de la 5G	7
I.3.2. Objectif de la 5G	7
I.3.3. Applications de la 5G	8
I.4. Comparaison entre les différentes générations	9
I.5. Conséquences de la 5G pour les opérateurs mobiles	10
I.6. Avantages de la 5G	11
I.7. Défis de la 5G	12
I.8. Formats d'ondes proposition pour la 5G	12
I.8.1. OFDM	12
I.8.2. FBMC	13
I.8.3. UFMC	13
I.8.4. GFDM	13
I.9. Conclusion	13

CHAPITRE II : Les formes de modulation multi-porteuses de 5G

II.1. Introduction	15
II.2. Canaux de transmission	15
II.2.1. Canal à bruit additif blanc gaussien	15
II.2.2. Canal à trajet multiples	16
II.3. Modulation OFDM	16
II.3.1. Définition	17
II.3.2. Principes de fonctionnement de l'OFDM	17
II.3.2.1. Modulation	19
II.3.2.2. Démodulation	20

Table des matières

II.3.2.3. Modulation QAM	21
II.3.2.4. Orthogonalité	22
II.3.2.5. Intervalles de gardes	23
II.3.2.6. Préfix cyclique	24
II.3.2.7. Problème des interférences	24
II.3.2.7.1. Interférence entre symboles (ISI)	25
II.3.2.7.2. Interférence entre sous porteuse (ICI)	25
II.4. Avantages et inconvénients de l'OFDM	27
II.4.1. Avantages	27
II.4.2. Inconvénients	28
II.5. Modulation FBMC	28
II.5.1. L'analyse et synthèse par les bancs de filtre	29
II.5.2. Filtre prototype	31
II.5.3. Modulation multi porteuses à base de filtre prototype PHYDAS	31
II.5.3.1. Méthode la FMT	34
II.5.3.2. Méthode la OQAM SMT	36
II.6. Implémentation efficace de FBMC / OQAM à base de filtre polyphasé	40
II.7. Différences majeures entre OFDM et FBMC	43
II.8. Avantages et inconvénients de FBMC	45
II.8.1. Avantages	45
II.8.2. Inconvénients	45
II.9. Conclusion	45
CHAPITRE III : Résultats et simulation	
III.1. Introduction	48
III.2. Logiciel de simulation	48
III.2.1. MATLAB	48
III.3. Définition des paramètres de mesure de la performance d'un système	50
III.3.1. Taux d'erreurs binaires	50
III.3.2. Le rapport signal à bruit	50
III.3.3. Densité spectrale (DSP)	51
III.4. Résultat de simulation du filtre prototype	51
III.4.1. Influence du paramétré K sur la conception du filtre	51
III.4.2. Comparaison du filtre OFDM avec le filtre prototype FBMC	53
III.5. Densité spectrale de puissance	55

Table des matières

III.6. Comparaison de BER pour trois choix du nombre de porteuse M	56
III.6.1. Résultats des simulations pour AWGN	56
III.6.2. Résultats des simulations pour un canal de type Rayleigh	59
III.7. Conclusion	59
Conclusion général	61
Bibliographe	63

Liste des figures

Liste des figures :

Figure I.1 : Évolution des réseaux mobiles	4
Figure I.2 : Architecture de la 4G	6
Figure I.3 : Architecture de 5G	7
Figure I.4 : Applications du réseau 5G	9
Figure II.1 : Canal à bruit additif	15
Figure II.2 : Schéma de principe des trajets multiple	17
Figure II.3 : Schéma bloc simplifié d'un émetteur-récepteur OFDM	18
Figure II.4 : Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM	19
Figure II.5 : La modulation OFDM	20
Figure II.6 : La démodulation OFDM	21
Figure II.7 : Exemple de constellation pour une modulation en 16-QAM	22
Figure II.8 : Sinusoïdes orthogonales	23
Figure II.9 : Les sous porteuses orthogonales du signal OFDM	23
Figure II.10 : Préfixe cyclique	24
Figure II.11 : Insertion du préfixe	25
Figure II.12 : Interférence entre porteuses : (a) domaine temporel, (b) domaine fréquentiel ...	27
Figure II.13 : Un émetteur-récepteur générique à porteuse multiples avec des bancs de Filtres	28
Figure II.14 : L'analyse et la synthèse par les bancs de filtres	31
Figure II.15 : Réponse d'impulsion de filtre de prototype. ($K = 4$, sous-porteuses = 16)	33
Figure II.16 : Schéma synoptique d'une transmission FBMC	34
Figure II.17 : Répartition en fréquence de la FMT sans chevauchement	34

Liste des figures

Figure II.18 : Une chaine de transmission à base de la modulation FMT-FBMC	35
Figure II.19 : Répartition en fréquence de la SMT avec chevauchement	36
Figure II.20 : Le diagramme l'équivalent d'un système OQAM / FBMC en bande de base ...	39
Figure II.21 : Interférence inter Symbole (ISI) de la modulation OQAM	40
Figure II.22 : Interférence inter Porteuse (ICI) de la modulation OQAM	40
Figure II.23 : L'implémentation efficace de FBMC /OQAM bancs de filtres	42
Figure II.24 : Déférence entre l'OFDM et le FBMC	43
Figure II.25 : Comparaison en fréquence de l'OFDM et FBMC	44
Figure III.1 : LOGO de Matlab	48
Figure III.2 : Interface Matlab	49
Figure III.3 : Repense impulsionnelle de filtre prototype PHYDYAS $K=4$	51
Figure III.4 : Repense impulsionnelle de filtre prototype PHYDYAS en variation de K	52
Figure III.5 : Repense d'amplitude de filtre de la FBMC et OFDM	53
Figure III.6 : trois sous-porteuses FBMC ($K=4$)	54
Figure III.7 : trois sous-porteuses OFDM	54
Figure III.8 : La densité spectrale de puissance pour FBMC et OFDM	55
Figure III.9 : La densité spectrale de puissance OFDM	56
Figure III.10 : BER d'un système FBMC-OQAM pour différentes valeurs de K , une modulation QPSK et $M=256$	57
Figure III.11 : BER d'un système FBMC-OQAM pour une modulation QPSK et $K=2$	57
Figure III.12 : BER d'un système FBMC-OQAM pour une modulation QPSK et $K=4$	58
Figure III.13 : BER d'un système de type OFDM pour 64 porteuses et deux type de modulation 16-QAM et BPSK	58
Figure III.14 : BER d'un système de type OFDM sur canal de type Rayleigh	59

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

Tableau I.1 Performances du réseau 5G ciblées par le projet IMT-2020	8
Tableau I.2: Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobile	10
Tableau II.1 : Illustration du gain apporté par la modulation QAM	22
Tableau II.2 : Comparaison entre OFDM et FBMC	45

Liste des abréviations

Liste des abréviations :

1G : La première génération du réseau mobile.

2G : La deuxième génération du réseau mobile.

3G : La troisième génération de réseaux mobiles.

4G : La quatrième génération des téléphones mobiles.

5G : La Cinquième génération des téléphones mobiles.

A

ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line

C

CDMA : Code Division Multiple Access

CP : Cyclic Préfix.

CP-OFDM : Cyclic Préfix OFDM

CS : Compressive Sensing.

E

EDGE : Enhanced Data Rates for GSM Evolution

F

FBMC : Filter Bank Multi Carrier

FDM : Frequency Division Multiplexing.

FDMA : Frequency Division Multiple Access.

FFT : Fast Fourier Transform

FIR : Finité Impulse Réponse.

G

Liste des abréviations

GFDM : Generalized Frequency Division Multiplexing

GPRS : General Packet Radio Service.

GSM : The Global System for Mobile Communications

I

ICI : Inter Code Interférences.

IEP : Interférence Entre Porteuse

IFFT : Inverse Fast Fourier Transform.

IMT : International Mobile Télécommunications.

IoT : Internet of Things.

IP : Internet Protocol.

ISI : Inter Symbol Interférences.

L

LTE : Long Term Evolution.

LTE-A : Long Term Evolution Advanced.

M

MATLAB : Matrix Laboratory.

O

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA : Orthogonal Frequency Division Multiple Access.

OQAM : Offset Quadrature Amplitude Modulation

P

PAM : Pulse Amplitude Modulation

PAPR : Peak to Average Power Ratio.

PPN : Polyphasé Network

Liste des abréviations

PSK : Phase Shift Keying.

PHYDAS : Physical layer for Dynamic Access

Q

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

S

SC : Suffixe Cyclique.

SC-FDMA : Signal Carrier- Frequency Division Multiple Access

SMT : Staggered Modulated Multitone

T

TDMA : Time Division Multiple Access.

U

UFMC : Universal Filtered Multi Carrier

V

VDSL : Very –high-bit-rate Digital Subscriber Line

VOIP : Voice Over IP.

VOLTE : Voice Over Long Term Evolution.

VSB : Vestigial Sidé Band.



Introduction

Générale



Introduction générale

Un réseau cellulaire ou réseau mobile est un réseau de communication qui est réparti sur des zones terrestres appelées cellules, chacune dotée par au moins un émetteur et un récepteur.

Les réseaux mobiles ont évolué à travers une série de générations, chacune représentant améliorations technologiques importantes par rapport aux générations précédentes. Les deux premières générations des réseaux mobiles ont d'abord introduit la voix analogique (1G) puis la voix numérique (2G). Les subséquentes générations ont soutenu la prolifération des smartphones en introduisant les connexions de données (3G) et permettant l'accès à Internet. Les réseaux de service 4G ont amélioré les connexions de données, les rendant plus rapide, meilleur et capable d'assurer une bande passante plus large pour différentes utilisations telles que le streaming.

Aujourd'hui, la technologie mobile de 5eme génération (5G) est une nouvelle révolution du marché mobile qui va changer les moyens d'utiliser les téléphones portables. L'utilisateur n'a jamais expérimenté une telle technologie de grande valeur qui comprend tous les types de fonctionnalités avancées qui seront les plus puissantes et les plus demandées dans les années à venir.

Le développement du paradigme d'une nouvelle génération d'infrastructure de réseau devient une référence dans la compétition mondiale pour le leadership technologique. Au cours des prochaines années, une alliance public-privé partagera un savoir-faire et des compétences pour relever les défis et de créer des modèles et des normes pour la nouvelle technologie. Parmi les solutions étudiées pour répondre aux contraintes de débit, on trouve les modulations multi-porteuses OFDM et FBMC. La technique OFDM est la modulation multi-porteuse la plus utilisée dans la majorité des systèmes de communications sans fil grâce à ces nombreuses propriétés tels que :

- ❖ L'utilisation efficace du spectre grâce à l'utilisation de porteuses mutuellement orthogonales.
- ❖ Une simple implémentation numérique grâce à l'utilisation de l'algorithme de la transformée de Fourier rapide et son inverse (IFFT/FFT).

L'insertion du préfixe cyclique (CP) donne une grande capacité pour combattre les interférences entre symboles (IES) et

- ❖ Entre porteuses (IEP).

Introduction générale

Malgré que la modulation OFDM présente plusieurs avantages, cette technique présente l'inconvénient des remontées spectrales hors bande et des pertes au niveau de la bande passante introduite par le préfixe cyclique. En plus, l'OFDM est très sensible aux effets de synchronisation. Ces inconvénients, ont poussé les chercheurs à développer de nouvelles techniques de transmission à base de banc de filtre afin de combattre ces limites. L'FBMC-OQAM (Filter Banc Multi-Carrier Modulation - Offset Quadrature Amplitude Modulation) remplace les modulations OFDM grâce à sa réponse impulsionnelle bien localisé en temporelle. Ainsi, cette technique offre une meilleure efficacité spectrale puisque aucun intervalle de garde n'est introduit. En outre, les formes d'ondes à banc de filtre présentent des remontés spectrale hors bande faible par rapport à l'OFDM

Le travail présenté dans ce mémoire est subdivisé en trois chapitres.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une étude générale de la nouvelle technologie de réseaux mobile de 5ème génération. Dans ce contexte nous présentons un historique de l'évolution des réseaux mobile jusqu'à l'arrivée de la 5G. La comparaison entre les différentes générations, leurs architectures et leurs objectifs sont aussi détaillés tout en citant les formes d'ondes proposition pour la 5G.

Le deuxième chapitre va présenter les canaux de transmission (Canal à bruit additif blanc gaussien, Canal à trajet multiples) et les différentes variantes de la modulation multi-porteuses telles que l'OFDM et le FBMC. L'OFDM utilise la modulation QAM usuelle alors que le FBMC utilise la modulation OQAM (Offset Quadrature Amplitude Modulation). La modulation FBMC/OQAM réalise une mise en forme du signal modulé par l'utilisation d'un filtre diète prototype et sous sa forme conventionnelle ne nécessite pas l'utilisation d'un CP.

Le troisième chapitre est divisé en deux parties. La première partie traite la simulation du système OQAM-FBMC et aussi présente l'influence de type du canal sur le SNR. Notre travail est terminé par une conclusion générale.



Chapitre I

Introduction à la

5^{ème} génération



I.1. Introduction :

Le besoin d'une connectivité mobile à grande échelle sur différents appareils et diverses applications dicte le besoin d'une technologie mobile de nouvelle génération (5G) pour répondre aux demandes futures.

Pour pouvoir optimiser la prochaine génération de la 5G, une approche d'attribution et de gestion du spectre axée sur une utilisation efficace et efficiente des ressources est nécessaire. par conséquent, de nouveaux mécanismes sont proposés pour améliorer la qualité de service et les performances afin d'intégrer de nouveaux services.

Dans ce chapitre on va présenter l'évolution des générations Web mobiles, en nous concentrant sur la cinquième génération. Nous commençons par une simple comparaison de ses performances avec l'autre génération, en discutant quelques formes d'onde telles que : OFDM, FBMC et UFMC, GFDM.

I.2. Evolution des systèmes cellulaires :

Les réseaux mobiles et sans fil ont connu un essor sans précédent ces dernières années, nous allons présenter leur évolution de la 1G jusqu'à la 5G.

Figure (I.1) représente l'évolution des réseaux mobiles.



Figure I.1 : Évolution des réseaux mobiles [3].

La première génération de téléphones mobiles est apparue au début des années 1980, offrant des services de communication mobile médiocres et très coûteux. La 1G présente de nombreux défauts tels que des normes incompatibles d'une région à l'autre, une transmission analogique non sécurisée (pouvoir écouter les appels), pas de roaming international (le roaming est la possibilité de conserver son numéro sur la capacité réseau d'un autre opérateur) [1].

Les différents problèmes avec 1G sont :

- ❖ Capacité limitée car le système est basé sur FDMA.
- ❖ Particulièrement limité aux réseaux de différents fournisseurs.
- ❖ Fraude, manque de sécurité.

I.2.1 Deuxième génération 2G :

La deuxième génération (2G) de systèmes cellulaires repose sur une technologie numérique. Ces systèmes cellulaires utilisent une technologie numérique pour la liaison ainsi que pour le signal vocal. Ce système apporte une meilleure qualité ainsi qu'une plus grande capacité à moindre coût pour l'utilisateur.

La deuxième génération de Systèmes cellulaires (2G) utilise essentiellement les standards suivants :

- ✓ GSM
- ✓ CDMA
- ✓ TDMA
- ✓ GPRS (2.5G) ,2.5G est un système mobile intermédiaire entre la 2G et la 3G (débits Inférieurs à 100 kbits /s).
- ✓ EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution ,2.75 G) [2].

I.2.2 Troisième génération 3G :

Les réseaux 3G (pour les réseaux mobiles de 3ème génération) et leur évolution (3G, H) offrent un débit bien supérieur aux réseaux 2G. Le téléchargement de données est plus efficace et la navigation sur Internet est plus confortable. Vous pouvez facilement utiliser toutes les applications, envoyer et recevoir des e-mails avec pièces jointes et même regarder des vidéos en définition standard. Le réseau dérivé de la 3G permet un débit maximal théorique allant jusqu'à 42 Mbit/s [4].

I.2.3 Quatrième génération ou 4G :

I.2.3.1 Définitions de 4G :

C'est la génération des téléphones mobiles (et parfois fixes) après la 2G et la 3G. Il permet de se déplacer à des débits très élevés (débit théorique 150 Mbit/s par cellule, voire plus) et permet également un accès à plusieurs réseaux simultanément. L'une des caractéristiques de la 4G est d'avoir un réseau central IP uniquement, qui est l'Evolved Packet Core, qui cherche à simplifier l'architecture, plutôt que d'avoir un cœur de réseau qui gère à la fois les domaines des circuits et des paquets comme les générations précédentes. La voix peut être transmise via VOIP (ou VOLTE, Voice over LTE). Il est également possible de permettre aux utilisateurs de passer des appels en circuit sur les réseaux 2G/3G (CS Fallback) [5].

I.2.4.2. Architecture de la 4G :

Les réseaux LTE sont des réseaux cellulaires constitués de milliers de cellules radio qui utilisent les mêmes fréquences hertziennes, y compris dans les cellules radio mitoyennes, grâce aux codages radio OFDMA et SC-FDMA. La figure (I.2) présente l'architecture du réseau LTE.

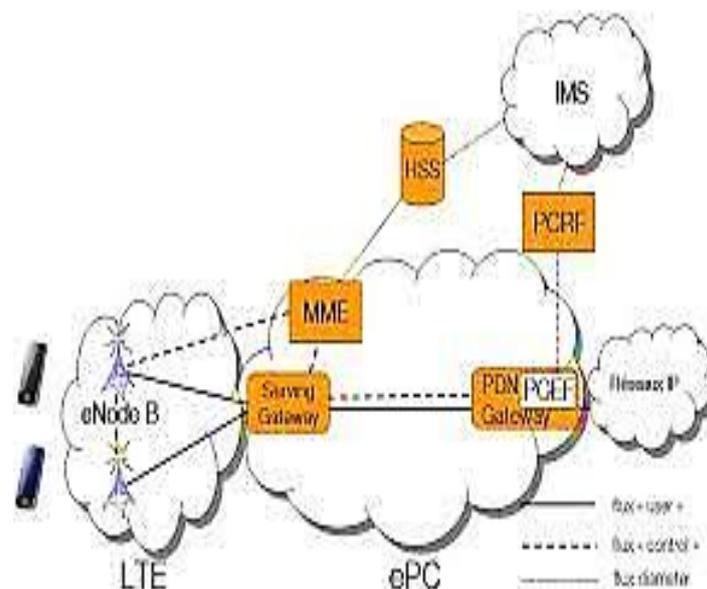


Figure I.2 : Architecture de la 4G.

I.3. Cinquième génération 5G :

I.3.1 Définitions de la 5G :

La 5G n'est pas une amélioration par rapport aux normes de télécommunications précédentes, mais une innovation de rupture qui va révolutionner l'industrie des télécommunications et potentiellement révolutionner le modèle économique prévalant chez les opérateurs [6].

L'arrivée de cette génération pourrait avoir un impact majeur sur la qualité de service, apportant des améliorations, notamment des capacités cellulaires plus élevées et des débits supérieurs à 1Gbps. La technologie est utilisée dans diverses applications telles que l'internet industriel des objets (IoT), les villes intelligentes et les réseaux intelligents.

I.3.2 Architecture de la 5G :

Un réseau 5G est composé de trois couches principales, « Services innovants », «la plateforme d'activation » et «la radio hyperconnectée », nous les décrivons avec quelques détails [7].

La figure (I.3) représente l'architecture de 5G

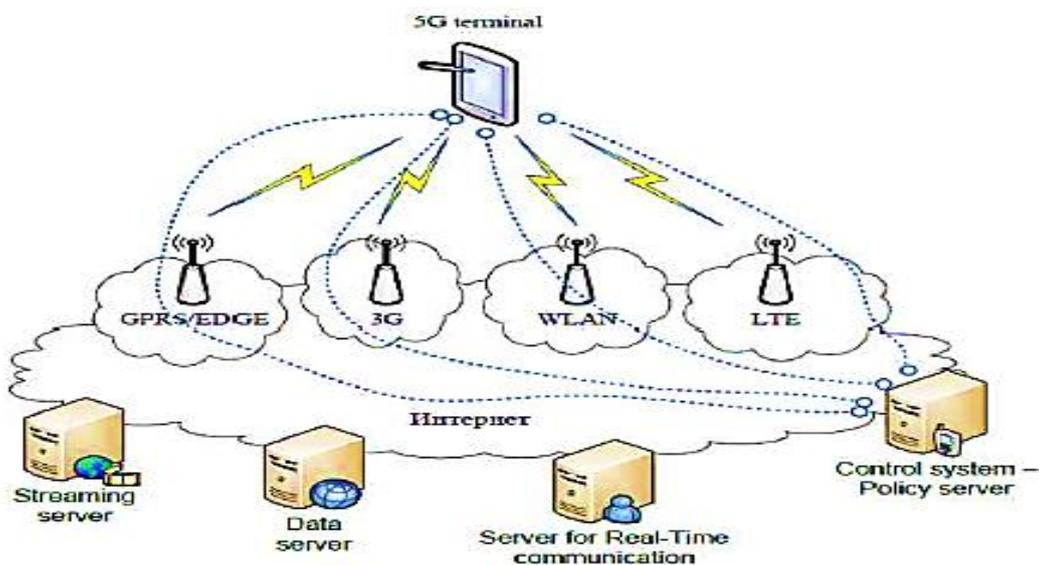


Figure I.3 : Architecture de 5G.

I.3.3 Les objectifs du standard 5G :

Le nouveau système de communication 5G promet un accès illimité à l'information, le support de technologies sans fil très performants et l'introduction de services commerciaux innovants. Le tableau I-1 décrit les performances ciblées par le futur standard et qui sont définies dans le

projet IMT-2020 [4]. On note une augmentation considérable du débit montant et descendant et des bandes passantes pouvant atteindre 1 GHz.

Un objectif ultime de la 5G est la convergence des réseaux existants. Le réseau 5G sera un réseau hétérogène supportant une multitude de standards et permettant la configuration et la gestion automatique de nouveaux services. Un autre objectif du standard est la réduction de la consommation énergétique du système global. Cette réduction sera le résultat de l'usage extensif des outils logiciels pour l'implémentation des fonctions réseau ou pour la création et la gestion des services applicatifs [8].

Le tableau (I.1) représente les performances du réseau 5G ciblées par le projet IMT-2020

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Débit maximum descendant</i>	20 Gbits/s
<i>Débit maximum ascendant</i>	10 Gbits/s
<i>Efficacité spectrale maximale dans le sens descendant</i>	30 bit/s/Hz
<i>Efficacité spectrale maximale dans le sens ascendant</i>	15 bit/s/Hz
<i>Trafic par unité de surface</i>	10 Mbit/s/m ²
<i>Temps de latence</i>	1 – 4 ms
<i>Densité de terminaux connectés</i>	1 million/km ²
<i>Largeur de bande</i>	100MHz– 1 GHz

Tableau (I.1) : Performances du réseau 5G ciblées par le projet IMT-2020 [8].

I.3.4 Applications du réseau 5G :

Le réseau 5G, contrairement aux réseaux mobiles actuels, ne sera pas axé prioritairement sur la téléphonie. Cette particularité est un challenge et fera la force de celle-ci. En effet on peut identifier plusieurs applications majeures auxquelles devra servir le réseau 5G :

- ✚ La ville intelligente (smart-city) dont l'infrastructure pourrait être gérée plus efficacement tout en optimisant sa consommation de ressources grâce à des réseaux de capteurs complexes.
- ✚ La maison connectée qui grâce à des capteurs et à la domotique pourra être gérée, notamment en termes de ressources, et utilisée facilement et efficacement ou encore sécurisée à distance.

- ✚ Les transports connectés, avec notamment l'avènement des voitures autonomes, qui permettra de sécuriser et d'optimiser le réseau routier.
- ✚ La santé connectée avec des innovations majeures telles que la chirurgie à distance des patients et personnes à risques.

La figure (I.4) représente les différentes applications du réseau 5 G.

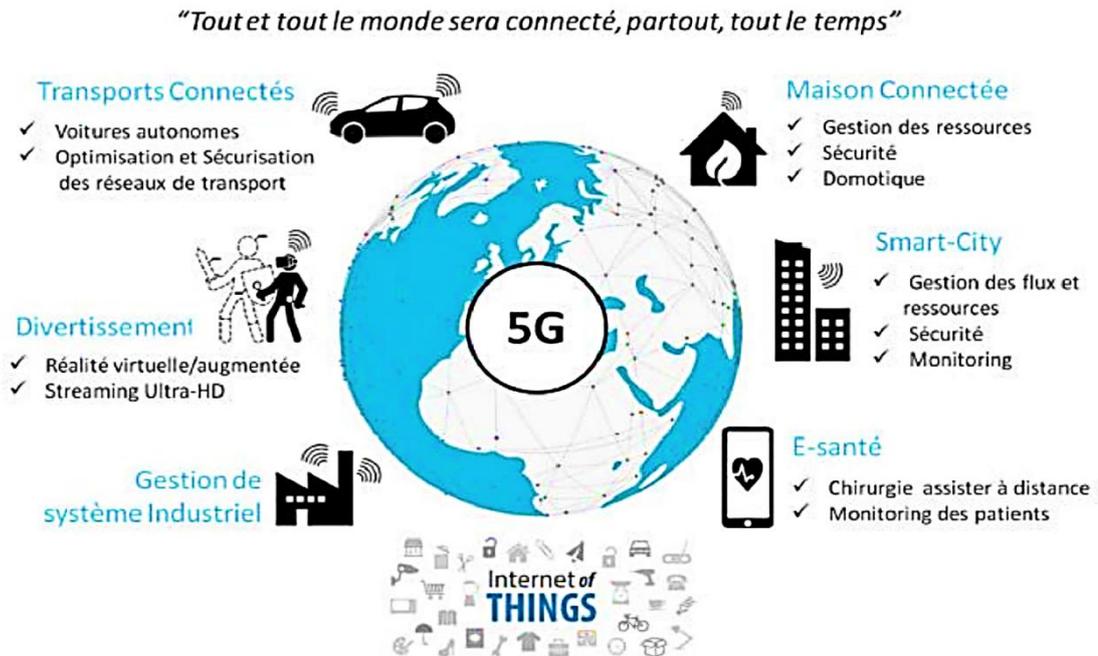


Figure I.4 : Applications du réseau 5G [3].

D'autres applications moins révolutionnaires mais tout aussi majeures sont à prévoir dans les domaines de l'industrie, la logistique et la sécurité. Le divertissement reste une source d'applications futures orientées vers l'utilisateur telles que la réalité virtuelle, le jeu en réseau, le streaming vidéo en ultra haute définition, la télévision interactive en haute définition et de nombreuses applications auxquelles nous ne pensons pas encore devraient voir le jour [9].

I.4. Comparaison entre les différentes générations

Avec la 5G sur le point d'arriver, en s'intéressant aux différences qu'elle présente par rapport à la 4G ce qui fera une différence significative dans le monde de la technologie, sera pouvoir fournir :

- ✚ L'augmentation de l'efficacité énergétique.
- ✚ Une connexion stable même en mobilité.
- ✚ Un réseau haut performances, capable de fonctionner en temps réel, avec des exigences élevées en matière de fiabilité.

Le tableau (I.2) résume les caractéristiques de la 5G et celles qui sont actuellement disponibles avec la 4G, 3G, 2G et 1G [10].

<i>Période</i>	<i>Années 1980</i>	<i>Années 1990</i>	<i>Années 2000</i>	<i>Années 2010</i>	<i>Années 2020</i>
<i>Génération de mobile</i>	1G	2G	3G	4G	5G
<i>Objet de la transmission</i>	Voix (Téléphone mobile)	Voix et texte (Voix numérique, message courte de capacité supérieure en paquets)	Données mobiles (Audio, vidéo, données intégrées de haute qualité)	Mobile à large Bande (accès dynamique aux informations sur les appareils portables, streaming HD)	Tous typés de transferts (accès dynamique aux informations sur les appareils portables, streaming HD toute demande des utilisateurs)
<i>Débit maximal</i>	171.2 kbit/s	9.6 kbit/s	1.9 Mbit/s	1 Gbit/s	20 Gbit/s
<i>Vitesse</i>	/	/	/	350	500
<i>Efficacité énergétique du réseau</i>	/	/	/	1x	100x
<i>Débit sur une zone</i>	/	/	/	0.1(Mbit/s/m ²)	10(Mbit/s/m ²)
<i>Bande passante de donnée</i>	2 kbqs	14.4 - 64kbqs	2 Mbqs	2 Mbqs à 1 Gbqs	1 Gbqs et plus selon le besoin
<i>La Bande de fréquences</i>	150MHz	1.8 GHz	2 GHz	2 à 8 GHz	3 à 300 GHz
<i>Accès multiple</i>	FDMA	TDMA/CDMA	CDMA	OFDM	FBMC/OFDM
<i>Les technologies</i>	Analogique	Numérique	Large bande passante CELA technologie IP	IP, intégration transparente des réseaux LAN/WAN/PAN et WAN à large bande	IP, intégration transparente des réseaux LAN/WAN/PAN et WAN à large bande et technologies avancées basées sur modulation OFDM utiliser en 5G
<i>Exemples de technologies utilisées</i>	NMT, AMIS, TACS	GSM, IS-95, D-AMPS	W-CDMA, UMTS, CDMA1x, EV-DO	LTE	IMT 2020

Tableau (I.2) : Comparaisons entre les caractéristiques des différentes générations mobiles.

I.5. Conséquences de la 5G pour les opérateurs mobiles :

- ✚ La 5G reste une technologie cellulaire à haut débit et constitue un réseau de réseaux. L'expertise et le savoir-faire des opérateurs de réseau mobile en matière de construction et d'exploitation des réseaux seront essentiels pour la réussite de la 5G.
- ✚ En dehors de la fourniture de services réseau, les opérateurs mobiles seront capables de développer et d'opérer de nouveaux services IoT.
- ✚ La mise en place de réseaux 5G tout en gardant opérationnels les réseaux 3G et 4G constituera certainement un nouveau défi pour les opérateurs quant à la capacité des fréquences sur le spectre (surtout si l'énorme volume prévu sur l'IoT se concrétise). Les opérateurs mobiles (MNO) devront faire la demande, puis exploiter un nouveau spectre.
- ✚ Sur la gamme de fréquence 6 à 300 GHz, ce qui implique d'énormes investissements dans l'infrastructure des réseaux.
- ✚ Pour atteindre l'objectif d'une latence de 1ms, les réseaux 5G impliquent une connectivité pour la station de base à l'aide de fibre optique.
- ✚ Côté économie, les réseaux 5G devraient pouvoir prendre en charge les réseaux virtuels tels que les réseaux LPLT (Low Power Low Throughput) pour l'IoT de faible puissance [14].

I.6. Les avantages de la 5G :

Pour comprendre l'intérêt de la 5G, il y a trois mots importants à retenir : Débit, Latence et Densité.

- **Le Débit :** la 5G va permettre d'obtenir des vitesses de connexion à internet beaucoup plus rapides qu'en 4G. Le débit de la 5G sera jusqu'à 10 fois plus rapide que le débit en 4G. Elle doit permettre d'atteindre jusqu'à 1 Gb/s de débit en réception (300Mb/s en émission). Bien évidemment, il s'agit d'un débit théorique.
- **La Latence :** c'est l'autre énorme avantage de la 5G. La latence, c'est le temps de réaction entre le moment où l'on passe une commande et le moment où elle se traduit à

l'écran avec la 5G, elle passerait de 10 à 1 ms. Cette réactivité est cruciale pour certaines applications de 5G.

En effet, des échanges constants et quasi-immédiats sont requis pour faire émerger de nouveaux usages.

- **La Densité :** c'est dernière promesse majeure de la 5G. L'ultra connectivité permet une plus grande densité d'appareils connectés au km^2 . Au minimum, la 5G pourra supporter 1 million d'appareils par km^2 , soit une densité de connexion multipliée par 10 [14].

I.7. Défis de la 5G :

Le déploiement des réseaux mobiles actuels est essentiellement basé sur l'utilisation de stations de base dites « macro » ; des sites dotés d'antennes de forte puissance sont installés pour garantir la couverture d'une zone relativement large, avec une qualité de service suffisante. L'architecture du réseau est en constante évolution : de nouvelles stations radioélectriques sont régulièrement installées afin d'augmenter la capacité des réseaux en vue de mieux répondre aux préoccupations des utilisateurs, en ce qui concerne la couverture indoor et outdoor ainsi que la qualité de service. Néanmoins, l'augmentation continue des demandes capacitaires impose aux opérateurs, déjà aujourd'hui, de densifier leurs réseaux avec des cellules toujours plus petites. La 5G, qui verra encore probablement une forte augmentation des volumes de données échangés, et qui utilisera des bandes millimétriques, aux faibles capacités de propagation, nécessitera probablement la généralisation de la mise en place d'émetteurs radioélectriques de faible puissance (small-cells). Des estimations évoquent, pour satisfaire la demande et permettre l'introduction de la 5G, un nombre d'au moins 10 small-cells par site macro en milieu urbain, milieu dans lequel les cellules sont déjà relativement resserrées pour faire face à la densité des usages [12].

I.8. Les formats d'ondes proposition pour la 5G :

Bien que l'OFDM nécessite l'utilisation d'un préfixe cyclique mais il a eu un grand succès et présente encore de nombreux avantages. Maintenant que la 5G est étudiée, il y a une excellente opportunité de considérer les formes d'onde optimales qui serrent utiliser jusqu'à au moins 2040.

I.8.1. OFDM :

La technique de modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une évolution des techniques de multiplexage par Répartition en fréquence (FDM), elle se repose sur l'utilisation des formes d'impulsions orthogonales pour multiplier les données dans le domaine fréquentiel. L'OFDM n'a pas été utilisée dans une application adressée vers les consommateurs avant la fin des années 1980 et après le déploiement de la ligne numérique d'abonné asymétrique (ADSL), la modulation OFDM a été utilisée dans les applications sans fil avec le Wifi (Wireless Fidelity) et LTE.

I.8.2. FBMC :

FBMC signifie Filtre-Bank Multi-Carrier. Son principe de base est de diviser le spectre de fréquence en plusieurs sous-porteuses qui sont très étroites et les filtrer individuellement, il est capable de fournir un très haut niveau d'efficacité spectrale.

I.8.3. UFMC :

Il diffère de FBMC, au lieu de filtrer chaque sous-porteuse individuellement, UFMC divise le signal en un certain nombre de sous-bandes qu'il filtrera. Ensuite, on peut l'utiliser pour améliorer la protection contre les interférences entre symboles.

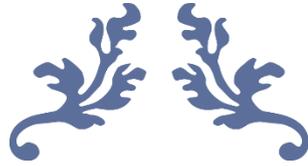
I.8.4. GFDM :

Est une technique de transmission multi-porteuse flexible qui présente de nombreuses similitudes avec OFDM. La principale différence est que les porteuses ne sont pas orthogonales entre elles. GFDM fournit un meilleur contrôle des émissions hors bande et réduit le rapport puissance/puissance moyenne [11].

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur l'évolution des réseaux mobiles qui consiste à la (1, 2, 3, 4 et 5G). Ensuite, on a parlé de leur architecture, objectif et les différences entre les générations et les applications pour chacune d'elle, mais notre travail est plus concentré sur la 5G. L'évolution de ces techniques est guidée par la volonté d'accroître la capacité ainsi que les débits offerts par le système

La 5G est conçue pour satisfaire les besoins croissants de communications toujours plus rapides entre individus. La technologie 5G va être une nouvelle révolution sur les marchés des systèmes sans fil, elle est la meilleure technologie mobile pour le transfert de données.



Chapitre II :

Les formes de modulation multi-porteuses pour la 5G



II.1. Introduction :

Dans les communications sans fil, le spectre est une ressource essentielle. Par rapport à l'OFDM, les systèmes basés sur la modulation FBMC sont plus complexes. En conséquence, la technologie OFDM sera moins utilisée au profit d'une technologie multi-porteuse basée sur un banc de filtres appelée FBMC comme l'un des candidats les plus prometteurs pour la future 5G. Afin de garantir une communication sans interférence, il conserve également les avantages de l'OFDM, dans ce chapitre, nous aborderons la modulation FBMC, en introduisant d'abord les bases, puis en décrivant le signal, et enfin en discutant de la modulation FBMC/OQAM.

Le FBMC permet une excellente occupation spectrale, mais la superposition des symboles temporels.

II.2. Canaux de transmission :

Un canal de communications est un milieu physique qui est utilisé pour la transmission d'un signal à partir d'un transmetteur jusqu'au récepteur.

II.2.1. Canal à bruit additif blanc gaussien :

Le signal transmis du canal est perturbé par un bruit additif (figure II.1), c'est une perturbation aléatoire dont les origines sont le milieu de transmission (bruit externe tels que les rayonnements), ou les dispositifs électroniques utilisés (bruit interne) [13][14].

La figure (II.1) représente le canal à bruit additif

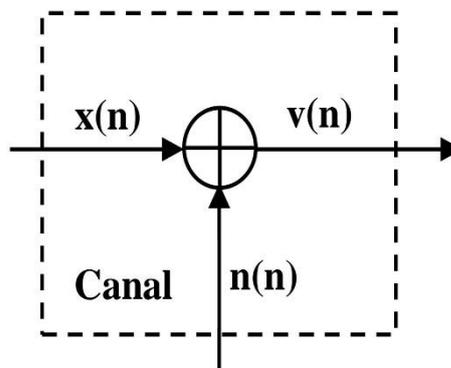


Figure II.1 : canal à bruit additif [6].

Le signal à la sortie du canal est donné par :

$$V(n) = x(n) + n(n) \quad (\text{II.1})$$

Avec $x(n)$ est signal émis et $n(n)$ représente le bruit aditif.

La capacité du canal C pour le canal AWGN est donnée par la relation suivante :

$$C = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P}{N} \right) \quad (\text{II.2})$$

Où P Représente la puissance maximale du canal et N la puissance du bruit.

II.2.2. Canal à trajet multiples :

Avant d'exposer le principe des modulations multi-porteuses, 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 s'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 [15].

La figure (II.2) représente le schéma de principe des trajets multiple

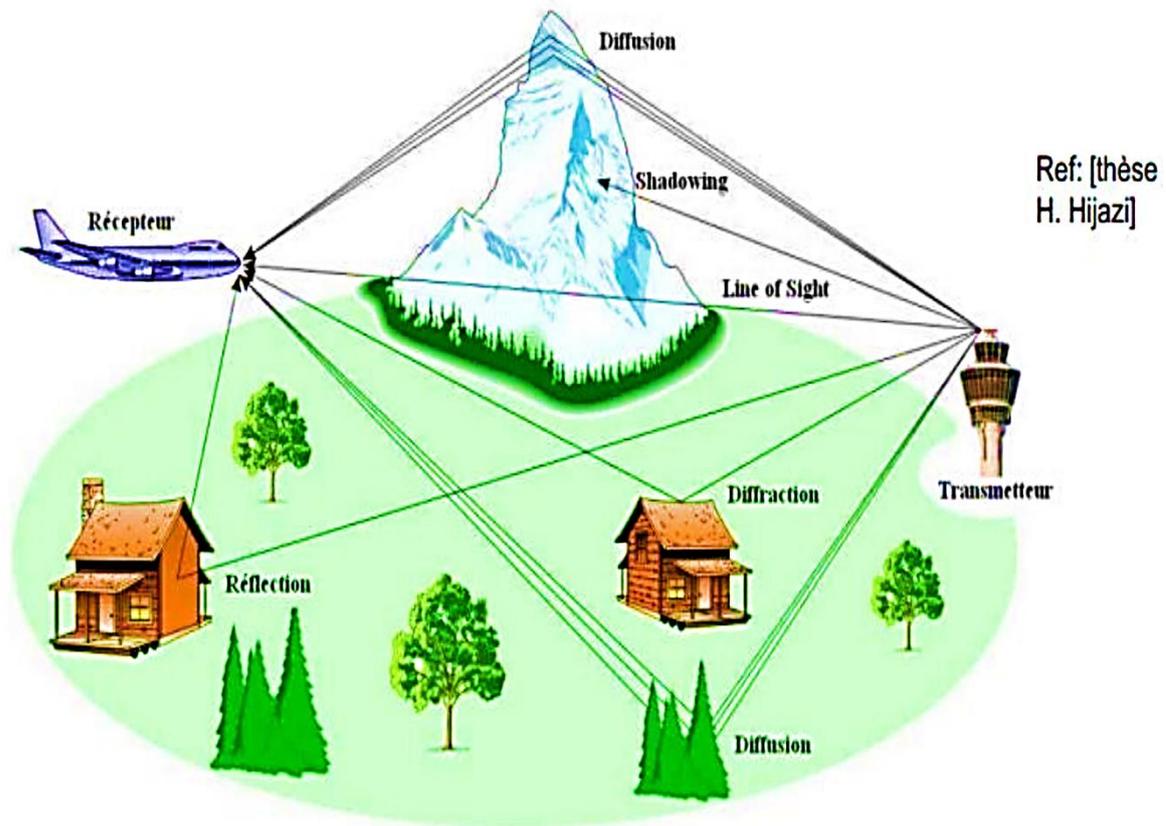


Figure II.2: Schéma de principe des trajets multiple [37].

Considérons un modèle simple de canal à l'issue duquel le récepteur reçoit la somme des Signaux émis ayant subi des échos donc retardés de τ_i et d'amplitudes h_i [15].

La réponse impulsionnelle du canal s'écrit alors :

$$h(t) = \sum_{i=1}^N h_i \delta(t - \tau_i) \quad (\text{II.3})$$

Sa fonction de transfert est obtenue par transformée de fourier comme suit :

$$H(f) = \sum_{i=1}^N h_i e^{-2j\pi f \tau_i} \quad (\text{II.4})$$

II.3. Modulation OFDM :

II.3.1. Définition :

La technique OFDM (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence) est une solution très efficace pour la lutte contre les effets des trajets multiples et les canaux sélectifs en fréquence, elle est une technique de transmission de donnée numérique. L'OFDM consiste à diviser la bande passante du système en un grand nombre de porteuse individuelles appelés sous-porteuse, on dit que les sous-porteuse sont orthogonales car pour une transmission idéale, un symbole transmis sur une sous porteuse peut être démodulé sans interférence avec les sous porteuse voisines [16].

La figure (II.3) représente schéma bloc simplifié d'un émetteur-récepteur OFDM

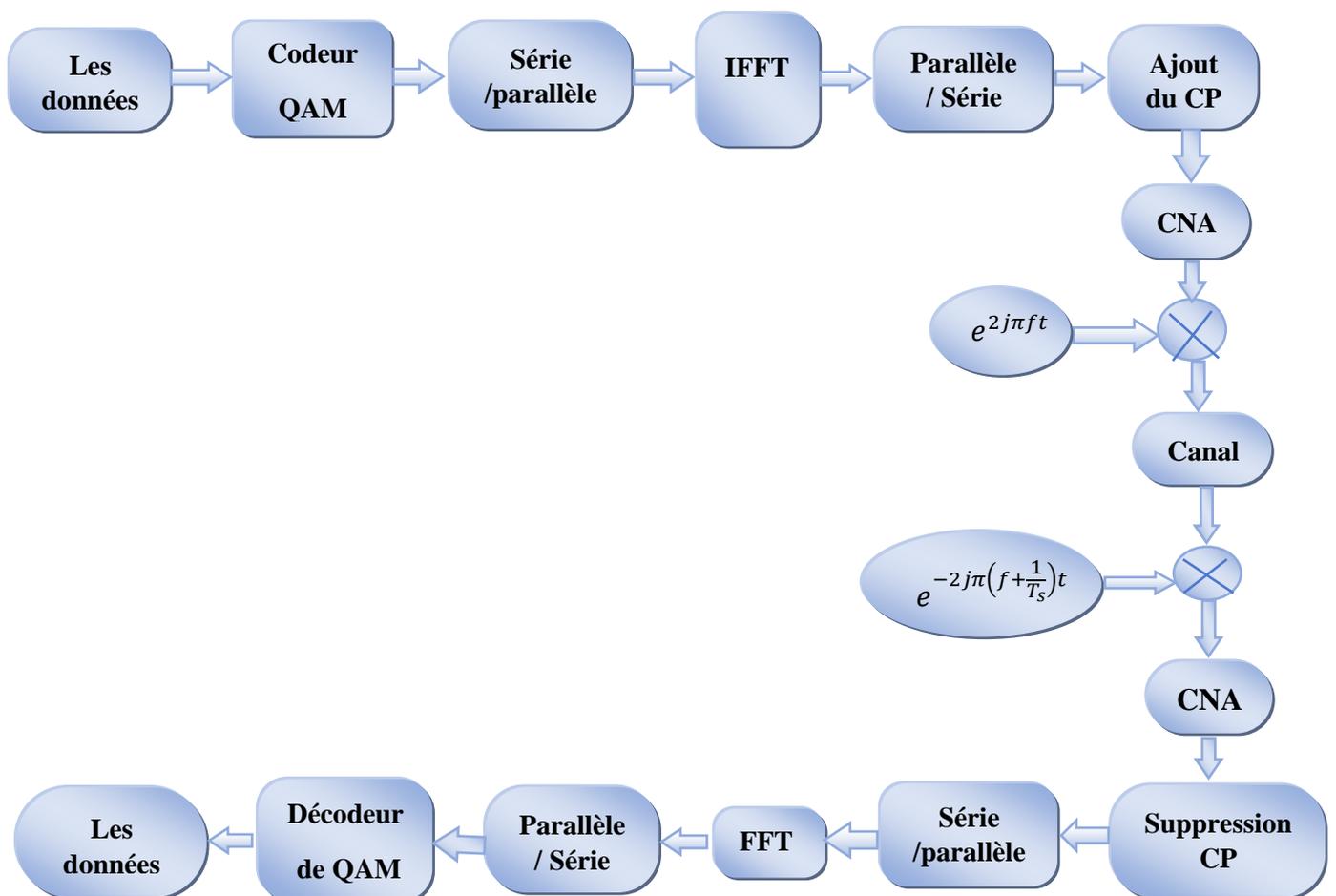


Figure II.3 : Schéma bloc simplifié d'un émetteur-récepteur OFDM

II.3.2. Principes de 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. Comme le montre la Figure (II.4), l'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes du temps et des fréquences. Une porteuse est attribuée à chaque cellule temps/fréquence. L'information à transmettre est répartie sur l'ensemble de ces porteuses, modulée chacune à faible débit par une modulation du type PSK ou QAM.

Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant t [17].

La figure (II.4) représente la représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM

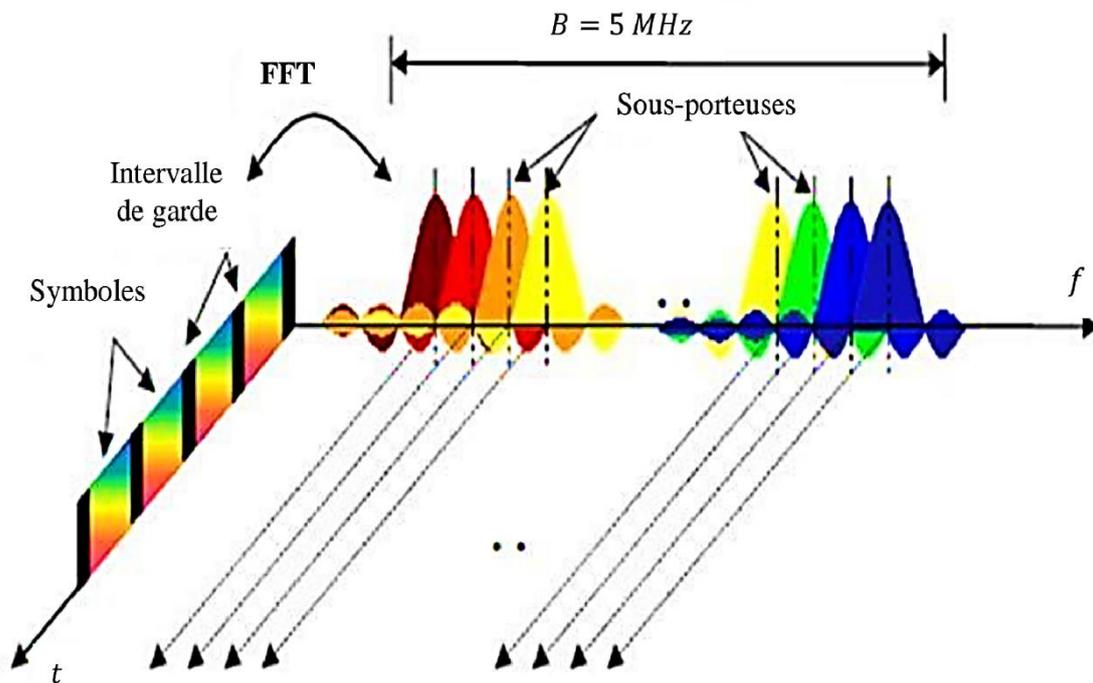


Figure II.4 : Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM [17].

II.3.2.1. Modulation :

Pour la réparation des données à transmettre sur les N porteuses, Les symboles doivent être regroupés par des paquets de N [20]. Les symboles sont des nombre complexes offrent les constellations souvent de type QAM ou PSK Le signal est modulé par le $k^{\text{ème}}$ train de symboles parmi les N trains. Et Ck la forme complexe de signal porteuse modulé du train K .

Le rassemblement des symboles OFDM nous donne le signal total $s(t)$ (figure II.3).

$$S(t) = \sum_{K=0}^{N-1} C_K e^{j2\pi f_k t} \quad (\text{II.5})$$

La figure (II.5) représente la modulation OFDM

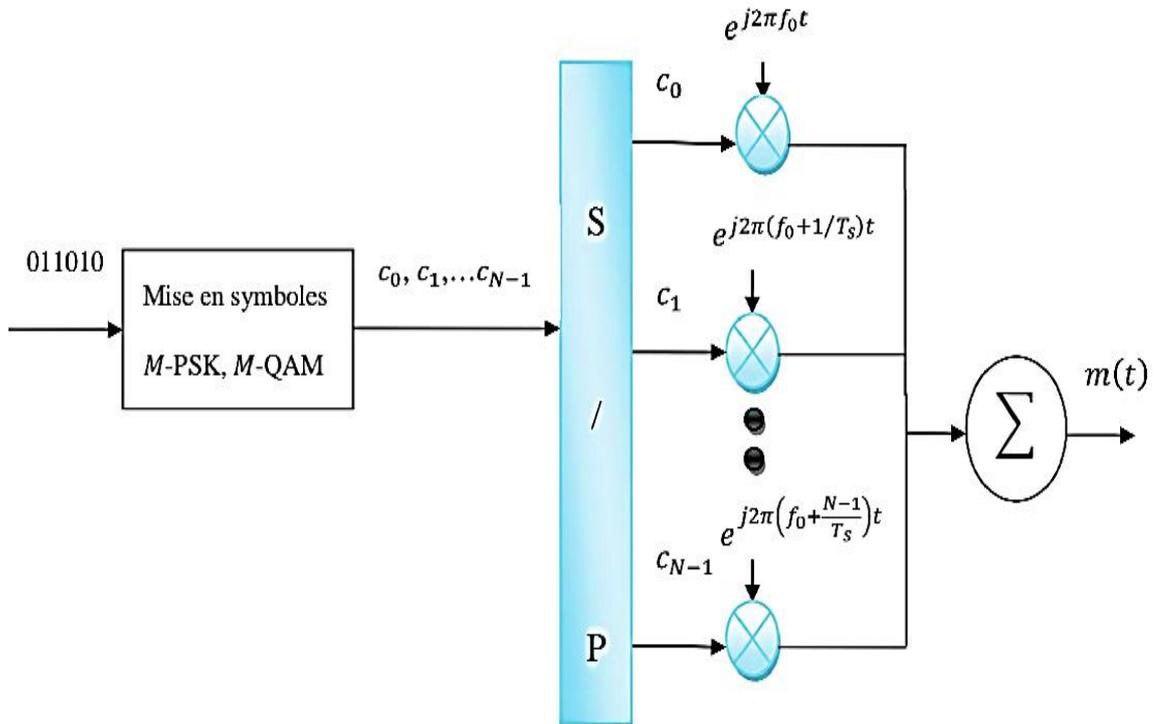


Figure II.5 : la modulation OFDM [19].

II.3.2.2. Démodulation :

Le signal parvenu au récepteur s'écrit sur une durée symbole T_s :

$$s(t) = \sum_{K=0}^{N-1} C_k H_k e^{j2\pi f_k t} \quad (\text{II.6})$$

$H_k(t)$ est la fonction de transfert du canal qui varie lentement. La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous porteuses suivant la figure II.6.

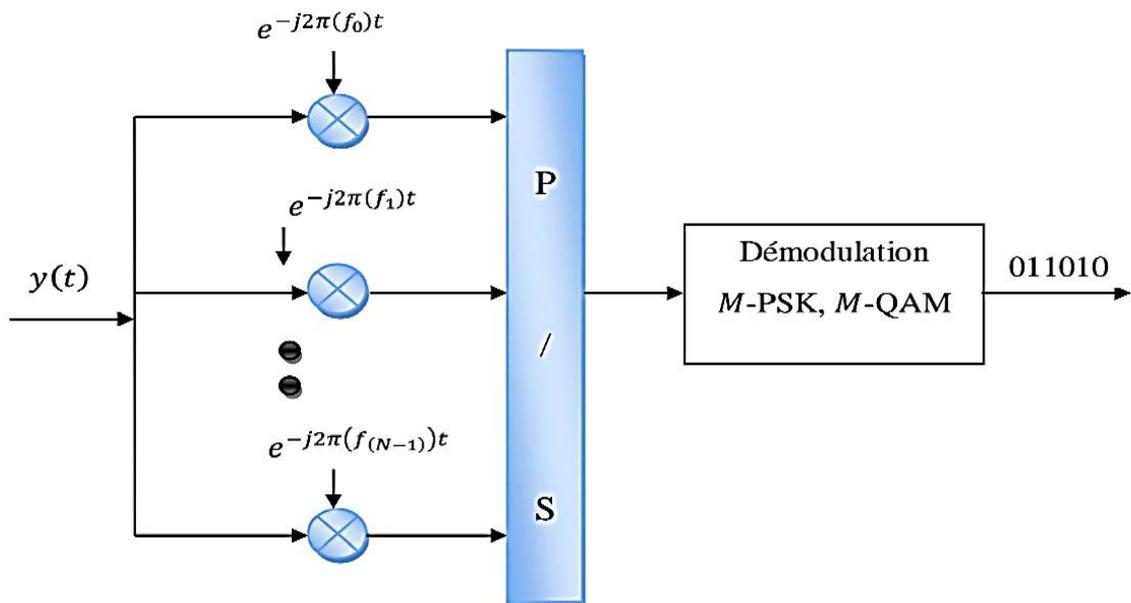


Figure II.6: la démodulation OFDM [19].

II.3.2.3. Modulation QAM :

La modulation QAM est caractérisée par :

- ✚ Directement sur le canal : on parle alors de transmission en bande de base.
- ✚ La modulation d'amplitude en quadrature permet d'augmenter le débit de données, les formats utilisés dans les systèmes de communication mobile 5G incluent 16QAM, 64QAM, 256QAM et 1024 QAM.
- ✚ La modulation est appelée de haut niveau pour des indices au-dessus du 64 [19].

Plus l'ordre de modulation augmente, plus le débit augmente, bien que la pénalité soit la résilience au bruit. D'outre, 256 QAM n'est utilisé que lorsque la qualité de la liaison est bonne, et il se réduit à 64 QAM, puis à 16 QAM, etc., à mesure que la liaison se détériore. Il s'agit d'un équilibre entre la résilience et le débit de données [24].

La figure (II.7) représente exemple de constellation pour une modulation en 16-QAM

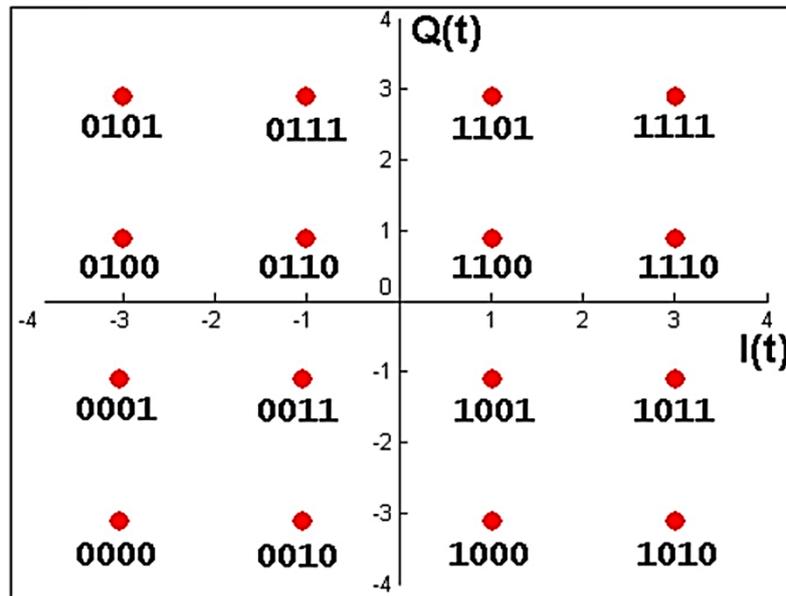


Figure II.7 : Exemple de constellation pour une modulation en 16-QAM [25].

Le tableau (II.1) illustre le gain apporté par la modulation QAM

N	Indice M	Modulation	Débit binaire	Efficacité Spectrale
1	2	BPSK	D	N
2	4	QPSK	2D	2 η
4	16	16-QAM	4D	4 η
6	64	64-QAM	6D	6 η
8	256	256-QAM	8D	8 η
10	1024	1024-QAM	10D	10 η

Tableau II.1 : Illustration du gain apporté par la modulation QAM [25].

D représente le débit et η l'efficacité spectrale.

II.3.2.4. L'orthogonalité :

L'orthogonalité dans un système OFDM signifie qu'au maximum de chaque spectre d'une sous-porteuse, tous les spectres des autres sous-porteuses sont nuls [21], et les spectres des sous-porteuses se recouvrent mais demeurent orthogonaux entre eux.

L'orthogonalité des sous porteuses est représentée par la figure II.9.

L'interférence entre porteuses (IEP) est causée par la perte de l'orthogonalité et donc par la présence des symboles de données d'une sous-porteuse sur les sous-porteuses adjacentes

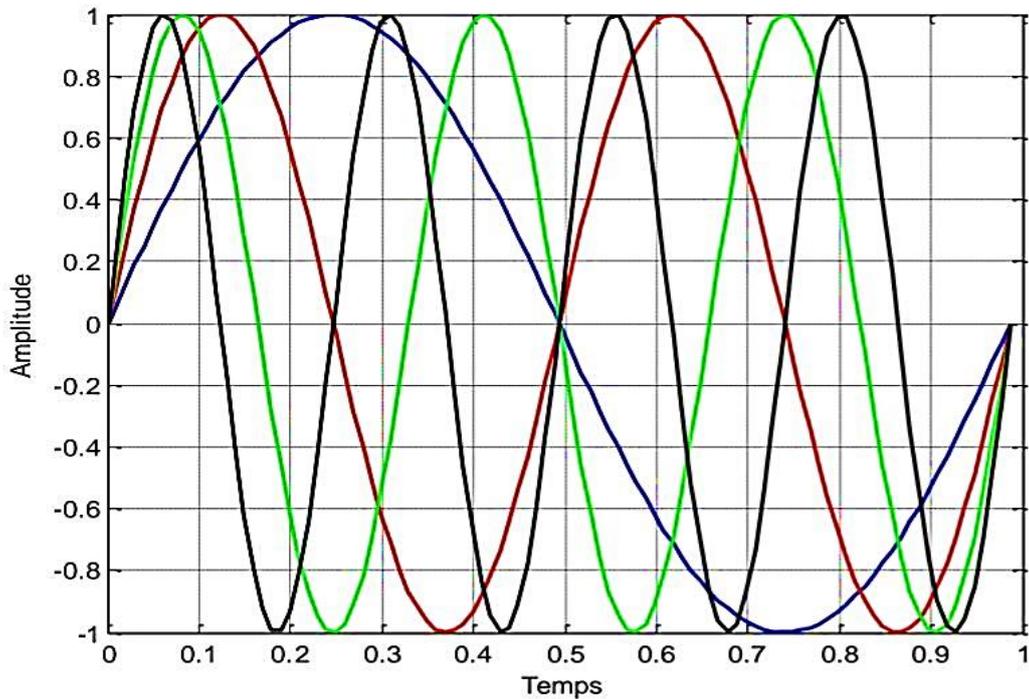


Figure II.8 : Sinusoïdes orthogonales [22].

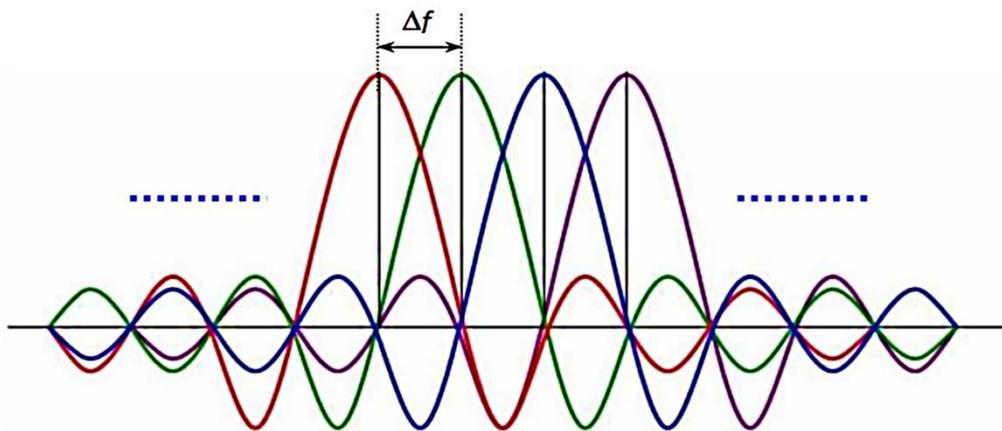


Figure II.9 : Les sous porteuses orthogonales du signal OFDM [22].

II.3.2.5. Intervalles de gardes :

Les intervalles de gardes sont nécessaires pour l'orthogonalité entre de créer une zone « tampon » dans laquelle seront accumulées les versions retardées susceptibles de produire des interférences. Plusieurs techniques différentes existent pour l'introduction des intervalles

de gardes dans OFDM. Il s'agit soit de remplir l'espace de garde entre des symboles consécutifs par des zéros. Une autre des deux méthodes, nous montre que l'extension cyclique peut introduit de deux façons différentes. L'une est nommée préfixe cyclique et l'autre suffixe cyclique [23].

II.3.2.6. 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)[16].

La figure (II.10) représente le préfixe cyclique

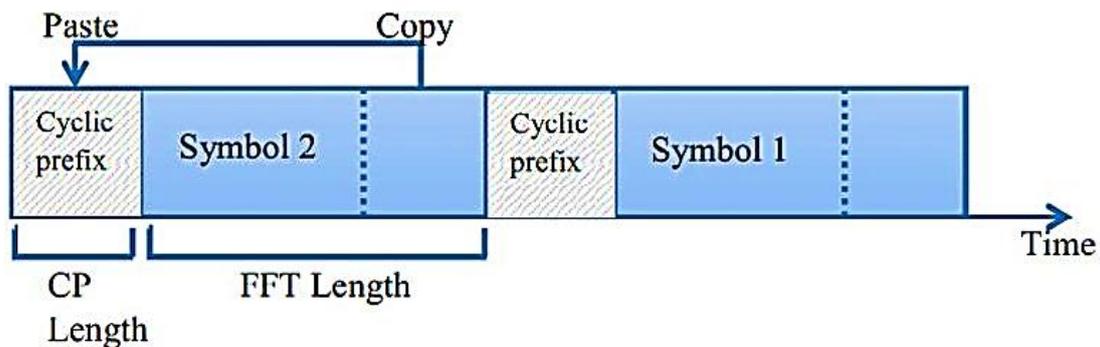


Figure II.10 : Préfixe cyclique .

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

II.3.2.7. Problème des interférences

Un symbole émis parvient au récepteur sous forme de plusieurs symboles atténués et retardés. Un symbole émis lors d'une période i TS peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période $(i-1)$ TS. Il se produit alors des interférences. Dans cette partie nous expliquons les méthodes d'annulation des interférences entre porteuses (ICI, Inter Carrier interférence) et les interférences entre symbole OFDM. Ce dernier type d'interférences est communément appelé interférences entre symboles (ISI, Inter Symbol Interférence) [26].

II.3.2.7.1. Interférence entre symboles (ISI) :

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

L'insertion de ce préfixe est présentée sur la figure (II.11).

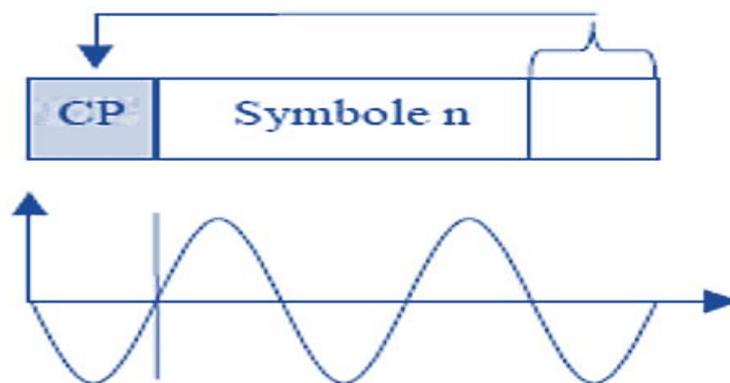


Figure II.11 : Insertion de préfixe cyclique.

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

II.3.2.7.2. Interférence entre sous porteuses (ICI) :

Si le préfixe inséré au début d'une trame OFDM est muet (sans aucun signal), des interférences inter-porteuses, ou ICI (Inter Carrier Interférence), vont se produire, pour expliquer ce phénomène, il est beaucoup plus facile de raisonner dans le domaine fréquentiel plutôt que dans le domaine temporel, non échantillonné. Prenons donc l'exemple d'une transmission OFDM à N sous-porteuse à travers un canal à deux trajets, dont le retard de trajet indirecte est σ inférieur à la longueur du préfixe Δ . La dure d'une trame OFDM sans son préfixe est, comme précédemment, noté (T_u) , observons sur la Figure (II.12) les chronogrammes de deux voies particulières, correspondant aux sous- porteuses de fréquences respectives f_i et f_{i+1} . Dans la partie supérieure de la figure, les signaux i et $i + 1$ issus soit du trajet direct, soit du trajet réfléchi sont représentés en fonction Du temps. Il est important de noter que le décalage δ du au retard

de trajet modifie notablement l'allure du signal dans la fenêtre d'observation, de largeur T_u , liée à la référence d'horloge, puisque la sinusoïde n'est présente qu'observation durée T_r . En réception, après suppression du préfixé, on réalise la FFT sur la durée T_u de la trame OFDM, Si on s'intéresse tout d'abord au trajet direct, la transformée de fourier d'une sinusoïde de fréquence, $f_i + k/T_u$, K étant un entier positif ou négatif. Il en est de même pour sous-porteuse f_{i+1} et compte tenu de décalage choisi entre la fréquence porteuses, le maximum d'un spectre correspondra au zéro d'un autre et inversement. Par contre, pour les signaux ayant subi une ou plusieurs réflexions, donc décalés dans le temps, la sinusoïde n'est présente que sur une durée $T_r < T_u$

Ceci entrainera une modification de la fonction caractérisant le contenu spectral de puissance du signal, dont les passages par zéro se pro- diront donc pour des valeurs différentes de celle associées au trajet direct. Les diverses courbes de la partie inférieure de la figure (II.12) mettent clairement ce problème en évidence. Lors de l'échantillonnage, il n'y aura plus orthogonalité entre les sous- porteuse et on retrouvera des informations d'une sous-porteuse sur l'autre.

La figure (II.12) suivante représente l'interférence entre porteuses dans le domaine temporel et fréquentiel

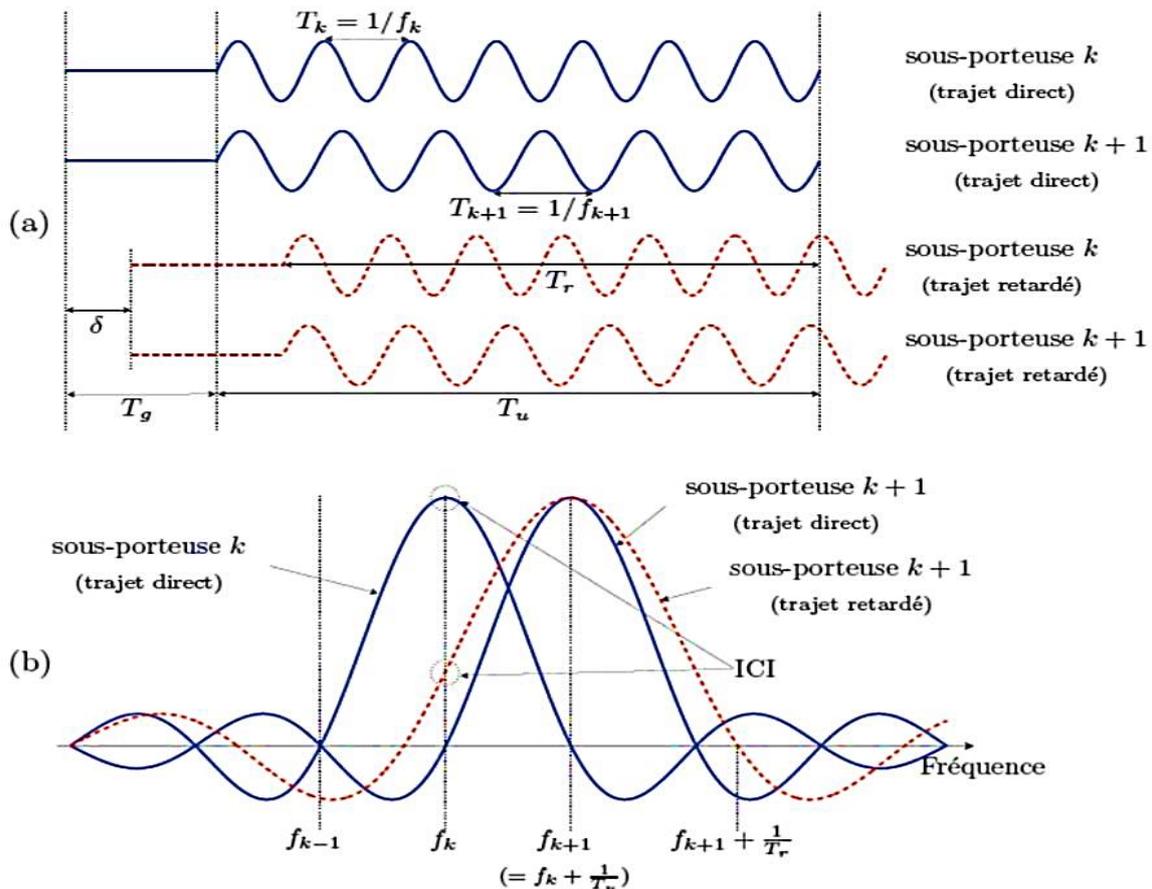


Figure II.12 : Interférence entre porteuses : (a) domaine temporel, (b) domaine fréquentiel [38].

II.4. Avantages et inconvénients de l'OFDM :

II.4.1. Avantages :

- ✓ Efficacité spectrale élevée par rapport aux autres schémas de modulation à double bande latérale, spectre étalé, etc.
- ✓ Peut facilement s'adapter à des conditions de canal difficiles sans une égalisation complexe dans le domaine temporel.
- ✓ Robuste contre les interférences de canaux communs à bande étroite
- ✓ Robuste contre les interférences inter symboles (ISI) et les évanouissements causés par la propagation par trajets multiples.
- ✓ Mise en œuvre efficace à l'aide de la transformation de fourier rapide.
- ✓ Faible sensibilité aux erreurs
- ✓ Les filtres de récepteur de sous-canal accordés ne sont pas nécessaires (contrairement au FDM conventionnel).

- ✓ Facilite réseaux à fréquence unique (SFN).

II.4.2. Inconvénients :

- ✓ Sensible au décalage doppler
- ✓ Sensible aux problèmes de synchronisation de fréquence
- ✓ Haut de crête à puissance moyenne rapport (PAPR), nécessitant un circuit d'émetteur linéaire, qui souffre d'une faible efficacité de puissance
- ✓ Perte d'efficacité causée par le préfixe cyclique / intervalle de garde [4].

II.5. Modulation FBMC

La technique de modulation Filter Bank Multi-Carrier (FBMC) est une modulation multi-porteuse à base de bancs de filtres. Elle est considérée parmi les formes d'ondes candidates pour les futures communications sans fil 5G. Elle utilise des bancs des filtre à réponse impulsionnelle finie (Finité Impulse Réponse Filter (FIR)) bien localisé en fréquence et en temps avec des lobes secondaires réduits, ce qui la rend moins sensible aux erreurs. La combinaison FBMC/OQAM a réussi à conserver les avantages de l'OFDM et améliorer ses points faibles [27].

Un émetteur-récepteur générique à porteuse multiples avec des bancs de filtre est représenté sur la figure II.13 où l'entrée du système est donnée par l'expression suivante :

$$S_i(t) = \sum_n S_i[n] \delta(t - nT) \quad (\text{II.7})$$

Si $[n]$ représente les symboles de données, à savoir l'indice de sous-porteuse.

- ✚ L'espacement temporel entre les symboles est noté T .
- ✚ P_{Tx} et P_{Rx} désignent les filtres prototypes de synthèse et d'analyse.
- ✚ Le type de filtre utilisé est l'une des plus grandes différences entre OFDM et FBMC, OFDM utilise une impulsion rectangulaire de hauteur 1 avec une durée T pour la transmission et la réception.

La figure (II.13) représente un émetteur-récepteur générique à porteuse multiples à base de bancs de Filtres.

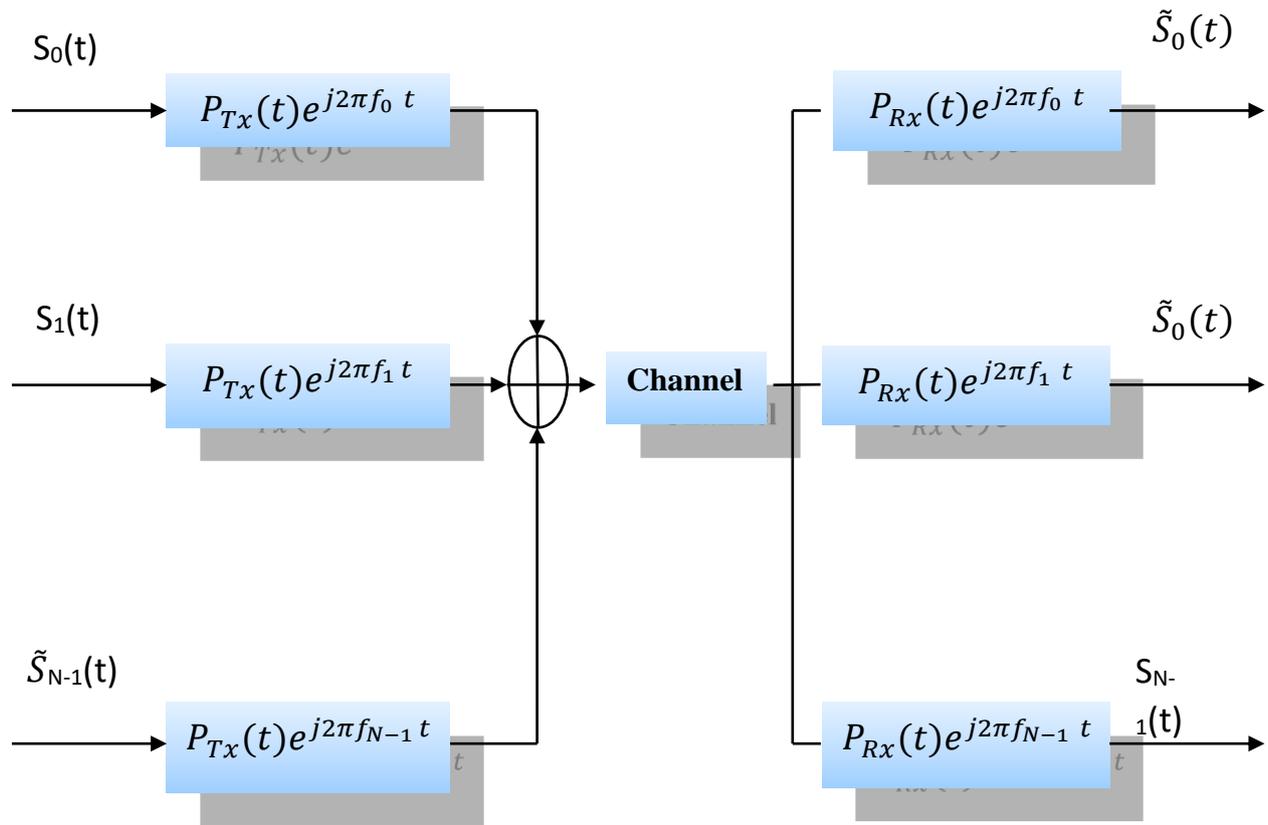


Figure II.13 : Emetteur-récepteur générique à porteuse multiples à base de bancs de Filtres [36].

Du côté récepteur, la durée de P_{Rx} est réduite lorsqu'elle est passée à travers le bloc FFT car elle est plus petite que T et sa durée est égale à l'inverse de l'espacement de fréquence entre les sous-porteuses. De nombreuses études ont été réalisées pour concevoir un filtre optimal pour FBMC et celui utilisé dans cette étude est le filtre prototype conçu par PHYDYAS.

Dans le FBMC, T est toujours égal à T_{FFT} mais la durée de P_{Tx} et P_{Rx} peut être supérieure à T et les symboles successifs peuvent se chevaucher. En se référant à nouveau à la figure (II.13), le signal d'émission global peut être considéré comme suit :

$$X(t) = \sum_n \sum_{i=0}^{N_e-1} S_i[n] P_{Tx}(t - nT) e^{j2\pi(t-nT)f_i} \quad (\text{II.8})$$

$X(t)$ désigne un groupe de sous-porteuses limitées dans le temps, composées de valeurs complexes et leur amplitude échelonnée par $S_i[n]$. En outre, chaque sous-porteuse est passée à travers une banque de filtre représentée par P_{Tx} pour générer le signal d'émission. Par

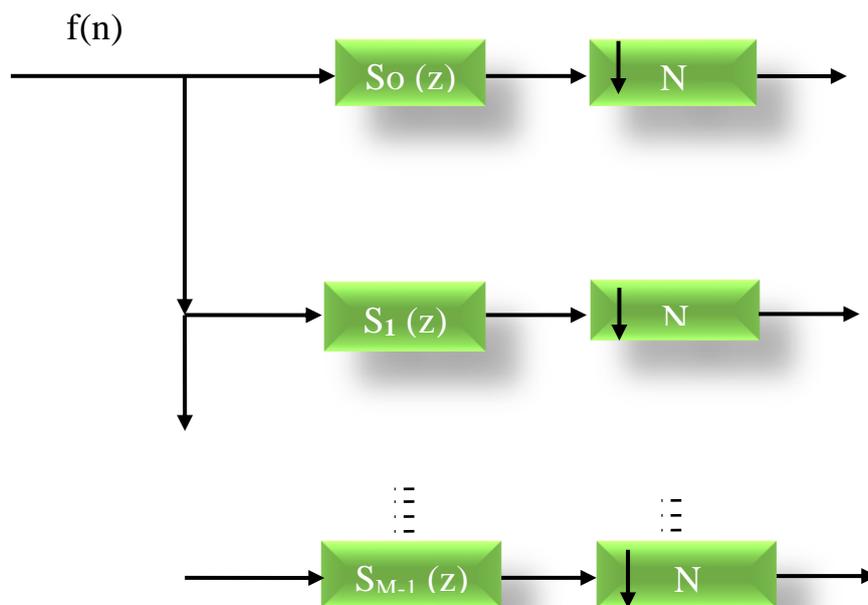
conséquent, en supposant des conditions de canal idéales, le signal reçu $y(t)$ serait identique au signal transmis $x(t)$ [36].

II.5.1. L'analyse et la synthèse par les bancs de filtres

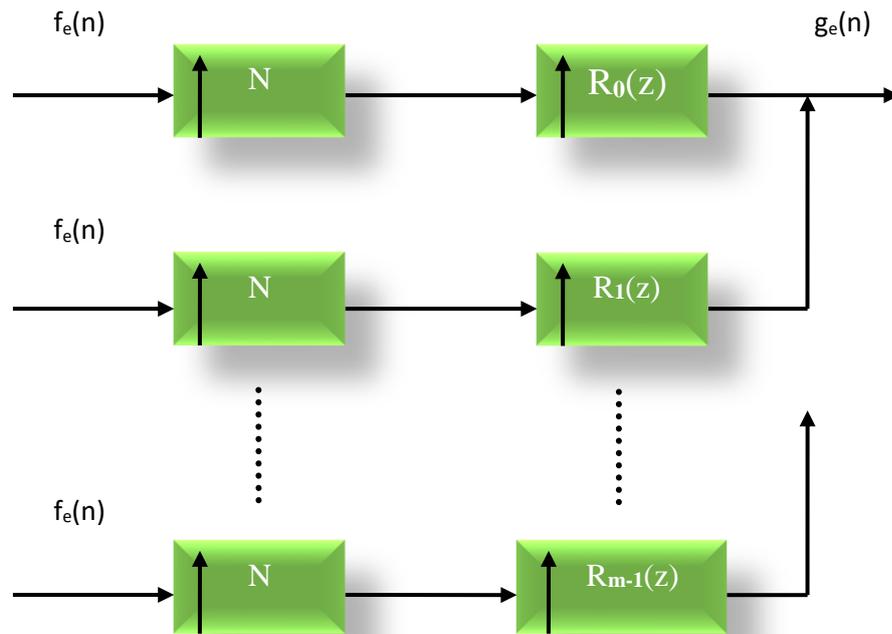
L'analyse et la synthèse par les bancs de filtres comme le montre la figure II.14, le banc de filtres de synthèse est constitué de M branches parallèles pour multiplexer les signaux OQAM dans $U_i[n]$ sur le i ème sous-canal correspondant. Chaque succursale du SFB est équipée d'un sur-échantillonner et d'un filtre $F_i(z)$.

Le signal émis $[m]$ est composé en ajout les signaux de sortie SFB. Du côté récepteur, le banc de filtres d'analyse est constitué de M branches parallèles pour effectuer les opérations nécessaires vers le SFB. Le signal reçu $s[m]$ est d'abord dé-multiplexé aux sous-bandes correspondantes, puis sous-échantillonné avec un facteur K pour générer les signaux de Sortie $y_i[n]$. Les facteurs de sur-échantillonnage et de sous-échantillonnage sont définis pour avoir la même valeur de $K = M/2$ dans toutes les branches. Le système de banc de filtres divise la bande passante de canal disponible de manière égale pour tous les signaux sur toutes les branches du SFB et de l'AFB, afin de mettre en œuvre un système FBMC uniforme. Par conséquent, les filtres du SFB, $F_i(z)$, $i = 0 \dots (M - 1)$, peuvent être générés en modulant l'exponentielle complexe avec un filtre prototype bien conçu [27].

La figure (II.14) représente l'analyse et la synthèse pas les bancs de filters



(a) Banque de filtres d'analyse



(b) Banques de filtres de synthèse

Figure II.14 : L'analyse et la synthèse par les banques de filtres

II.5.2. Filtre prototype :

L'étude des filtres prototypes présente un intérêt particulier pour FBMC / OQAM parce qu'il représente un degré important de liberté. De plus, les filtres prototypes sont des conceptions de filtres électroniques qui sont utilisés comme modèle pour produire une conception de filtre modifiée pour une application particulière. Afin d'éviter un problème D'ISI, le canal doit satisfaire au critère de nyquist lorsqu'il a un cas idéal. Maintenant, si la période de symbole est T_{set} que le taux de symbole est $F_s = 1/T_s$, la réponse en fréquence du canal doit être symétrique par rapport à la fréquence. En conséquence, en FBMC, le filtre prototype pour les bancs de filtres de synthèse et d'analyse doit être à demi-nyquist, ce qui signifie que le carré de sa réponse en fréquence doit satisfaire au critère de nyquist. Les filtres doivent fonctionner à de nombreuses fréquences, impédances Et largeurs de bande différentes. L'utilité d'un filtre prototype provient de la propriété que tous ces autres filtres peuvent en être dérivés en appliquant un facteur d'échelle aux composants du prototype. La conception du filtre ne doit donc être réalisée qu'une seule fois. Parmi les filtres prototype on a le filtre PHYDYAS, le filtre RRC et le filtre Hermite [29].

II.5.3. Modulation multi porteuses à base de filtre prototype PHYDYAS:

Le filtre prototype PHYDYAS est, celui qui est adopté dans la couche physique pour le projet d'accès dynamique au spectre et de radio cognitive (PHYDYAS) européen. Ce filtre prototype a été introduit par bellanger dans le filtre prototype est conçu en utilisant la technique d'échantillonnage en fréquence l'idée de cette technique est, d'abord, de déterminer la réponse en fréquence $G(f)$ via la formule d'interpolation de la réponse en fréquence souhaitée les échantillons qui sont uniformément espacés aux points de fréquence $f_k = \frac{k}{KT}$ où K est le facteur de sur échantillonnage et T est la période de symbole.

$$G(f) = \sum_k G_k \frac{\sin(\pi(kTf - k))}{\pi(kTf - k)} \quad (\text{II.9})$$

La réponse impulsionnelle continue du filtre prototype est obtenue opération de transformée de fourier inverse sur $G(f)$, qui est $g(t)$:

$$g(t) = \sum_k G_k e^{j2\pi kt / kT} \quad (\text{II.10})$$

Pour $|t| \leq kT$

Pour le filtre prototype PHYDYAS, le facteur de sur-échantillonnage est choisi pour être $K=4$ et les coefficients de fréquence G_k sont choisis selon la théorie de nyquist et sont optimisés pour offrir la sélectivité maximale en fréquence et minimiser l'interférence totale qui provient à partir de la structure du banc de filtre. Les coefficients de fréquence choisis pour filtre [30].

$$\text{PHYDYAS sont donnés par [3] : } \left\{ \begin{array}{l} G_0 = 1 \\ G_1 = 0.9716960 \\ G_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ G_3 = \sqrt{1 - G_1^2} = 0.235147 \\ G_k = 0 \quad \text{pour } k > 3 \\ G_k = G_{-k} \quad \text{pour } k < 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.11})$$

La figure II.15 montre la réponse impulsionnelle du filtre prototype PHYDAS en utilisant les coefficients de fréquence fournis dans le tableau 1 pour $K = 4$ avec 16 sous porteuses.

On peut voir que les ondulations observées hors bande sont presque négligeables, ce qui dépeint la haute sélectivité de cette conception de filtre spécifique.

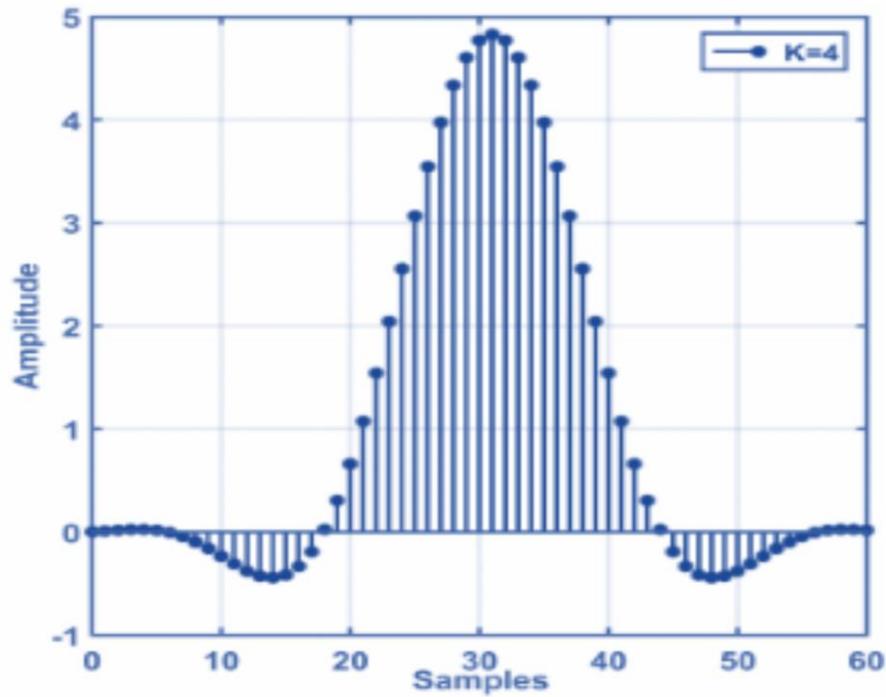


Figure II.15 : Réponse d'impulsion de filtre de prototype. ($K = 4$, sous-porteuses = 16)

Modulation multi-porteuses à base de filtre prototype PHYDYAS

La figure II.16 présente le schéma synoptique d'une transmission FBMC

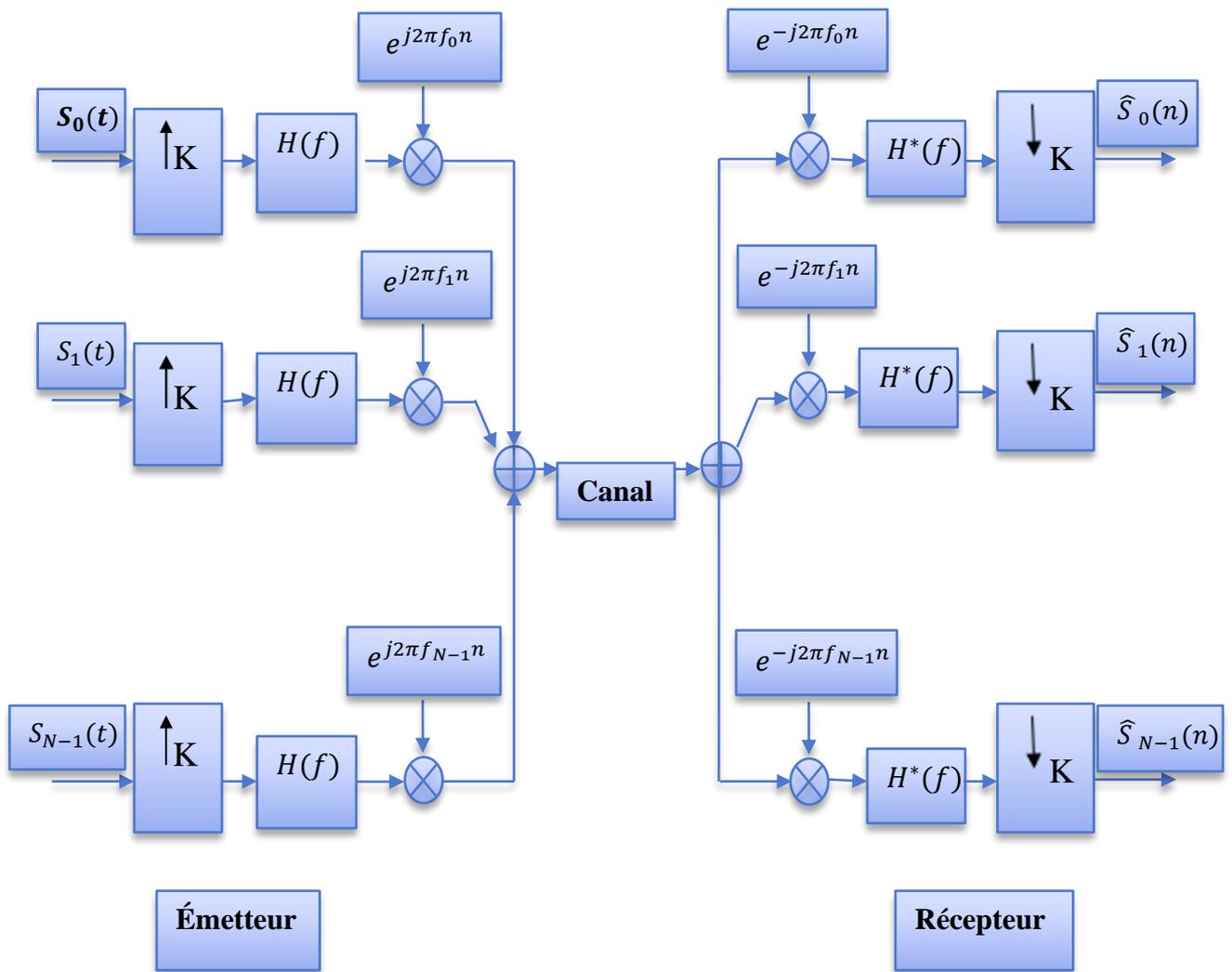


Figure II.16 : Schéma synoptique d'une transmission FBMC [13].

II.5.3.1. Méthode la FMT :

La figure II.17 présente la répartition en fréquence de la FMT sans chevauchement.

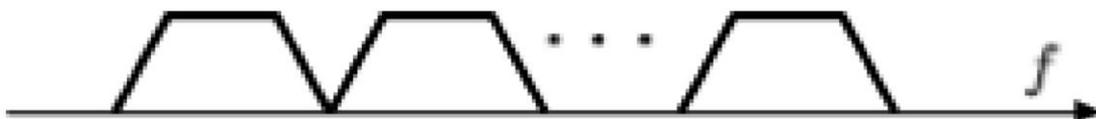


FIGURE II.17 : Répartition en fréquence de la FMT sans chevauchement [13].

La modulation FMT, est une modulation multi porteuses qui ne permet pas le chevauchement spectral entre les porteuses contrairement à l'OFDM. Les ICI (Inter Carrier Interférence) deviennent ainsi négligeables. Le système FMT n'utilise pas d'intervalle de garde, il a alors

besoin d'un égaliseur pour combattre les ISI. Le FMT a l'avantage d'être moins sensible au décalage fréquentiel en comparaison avec l'OFDM. La technique FMT a été proposée pour la transmission

n des données dans le standard VDSL (Very-high-speed Digital Subscriber Lines)[22].

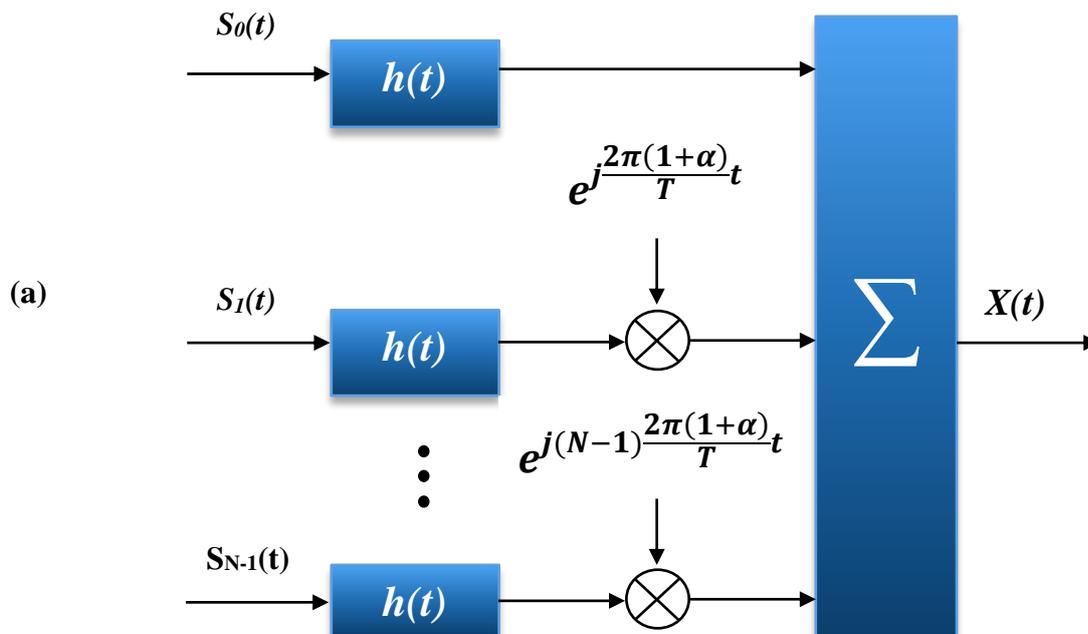
Le signal FMT peut être défini par :

$$x(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \sum_{m \in [0, M-1]} C_{m,n} g(t - nT) \exp\left(\frac{(j2\pi m t(1 + \alpha))}{T}\right) \quad (\text{II.12})$$

La variable α est un facteur de roll-off, $g(t)$ est le filtre prototype, $C_{m,n}$ est le symbole complexe les filtres de mise en forme sont construits de telle sorte que les interférences entre les porteuses adjacentes sont les plus faibles possibles. Les porteuses ne doivent pas alors se chevaucher en fréquence mais peuvent se chevaucher en temps.

Le filtre de nyquist en racine de cosinus surélevé SRRC à α est le filtre le plus utilisé dans cette classe. La bande de garde utiliser génère une perte d'efficacité dans cette classe des systèmes des bancs des filtres [31].

La figure (II.18) suivante l'émission et la représente de transmission à base de la modulation FMT-FBMC.



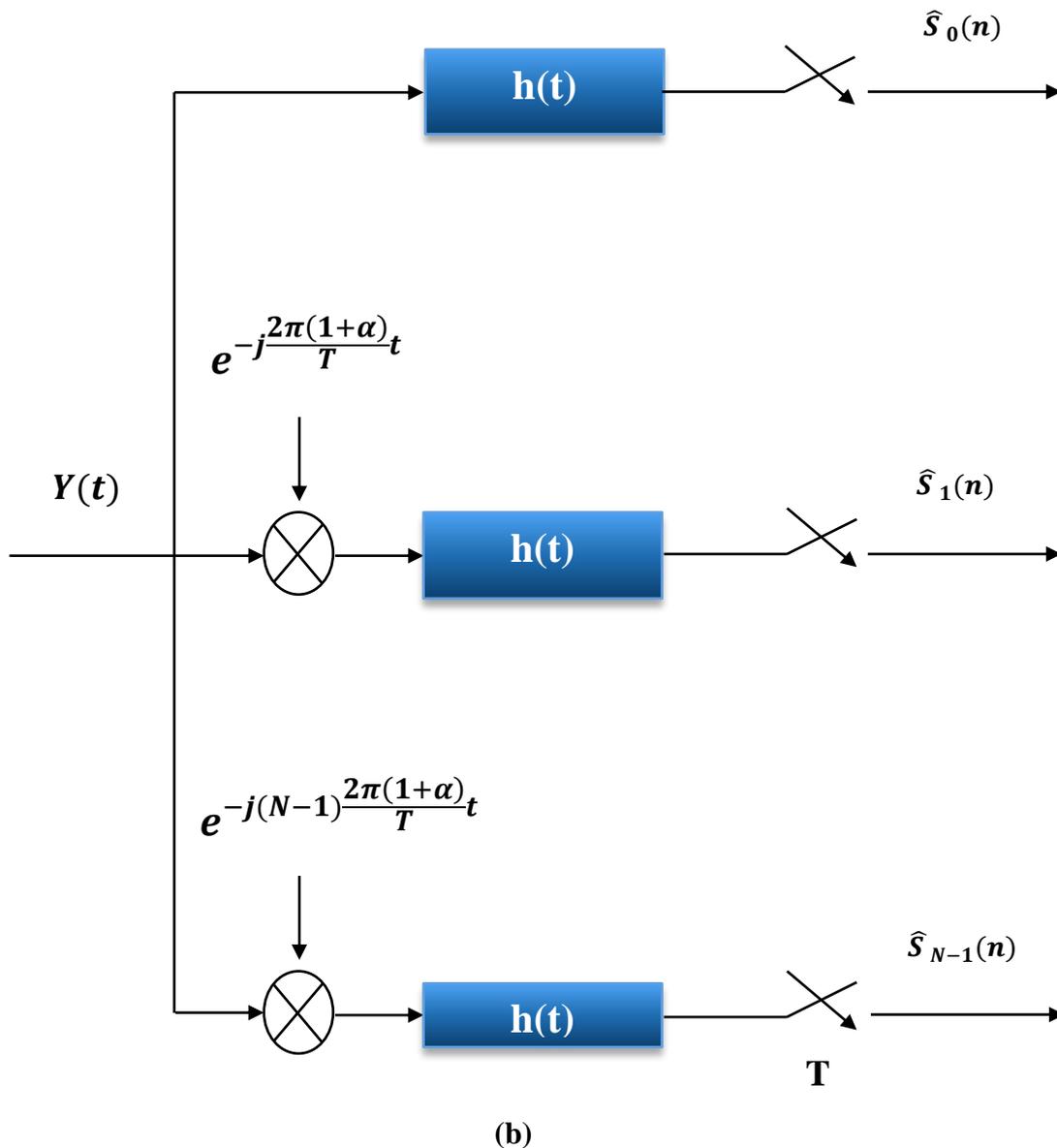


FIGURE II.19 : une chaîne de transmission à base de la modulation FMT-FBMC.

II.5.3.2. Méthode la SMT :

La méthode SMT permet le chevauchement des bandes adjacentes. Les bandes de sous-porteuse sont au maximum chevauché, donc minimalement espacées. Nous avons alors maximisé l'efficacité de la bande passante ($K = N$).

La figure II.19 présente la répartition en fréquence de la SMT avec chevauchement.



FIGURE II.19 : Répartition en fréquence de la SMT avec chevauchement [13].

Les symboles transmis sont OQAM composées en phase et en quadrature ont un décalage de la moitié de l'intervalle de symbole du temps, à savoir, le temps échelonné. Si les chevauchements sont limités aux bandes adjacents et $H(f)$ et $H^*(f)$ sont une paire de filtres de nyquist, la séparation des symboles de données à la sortie du récepteur est garantie. Les égaliseurs sont nécessaires après décimateurs au niveau du récepteur [32].

En raison des propriétés avantageuses de la FBMC, le rendement de bande spectrale sera plus efficace que le signal OFDM. Avec l'utilisation d'une modulation QAM à décalage, qui se produit sans perte de débit de données, où les valeurs réelles et imaginaires des données sont décalées par la moitié de la durée du symbole. Avant la transmission, des symboles se chevauchent d'une manière telle qu'ils peuvent être séparés au niveau du récepteur en raison du fait que la batterie de filtres est conçue pour satisfaire au critère de nyquist afin de minimiser l'interférence cet inter-symbole [33]. Cela permet d'obtenir un espacement bauds entre sous-porteuse adjacente, et nous pouvons encore récupérer les symboles d'information, qui est exempt de l'interférence inter symbole (ISI) et de l'interférence inter carrier (ICI). Dans ce procédé, contrairement à l'OFDM, l'absence du préfixe cyclique est le nécessaire pour résoudre le problème d'ISI et ICI. Ainsi, la méthode OQAM est plus efficace que la bande passante OFDM [34].

À l'émetteur, le flux de données $x = (x[0], x[1], x[2], \dots, x[N-1])$ est d'abord converti de série en parallèle des séquences S_K puis modulé.

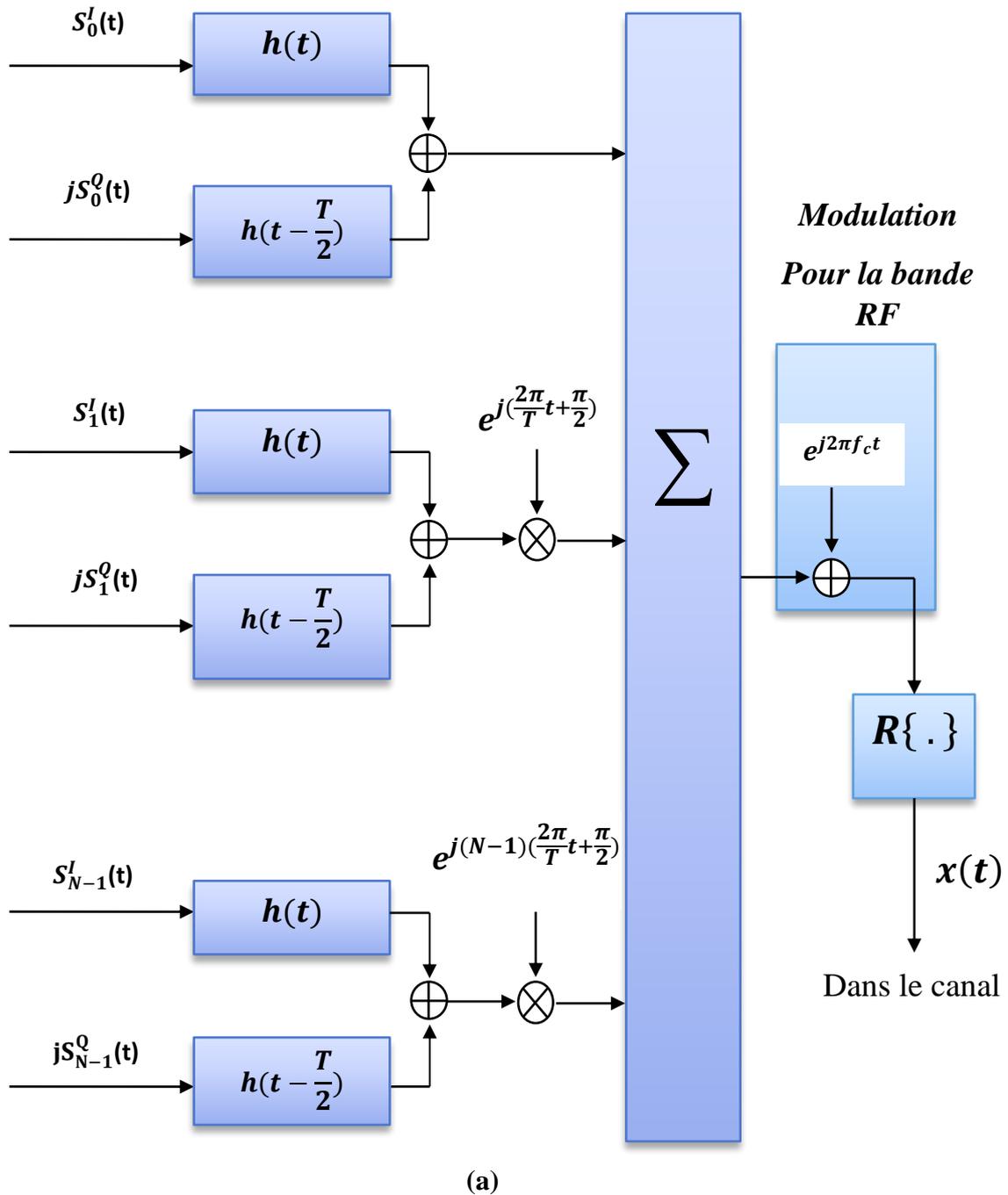
$$S_K(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_k[n] \delta(t - nT) \quad (\text{II.13})$$

$$S_K[n] = S_K^I[n] + jS_K^Q[n] \quad (\text{II.14})$$

Le signal Y transmis est composé de K symboles successifs, comme il somme de m formes d'onde modulée en amplitude par φ . Il peut être exprimé en utilisant les notations de la matrice que : $Y = \sum \varphi \dots$

$Y = (y [0], Y [1], y [2], \dots y [N-1])$ est transmis le signal, $S_k = (S_0 [k] S_1[k], S_2[k], S_{N-1} [k])$.

La figure II.21 présente la chaîne d'émission et de réception de la modulation OQAM



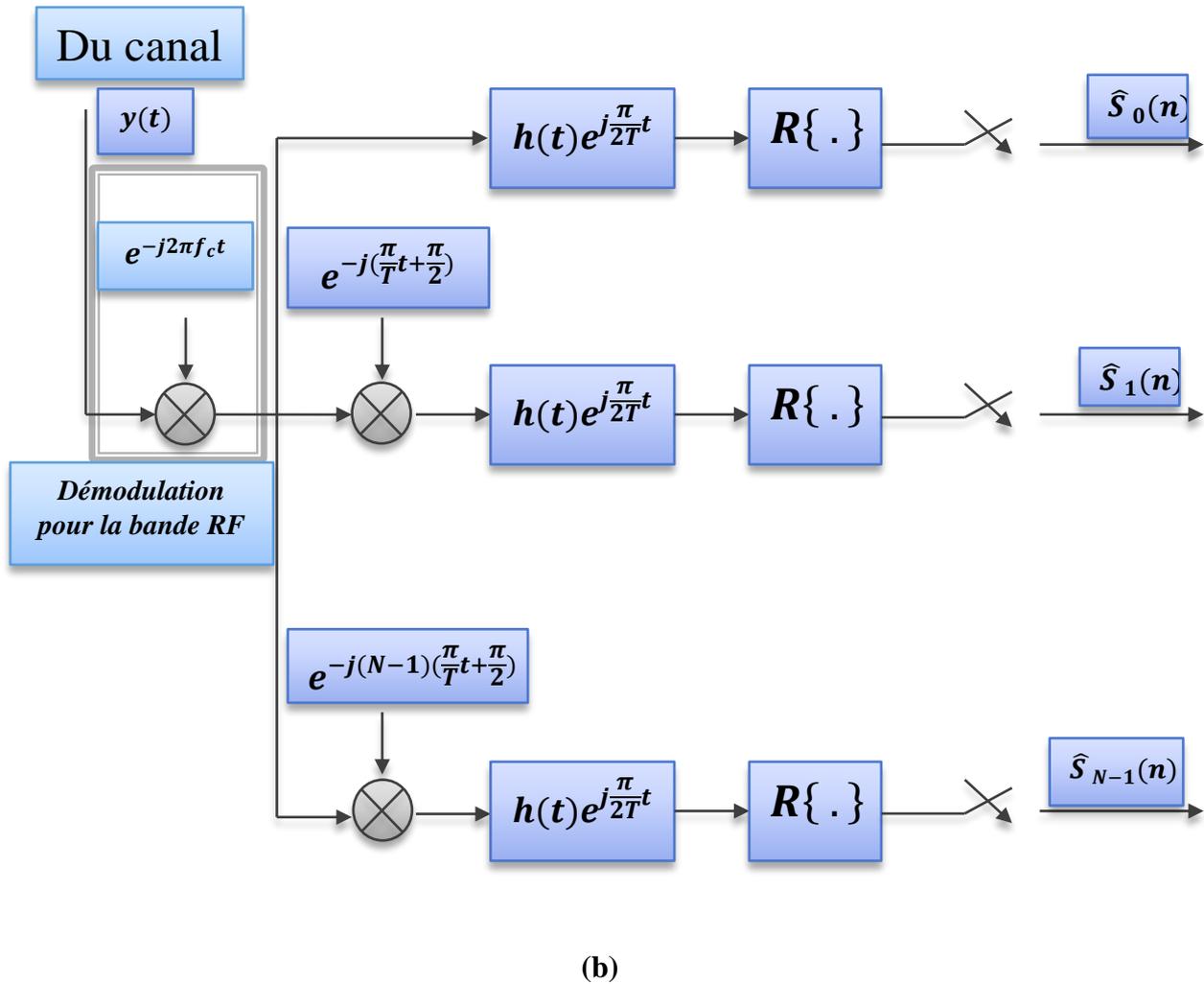
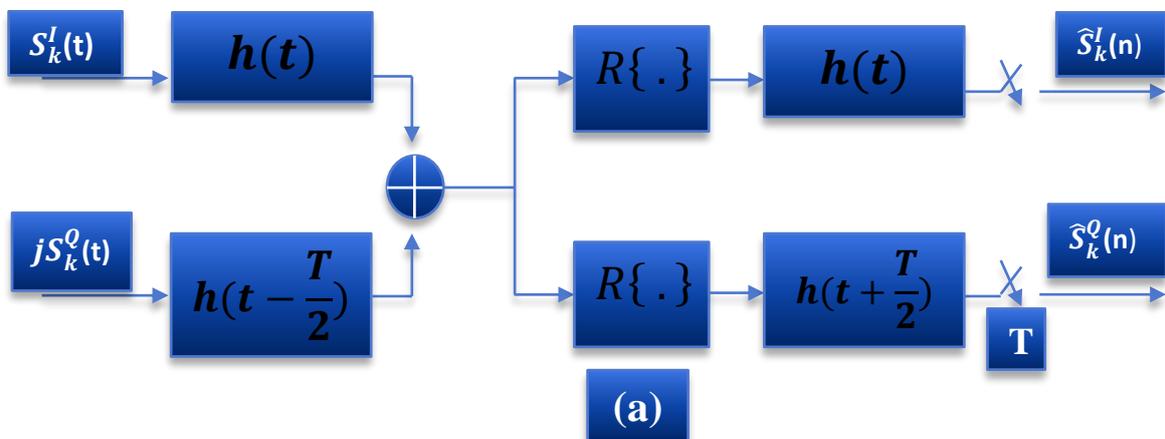


Figure II.20 : Le diagramme équivalent d'un système OQAM / FBMC en bande de base. [39].

La figure II.21 présente l'interférence inter symbole (ISI) de la modulation OQAM



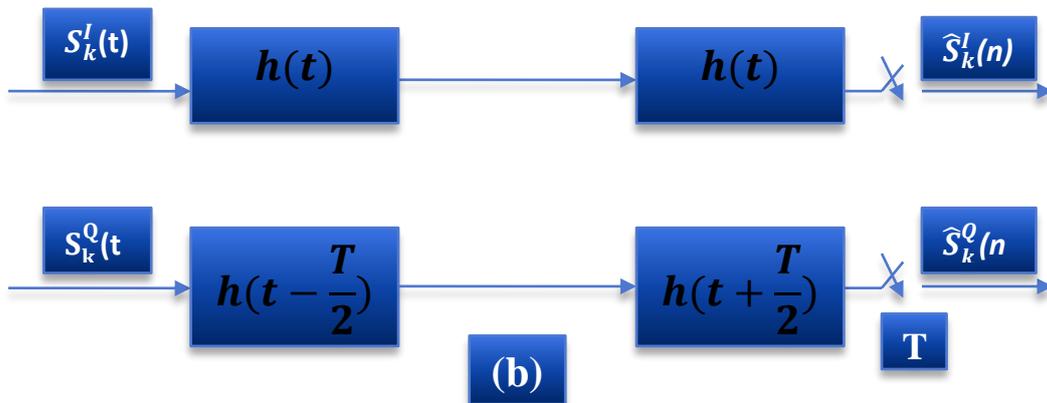


FIGURE II.21 : Interférence Inter Symbole (ISI) de la modulation OQAM [26].

(b) est déduit de (a) car $h(t)$ est une fonction à valeur réelle. La figure II.21

Présente l'interférence inter porteuse (ICI) de la modulation OQAM La partie Entre la $k+1$ ème et k ème sous porteuse. La figure II.22 montre l'interférence inter porteuse (ICI) de la modulation OQAM

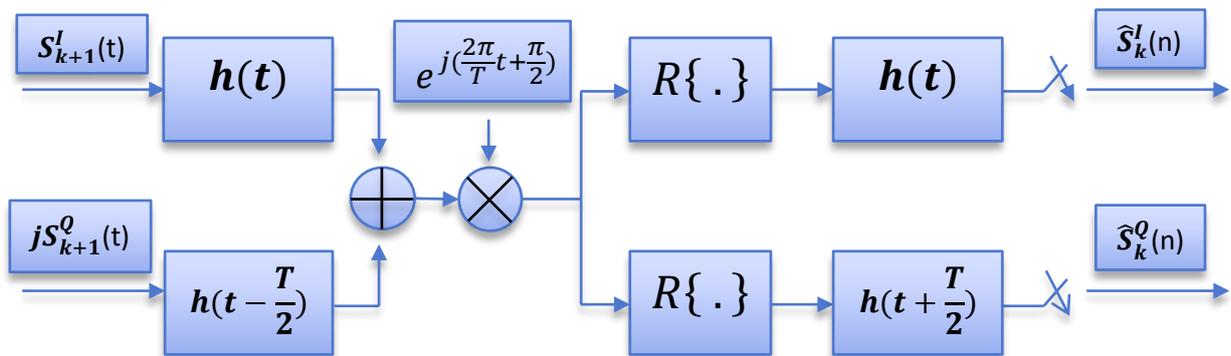


FIGURE II.23 : Interférence Inter Porteuse (ICI) de la modulation OQAM [26].

Ici, les sorties sont les termes d'ICI du $k+1$ ème au k -ème sous porteuse [35].

II.6. Implémentation efficace de FBMC / OQAM à base de filtre polyphasé :

L'implémentation d'un banc de filtres de synthèse et d'un banc de filtres d'analyse dans un système FBMC/OQAM est très complexe à mettre en œuvre. Pour réduire la complexité de calcul, on exploite la structure polyphasée des bancs de filtres de synthèse et d'analyse avec les

opérations IFFT/FFT. Un exemple de modulation FBMC c'est la modulation FBMC/OQAM à empilement pair. Le modèle FBMC / OQAM est équivalent au modèle d'opération 'Modified Discrete Fourier Transform (MDFT)' et à des structures d'implémentation efficaces fondées sur transformées de Fourier rapide (IFFT / FFT), au banc de synthèse et d'analyse. Les transformées de Fourier rapides sont accompagnés par filtrage polyphasé pour mettre en œuvre la sélectivité du sous canal. Les structures d'implémentation efficaces pour l'analyse et la synthèse des bancs sont esquissées dans la figure II.24.

Un MDFT avec des sous-bandes transportant des signaux modulés de niveau Q2-valeur complexe est détaillée à l'aide de l'opération GDFT. Par conséquent, les solutions de traitement de signal basé sur une implémentation peuvent facilement être ajustées avec un minimum de modifications pour fonctionner avec l'autre implémentation [28].

Sur la figure (II.24) a notez que les entrées du SFB sont purement réel et imaginaire de modulation OQAM, le signal sortant à partir de ce dernier passe par le block de la transformer de fourier rapide inversée le IFFT, ensuite le signal obtenu entre dans le bloc des filtres polyphasés $A_q(Z^2)$. En utilisant la conversion de P/S par le sur-échantillonnage de $M/2$, les signaux sortants réunissent pour être envoyés dans le canal et sur a figure II. 13-b reçus par le AFB par une opération inverse. Maintenant en utilisant la conversion de S/P par sous-échantillonnage $M/2$, Puis, le signale obtenu entre dans le bloc des filtres polyphasés $A_q(Z^2)$, ensuite passe par le bloc de la transformer de fourier rapide le FFT et après le signal passe par le bloc de modulation OQAM.

La figure (II.24) représente l'implémentation efficace de FBMC/OQAM bancs de filtres.

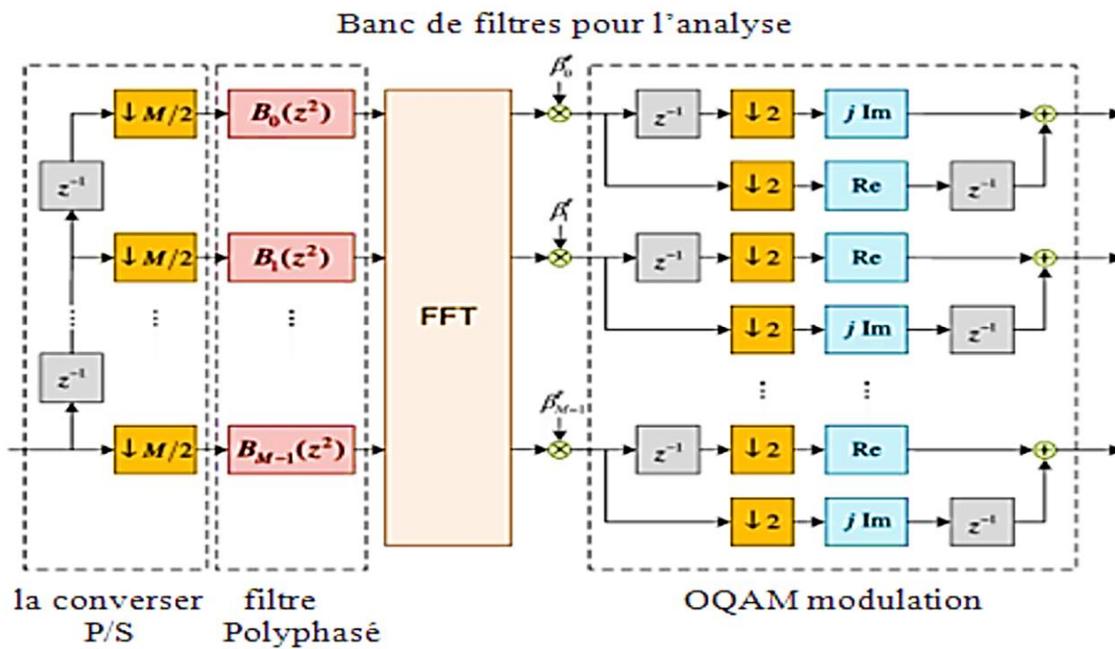
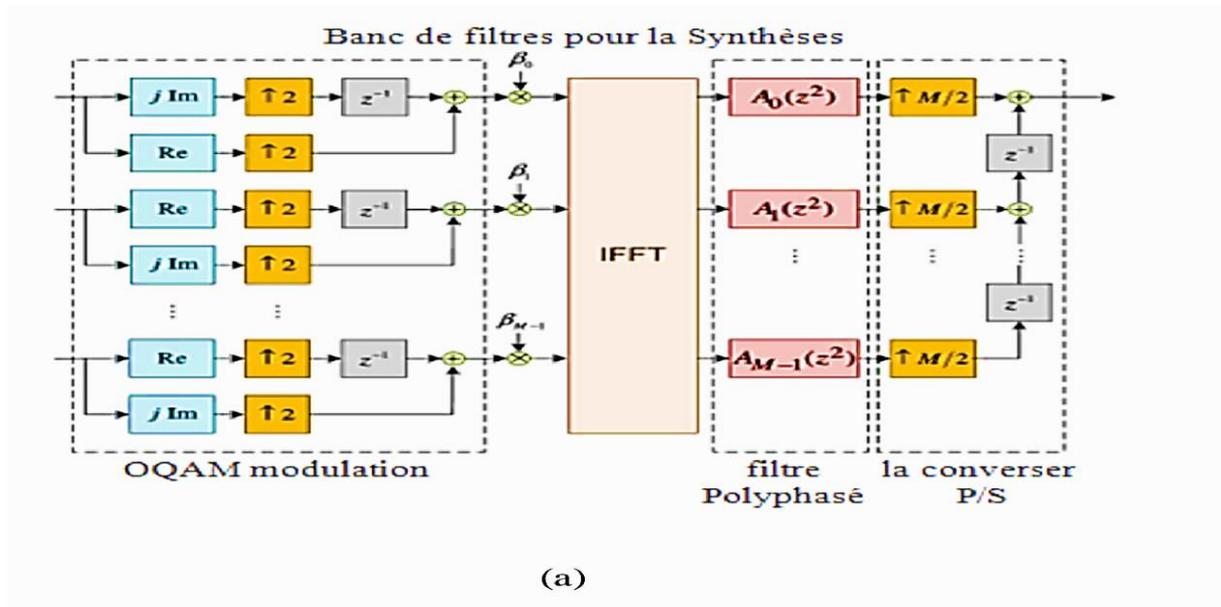


Figure II.24 : Implémentation efficace de FBMC / OQAM bancs de filtres.

II.7. Différences majeures entre OFDM et FBMC :

La figure II.25 présente la répartition la déférence entre l'OFDM et le FBMC

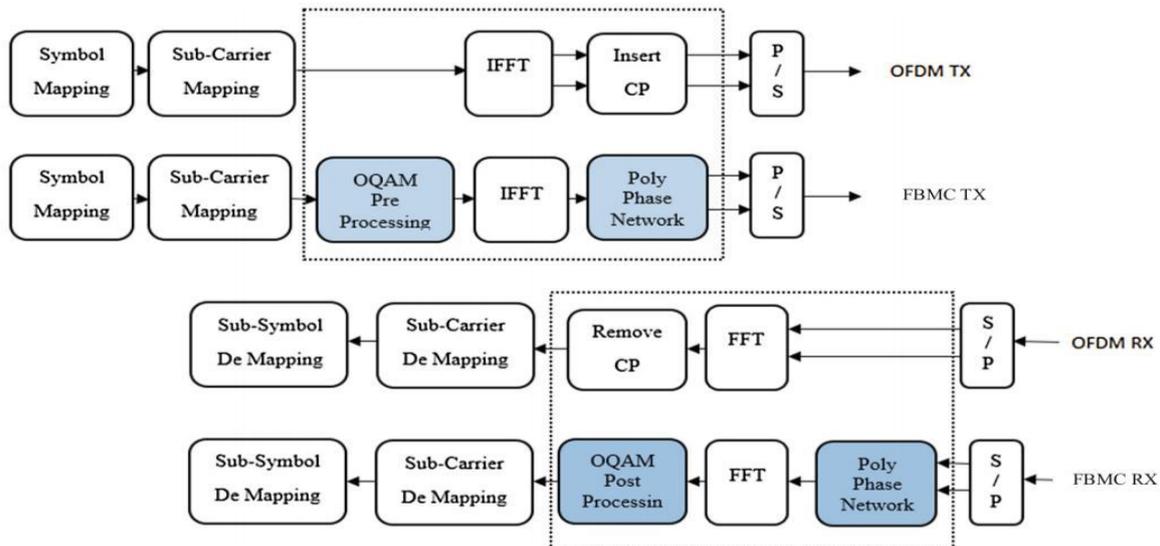


Figure II.25: déférence entre l'OFDM et le FBMC

Comparaison entre l'OFDM et l'OQAM-FBMC :

Les techniques multi-porteuses OFDM offrent de nombreux avantages :

- ✚ Moyen efficace pour combattre les effets des trajets muefficaci comme les interférences entre symboles grâce à l'insertion du préfixe cyclique et l'évanouissement sélectif du canal suite à la réduction de la bande dessous-porteuses.
- ✚ Encombrement spectral optimal par rapport aux autres techniques multi-porteuses conventionnelles.
- ✚ Implémentation facile et efficace de la modulation et démodulation grâce aux transformées de fourier rapide.
- ✚ Robustesse face aux bruits impulsifs.
- ✚ Simplicité de l'égalisation.
- ✚ Malgré ses nombreux avantages, la technique OFDM peut être limitée par certains inconvénients.
- ✚ L'insertion de l'intervalle de garde entraine considérablement une perte de l'efficacité spectrale.

- ✚ Le spectre du signal possède des lobes latéraux extrêmement élevés engendrant également une perte de l'efficacité spectrale et une fuite de puissance entre les sous-porteuses.

Afin d'améliorer l'efficacité spectrale, la technique multi-porteuses basée sur les bancs de filtre a été proposée. La différence entre les modulations OFDM et FBMC se trouve dans la propriété des fuites spectrales

La figure II.26 présente la répartition la comparaison en fréquence de l'OFDM et FBMC

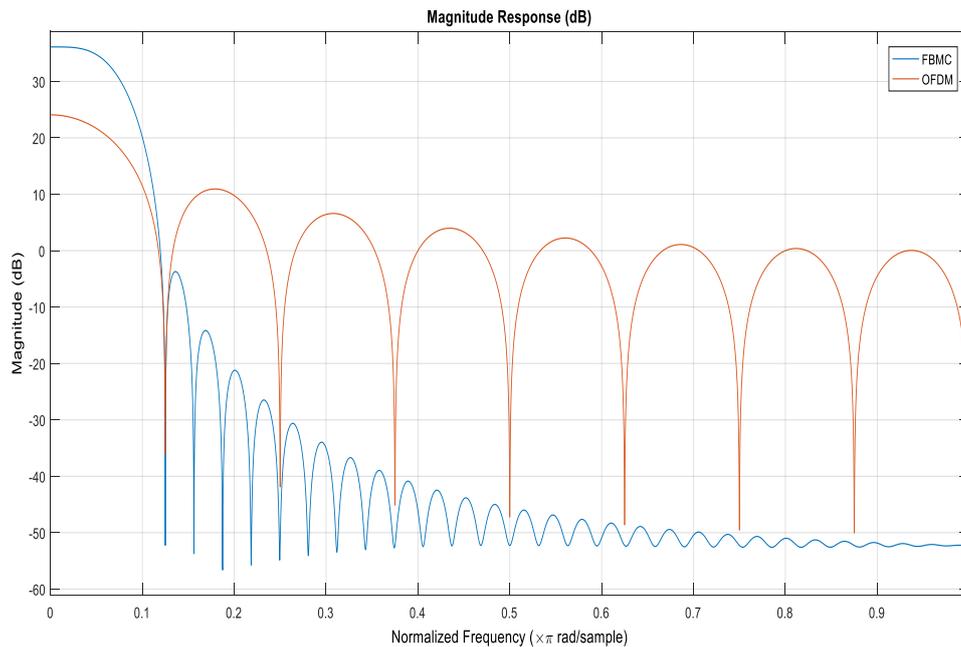


Figure 2.26 : Comparaison en fréquence de l'OFDM et FBMC

D'après la figure II.26, la modulation OFDM présente des lobes latéraux importants tandis que la modulation FBMC présente des lobes latéraux négligeables dans le domaine fréquentiel. La technique FBMC/OQAM a les caractéristiques suivantes :

- ✚ Aucun préfixe cyclique n'est nécessaire en raison de ses lobes latéraux faibles, la technique FBMC/OQAM est beaucoup moins sensible aux décalages temporels que la technique OFDM.
- ✚ La technique FBMC/OQAM est moins sensible au décalage de fréquence résiduelle et est plus robuste à l'effet doppler.
- ✚ Dans la FBMC, la séparation des signaux se fait par filtrage.
- ✚ Il n'y a pas un tel besoin critique de synchronisation parfaite entre utilisateurs (une sous-porteuse vide proposée comme bande de garde entre deux utilisateurs asynchrones).

- ✚ Dans le cas de FBMC, la performance peut être facilement améliorée par l'intégration de certains des mécanismes compatibles de traitement des signaux de soutien comme les schémas de diversité et les schémas de codage.
- ✚ La modulation FBMC, est un meilleur choix pour remplir les trous du spectre [11].

Le tableau (II.2) ci-dessous la comparaison en fréquence de l'OFDM et FBMC

Propriété	OFDM	FBMC
Préfixe cyclique Extension	Un préfixe cyclique est requis dans OFDM et cela sacrifie la bande passante.	Préfixe cyclique non requis et cela préserve la bande passante.
IFFT/FFT	IFFT/FFT Utilisés comme dans leur forme standard, aucune modification	FFT/IFFT personnalisée Blocs utilisés
Modulation	Ordre supérieur de QAM pour full duplex par ex. QAM, 16QAM, 64QAM	Ordre supérieur de l'OQAM modulation pour plein duplex. Modulation QAM pour semi-duplex
Orthogonalité	A besoin Orthogonalité dans sous-porteuses	Nécessite l'orthogonalité dans sous-canaux adjacents seul
Filtre	Filtre de fenêtre en général	Filtre PHYDAS/ermite filtre prototype/IOTA filtre
La fréquence Exploitation	Divise la fréquence donnée en nombre de sous-porteuses	Divise le donné fréquence en nombre de sous-canaux

Le tableau (II.2) Comparaison en fréquence de l'OFDM et FBMC.

II.8. Les avantages et les inconvénients de la modulation FBMC :

II.8.1. Les avantages :

- ✓ L'un des avantages sur la modulation FBMC que l'impulsion dans le domaine fréquentiel et temporel est bien localisée.
- ✓ N'est pas besoin d'insérer un préfixe cyclique.
- ✓ Fournir spectre efficace et un système plus sélectif

II.8.2. Les inconvénients :

- ✓ Le problème est la grande complexité d'implémentation de PPN.
- ✓ Fournir brouilleurs à bande étroite robustes

II.9. Conclusion :

La technique OFDM est largement utilisée dans les réseaux sans fil mais présente des limites en termes d'efficacité. Les futurs réseaux 5G sont envisagés avec la technique FBMC. La technique FBMC, contrairement à l'OFDM, ne nécessite pas de préfixe cyclique et des petites bandes de garde sont suffisantes pour supprimer les interférences entre porteuses. Elle exploite la totalité de la période du symbole et possède de faibles lobes latéraux. Elle est beaucoup moins sensible aux décalages temporels que la technique OFDM. En outre, la technique FBMC/OQAM est moins sensible au décalage fréquentiel résiduelle et est plus robuste contre l'effet doppler.

La complexité est considérée comme l'inconvénient du système FBMC/OQAM, mais cette complexité est réduite par l'utilisation de la structure polyphasée (PPN).



Chapitre III :

Résultats et simulation



III.1. Introduction :

Après avoir finalisé la partie théorique, nous allons exposer les résultats expérimentaux de simulation en utilisant le logiciel Matlab. Nous allons établir une étude comparative entre deux techniques de type multi-porteuses : le FBMC et l'OFDM. La simulation est faite pour l'évaluation des performances des deux systèmes en termes d'efficacité spectrale et de BER.

III.2. Logiciel de simulation : MATLAB

Le logiciel matlab constitue un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique destiné aux ingénieurs, aux techniciens et aux scientifiques, c'est un outil très utilisé, dans les universités comme dans le monde industriel, qui intègre des centaines de fonctions mathématiques et d'analyse numérique (calcul matriciel, traitement de signal, traitement d'images, visualisations graphiques, etc.).

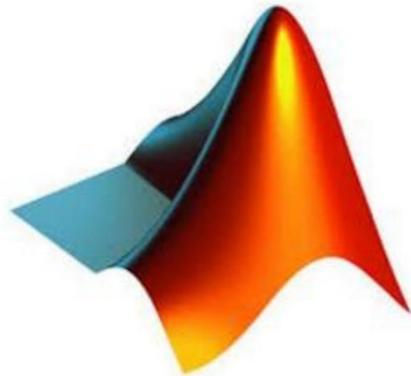


Figure III.1 LOGO de Matlab.

Matlab était à l'origine un logiciel libre, écrit en fortran, repris dans les années 1980 par la société « The Math Works » qui l'a entièrement réécrit et industrialisé, il est devenu un environnement de calcul scientifique puissant, riche et ergonomique, et s'est imposé au fil des années comme leader.

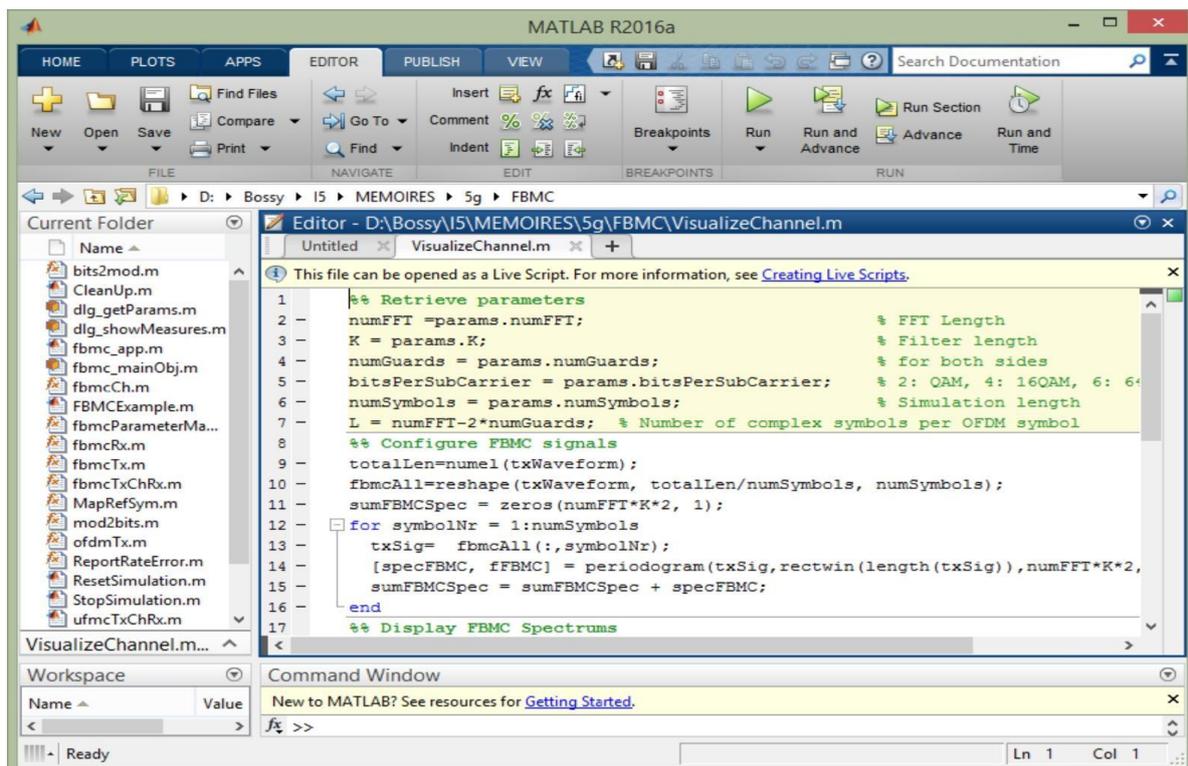


Figure III.2 : Interface Matlab.

Les avantages relevés pour la solution Matlab sont :

Sa richesse : l'environnement Matlab comporte une palette d'outils s'adressant à de très nombreux domaines. Par exemple, l'intégration dans un seul environnement homogène de l'ensemble des outils permettant la conception fiable d'un système de contrôle, jusqu'à son prototypage en temps réel, constitue un atout déterminant.

La finition : l'offre matlab constitue un ensemble cohérent, soigné et fiable. Ce sont des qualités plus difficiles à obtenir lorsque les développements sont issus d'une communauté décentralisée et moins organisée, comme souvent dans le domaine du logiciel libre.

C'est un standard de fait, enseigné dans la plupart des écoles et utilisé dans la plupart des grandes entreprises, ce qui facilite les échanges entre utilisateurs.

Les développements sont assurés par une équipe de plusieurs centaines d'informaticiens, qui assurent une évolution permanente du logiciel et la sortie régulière de nouvelles versions comportant chaque fois davantage de fonctionnalités.

La documentation livrée avec matlab est complète et professionnelle. La qualité de la documentation est un des points faibles couramment reprochés à d'autres logiciels de son genre.

Les versions de matlab sont largement testées avant d'être diffusées. Même s'il subsiste toujours quelques problèmes dans les premières versions d'une release, elles sont d'un niveau de fiabilité élevé.

Après cette brève comparaison, on a choisi matlab pour notre simulation.

III.3. Définition des paramètres de mesure de la performance d'un système :

III.3.1. Taux d'erreurs binaires :

Le taux d'erreurs binaires (BER : Bit Error Rate) permet d'évaluer la qualité d'une transmission optique. Il peut être déterminé en comparant la séquence de données binaires émise et celle reçue car il est défini par le rapport du nombre de bits erronés sur le nombre total de bits transmis

$$BER = \frac{\text{nombre de bits errones}}{\text{nombre de bits recus}} \quad (\text{III.1})$$

III.3.2. Le rapport signal à bruit (SNR) :

Il a été retenu parce que le bruit est permanemment présent sur les canaux choisis. Le rapport signal à bruit (SNR : Signal to Noise Ratio), est un indicateur du niveau de perturbation du signal par le bruit. Il s'exprime en dB et d'après la formule :

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{pS}{pB} \quad (\text{III.2})$$

Où PS est la puissance moyenne du signal et PB la puissance moyenne du bruit. Les deux puissances étant prises en watts. Le rapport signal sur bruit (SNR) représente la différence entre la puissance du signal d'un système reproduit par rapport à la puissance ou l'amplitude de son bruit de fond. Selon la théorie de Shannon de l'information, la capacité maximale d'un canal de la bande passante W, avec une puissance de signal S, affecté par le bruit blanc de puissance moyenne N, est donnée par :

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{III.3})$$

III.3.2.1. Densité spectrale (PSD) :

La densité spectrale représente la force du signal sur une période de temps (c'est-à-dire) la bande passante possible sur laquelle les bits peuvent être envoyés avec succès. La densité spectrale d'une modulation est efficace si l'intensité est plus proche de la fréquence normalisée.

III.4. Résultat de simulation du filtre prototype :

Le filtre prototype est facile à programmer sur matlab en choisissant sa réponse impulsionnelle et les coefficients du filtre. Il est important de signaler que le filtre prototype PHYDYAS dépend uniquement du facteur de chevauchement K et ne dépend pas de la longueur du filtre.

III.4.1. Influence du paramètre K sur la conception du filtre :

Figure III.3 montre la réponse impulsionnelle du filtre prototype PHYDYAS pour différentes valeurs de K

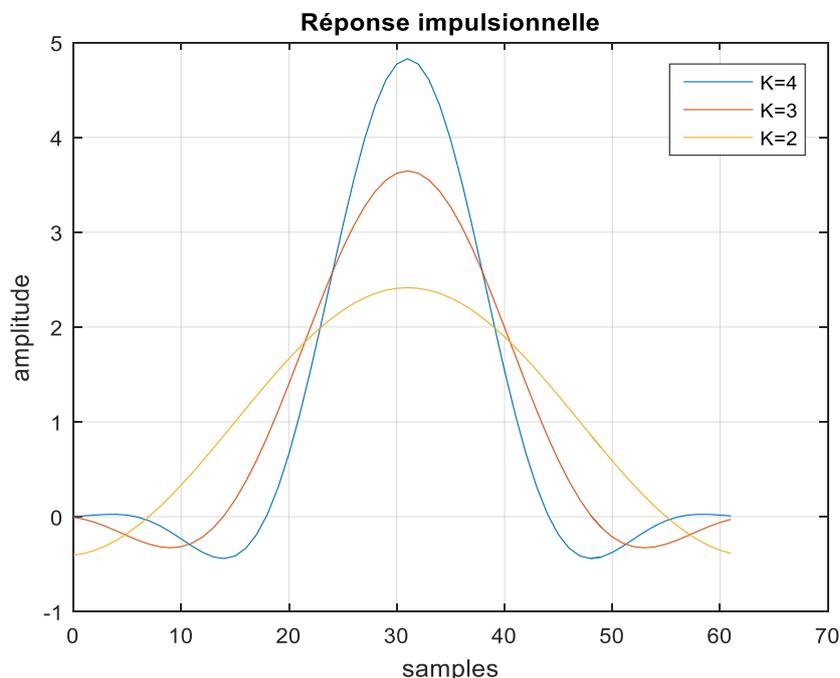


Figure III.3 : Réponse impulsionnelle du filtre prototype PHYDYAS pour différentes valeurs de K .

On remarque que la réponse impulsionnelle correspondant au facteur de chevauchement $k=4$ représente une meilleure approximation en termes d'étendue temporelle.

La figure III.4 représente la réponse fréquentielle du filtre prototype PHYDYAS en variation de K .

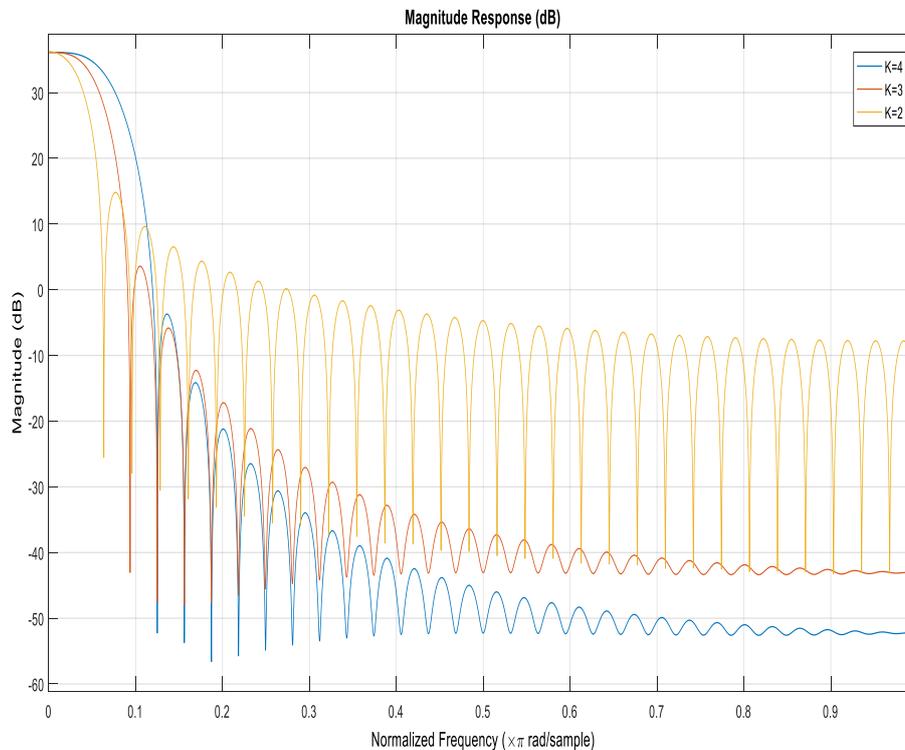


Figure III.4 : Réponse fréquentielle du filtre prototype PHYDYAS pour différentes valeurs de K .

Sur la figure III.4, on peut observer que lorsque K diminue les lobes hors bande augmentent et la bande passante se réduit. La valeur choisie pour le facteur de chevauchement K est donc directement liée à la sélectivité et à l'accroissement des lobes hors bande. Par conséquent, le taux d'interférence est sensiblement influencé par la valeur du facteur K .

On observe que les niveaux du 1er lobe secondaire sont presque égaux pour $K=3$ et $K=4$ avec un écart par rapport à la valeur crête égale à 60 dB, mais la sélectivité est meilleure pour $K=3$ de 24%, ce qui nous conduit à proposer de tester l'implémentation du système avec $K=3$ dans de futurs travaux. Pour $K=4$, on observe clairement que les ondulations hors bande sont presque négligeables, ce qui montre la haute sélectivité de cette conception spécifique de filtre.

Nous remarquons que le filtre le plus efficace qui s'atténue pour $k=4$ au domaine temporel et de même dans le domaine fréquentiel car l'allure de la fenêtre du filtre décroît presque verticalement, les ondulations au bord s'atténue de manière finie.

III.4.2. Comparaison du filtre OFDM avec le filtre prototype FBMC :

Dans notre simulation, pour une visualisation claire de la réponse fréquentielle (figure III.5) des filtres de la FBMC et OFDM on a choisie $K=4$ et nombre de sous-canaux $M=16$. $K=4$ produira une différence de 40 dB entre le lobe principal et le premier lobe secondaire de la réponse fréquentielle du filtre.

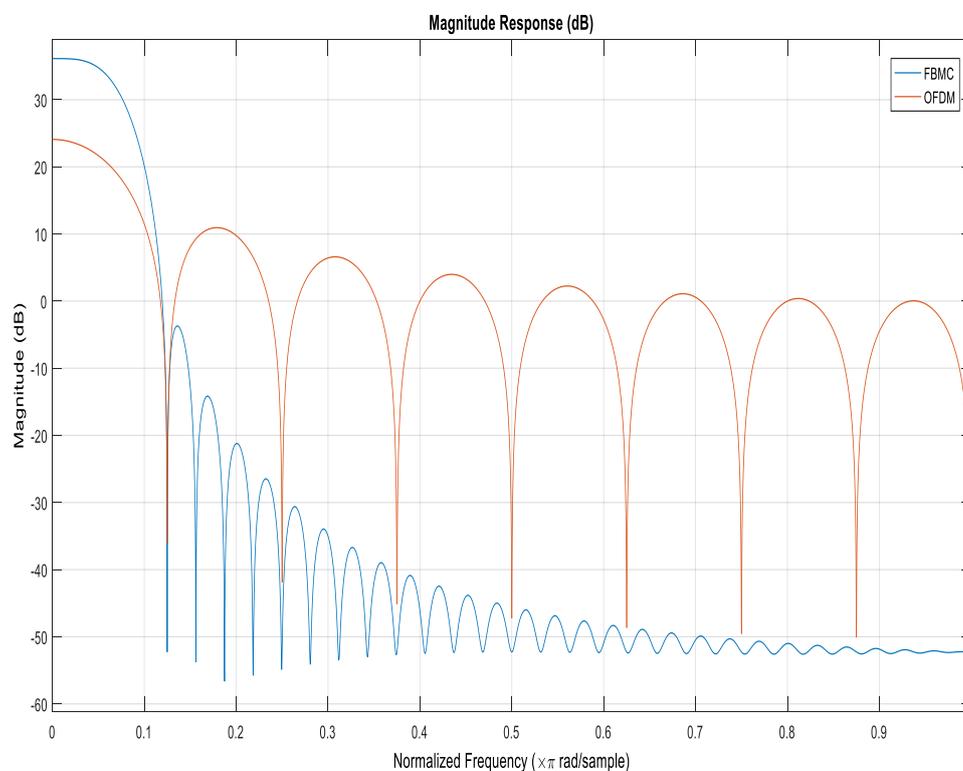


Figure III.5 : Réponses d'amplitude de filtre de la FBMC et OFDM.

La figure III.5 montre une comparaison pour une sous-porteuse FBMC et OFDM. Il peut être observé que la modulation OFDM possède des lobes latéraux importants, qui imposent des contraintes d'orthogonalité stricte pour toutes les sous-porteuses. Au contraire, la modulation FBMC a des lobes latéraux négligeables dans le domaine fréquentiel. Avec une fuite spectrale très limitée, une analyse spectrale de haute résolution et de faibles interférences sur les bandes de fréquences adjacentes peut être atteinte. Nous comparerons les réponses en amplitude du filtre pour 3 sous-porteuses dans le cas de l'OFDM et du FBMC :

Pour $k=4$:

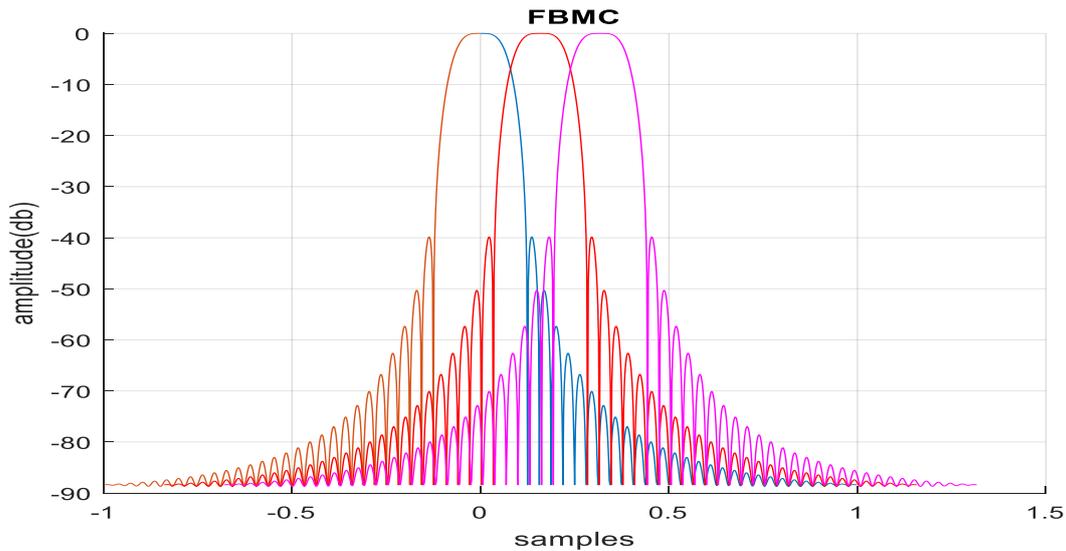


Figure III.6 : trois sous-Porteuses FBMC (K=4).

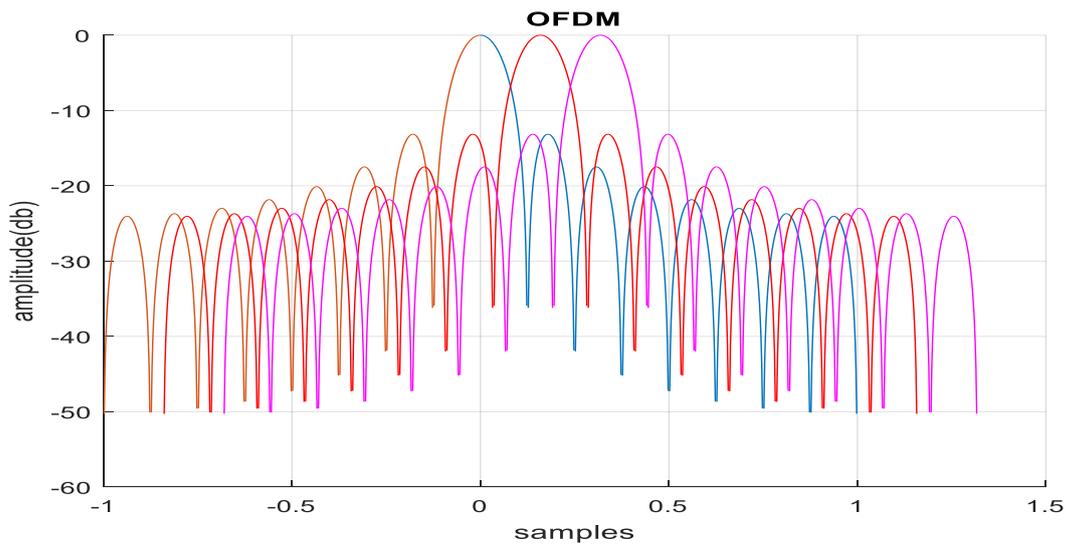


Figure III.7 : trois sous-Porteuses OFDM (K=4).

Les figures montrent que l'OFDM souffre d'une mauvaise sélectivité spectrale par rapport à FBMC. Nous avons conclu que la longueur de filtre prototype PHYDYAS ($L = (MK) - 1$) des facteurs de chevauchement ($k=4$) est introduite la meilleure efficacité spectrale. Ce résultat de comparaison confirme l'efficacité spectrale de la réponse du filtre prototype FBMC par rapport à celle de l'OFDM classique.

III.5. Densité spectrale de puissance :

La figure III.8 illustre la densité spectrale de puissance (DSP) de l'OFDM et l'FBMC/OQAM

Pour un nombre de points de transformé de fourrier égal à 512.

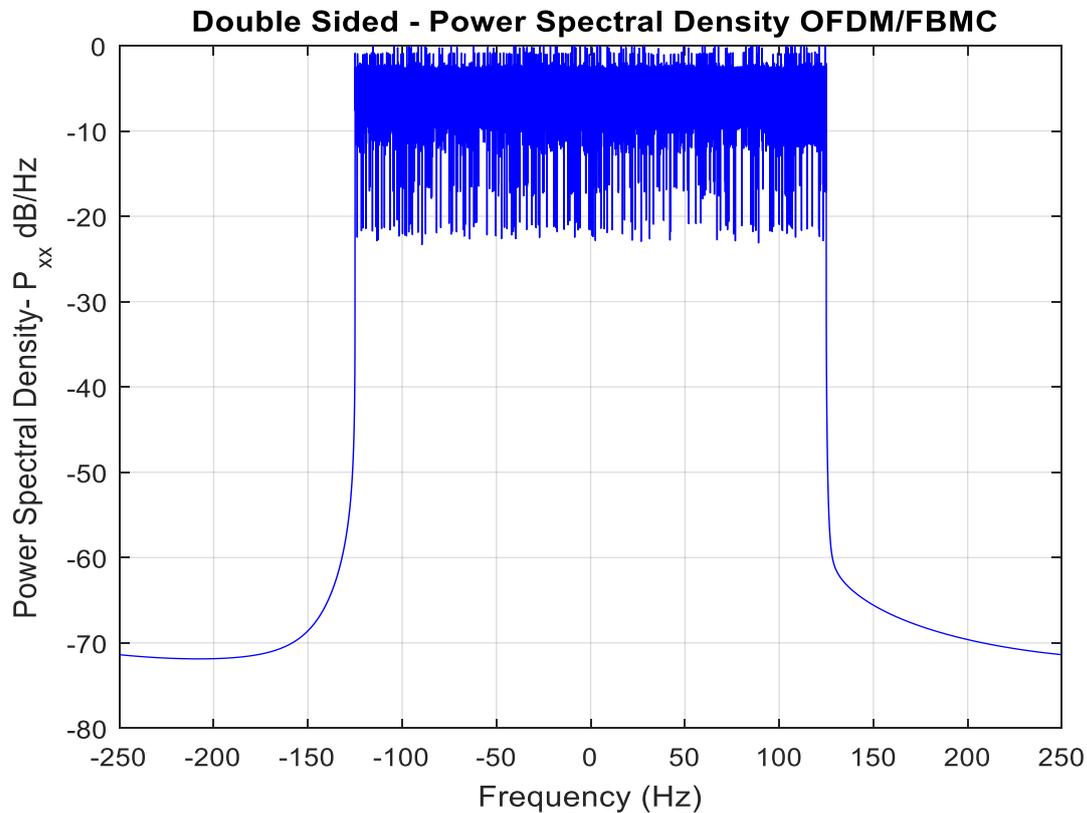


Figure III.8 : la densité spectrale de puissance pour FBMC

De la figure on peut constater que la bande d'arrêt (stop band) sur les deux côtés de la bande Passante de FBMC/OQAM est beaucoup meilleure que celle de l'OFDM. C'est grâce Aux lobes secondaires de l'FBMC qui sont très infimes qu'on a une telle forte atténuation ce qui nous permet de ne pas sacrifier de larges bandes de garde comme c'est le cas pour OFDM. Par conséquent, le spectre de FBMC/OQAM est plus avantageux par rapport à l'OFDM en

Offrant une efficacité spectrale supérieure

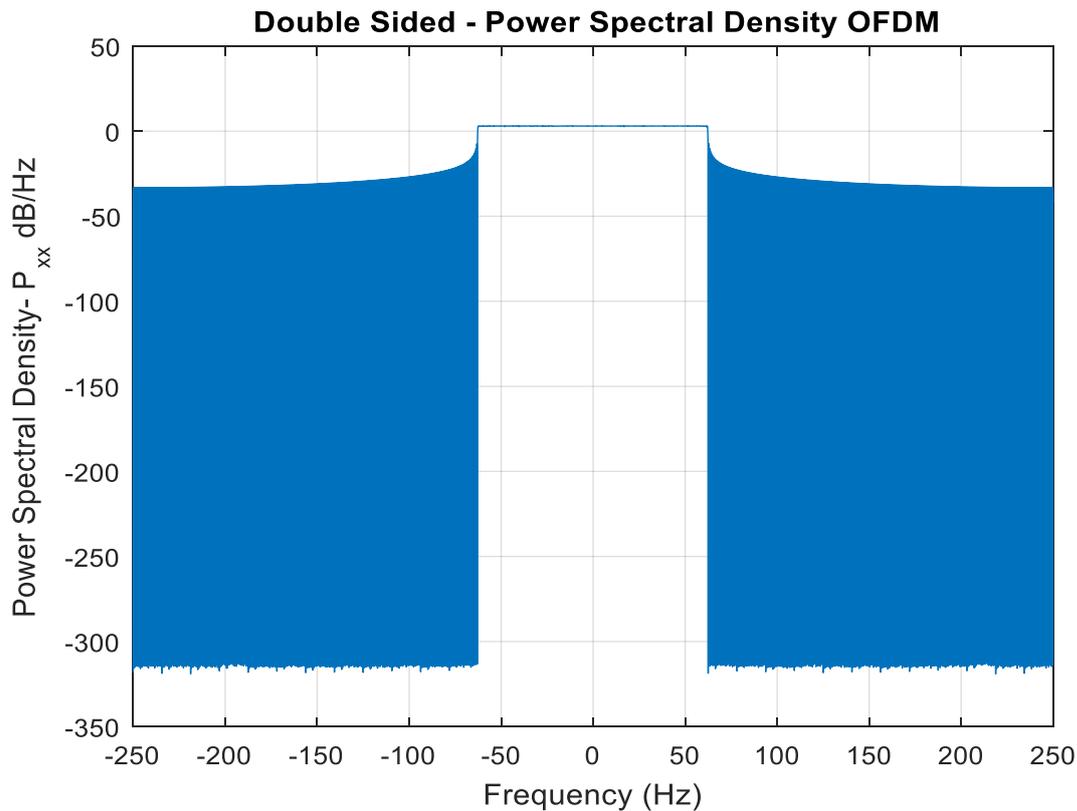


Figure III.9 : la densité spectrale de puissance pour OFDM.

III.6. Comparaison de BER pour trois choix du nombre de porteuses M :

La simulation est réalisée en considérant deux types de canaux à savoir : le canal AWGN et le canal de rayleigh pour l'OFDM.

III.6.1. Résultats des simulations pour un AWGN :

La figure III.10 montre le BER d'un système FBMC-OQAM pour différentes valeurs de K , 256 porteuses et une modulation de type QPSK.

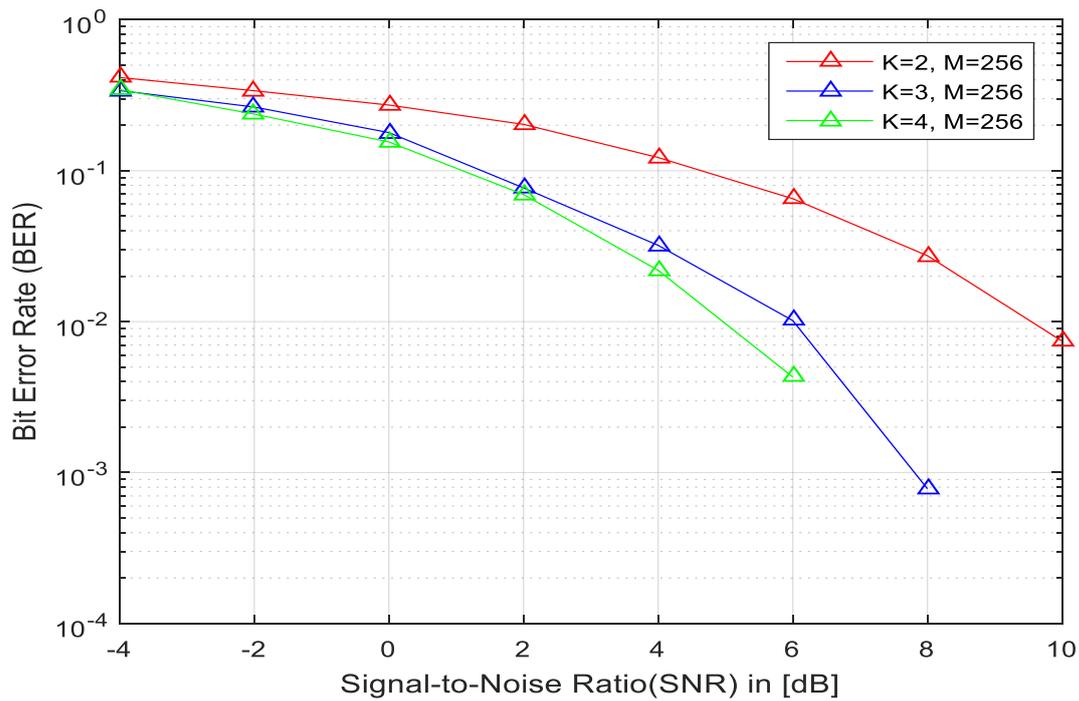


Figure III. 10 : BER d'un système FBMC-OQAM pour différentes valeurs de K, une modulation QPSK et M=256.

La figure III.11 montre le BER d'un système FBMC-OQAM pour différent nombre de porteuses (64, 256 et 1024) et une modulation de type QPSK et un ordre du filtre prototype (K=2).

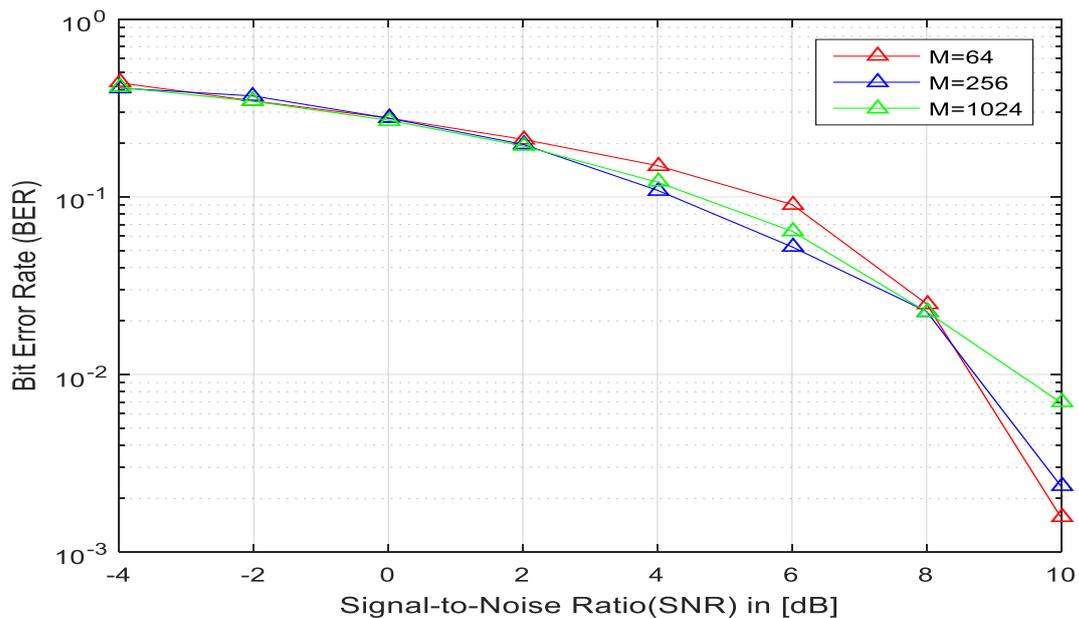


Figure III.11: BER d'un système FBMC-OQAM pour une modulation QPSK et K=2.

La figure III.12 montre le BER d'un système FBMC-OQAM pour différent nombre de porteuses (64, 256 et 1024) et une modulation de type QPSK et un ordre du filtre prototype ($K=4$).

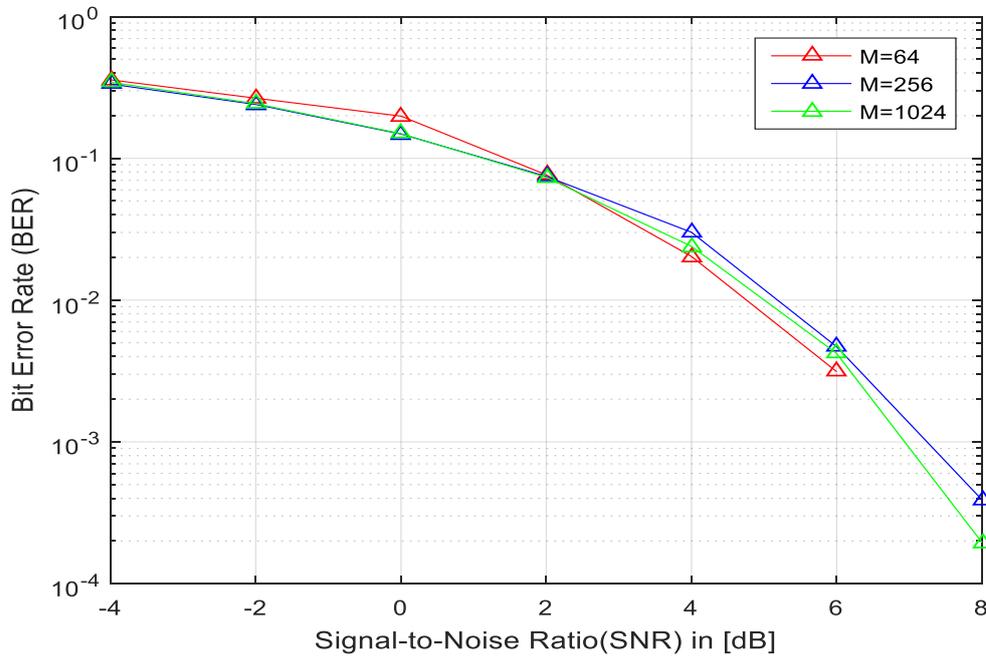


Figure III. 12 : BER d'un système FBMC-OQAM pour une modulation QPSK et $K=4$.

La figure III.13 montre le BER d'un système de type OFDM pour 64 et deux types de modulation 16-QAM et BPSK.

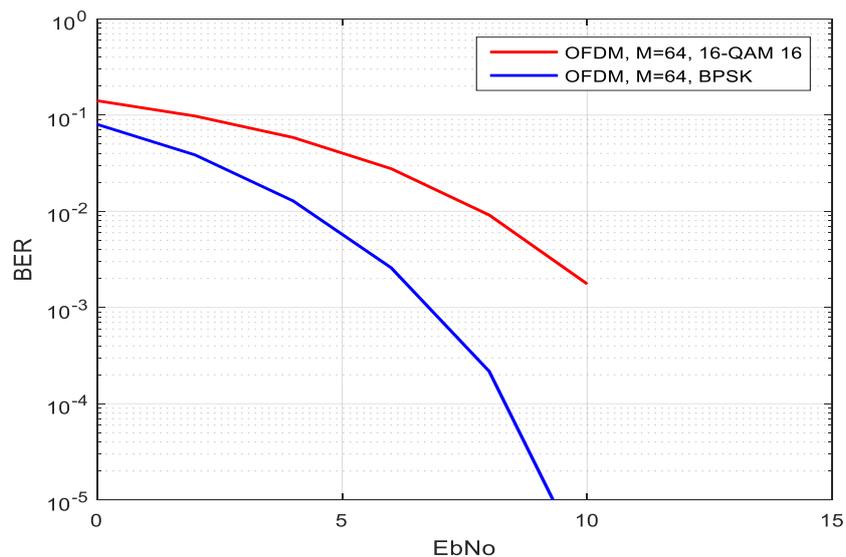


Figure III.13 : BER d'un système de type OFDM pour 64 porteuses et deux types de modulation 16-QAM et BPSK.

III.6.2. Résultats des simulations pour un canal de type Rayleigh

La simulation cette fois-ci est réalisée juste pour l'OFDM où l'effet du multi-trajets est annulé par l'insertion d'intervalle de garde (préfixe cyclique) contrairement au FBMC qui nécessite des techniques d'égalisation très complexes et très couteuse en terme du temps d'exécution.

La figure III.14 montre le BER d'un système de type OFDM pour 64 porteuses, une modulation 16-QAM, un canal multi-trajets de retards [0 3 5 6 8] et un intervalle de garde égal à 16.

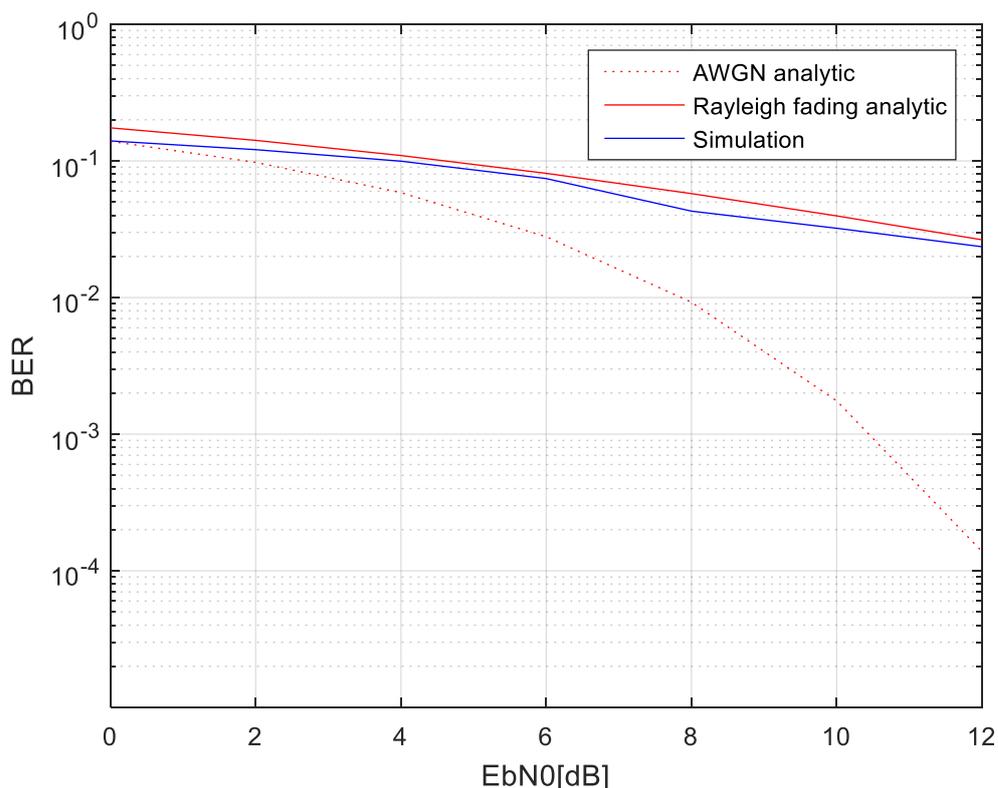


Figure III.14 : BER d'un système de type OFDM sur canal de type Rayleigh.

On remarque que le graphe du BER analytique et le BER calculé par simulation se sont presque confondus.

III.7. Conclusion :

L'OFDM utilise un CP c'est-à-dire ajout de quelques symboles déjà transmis, ce qui réduit le débit de données et augmente la durée de transmission, aussi l'utilisation d'un filtre rectangulaire par l'OFDM fait que les lobes secondaires émises autour de la bande sont nuisibles aux autres systèmes dans les bandes adjacentes. Mais À partir des résultats de simulation effectuée nous pouvons conclure que la modulation FBMC est plus complexe par

rapport à la modulation OFDM parce que nous avons remarqués que le temps d'exclusion du programme de la modulation FBMC est plus long, en plus nous avons constatés que plus l'ordre de modulation augmente plus le BER augmente, le spectre du FBMC est plus localiser que le spectre du OFDM au domaine fréquentiel et temporel.



Conclusion

Générale



Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce projet de recherche rentre dans le cadre de l'étude de la communication sans fil. Il traite la problématique suivante : comment améliorer les performances de transmission dans les réseaux mobiles sans fil grâce à des techniques plus avancées ? Durant les dernières décennies, les exigences d'utilisations destinées aux communications sans fil, sont devenues de plus en plus nombreuses, d'où la nécessité d'avoir des débits de transmission plus importants. Dans le premier chapitre, nous avons mené une étude sur le développement la cinquième génération (5G) des réseaux cellulaires, et les techniques utilisées dans cette génération et leurs architecture qui diffère aux générations précédents. Ce réseau travaille sur l'augmentation du débit et gère un grand nombre de cas et des exigences d'utilisations, une connectivité 1000 fois supérieur à celle de 4G, une consommation faible d'énergie, une latence zéro, et pour arriver à ces exigences la 5G utilise les ondes millimétriques (30GHz-300GHz) car elle est capable de fournir des fréquences très élevées et des bandes plus larges par rapport à la 4G.

Dans ce mémoire, nous avons étudié une problématique en communications numériques basée sur le traitement du signal, et le principal objectif de ce projet est d'élaborer la simulation comparative des techniques FBMC et OFDM pour des canaux sans fils. La simulation que nous avons réalisée a permis de montrer les intérêts d'une modulation et démodulation FBMC d'un point de vue de taux d'erreurs binaires (BER) et le profil de puissance (PSD), ainsi que le type de filtre Prototype et le genre du canal. Les résultats nous permettent de constater que le genre du filtre influe sur le système FBMC par l'élimination d'OOB et la réduction d'interférence entre symbole. En outre, les meilleurs résultats sont obtenus par le filtre PHYDYAS.

En fin, on peut conclure que FBMC donne une amélioration globale de la performance par rapport à OFDM classique et la modulation multi porteuses FBMC fait partie des candidats les plus prometteurs pour la 5G .

Bibliographe

Bibliographe

- [1] : BOUCHENTOUF, Hadjer et STAMBOULI, R. Boudghene. Etude des performances des réseaux 4G (LTE). *Mémoire de master, Département de génie électrique et électronique, Option: réseaux mobiles et services (RMS), Faculté de technologie, université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen*, 2013..
- [2] : AMEL, Bachatene. *Filtrage par réseaux de neurones des non linéarités dans une transmission OFDM*. 2014. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [3] : داسي, كوثر, ضو, *et al.* Etude de massive MIMO pour 5G. 2019.
- [4] : REZGUI, Badreddine. Conception d'un système de communication sans fils multi-porteuses à base de Bancs de filtres FBMC. 2019.
- [5] : https://www.google.dz/search?q=architecture+4G&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ve=0ahUKEwjn1660_6TNAhUB1x4KHfZiD9kQ_AUICCGB#imgrc=eLoDlwZy7CaQeM%3A
- [6] : ROCHE, Edward M., TOWNES, Walker, *et al.* La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation). *Netcom. Réseaux, communication et territoires*, 2018, no 32-1/2, p. 139-162.
- [7] : SADOU, Bachir, ALQUDAMI, Dheya Alhak, et ZAAIMIA, Mohammed Zakarya Encadreur. *Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobiles 5G de nouvelle génération*. 2020. Thèse de doctorat. Université de Jijel.
- [8] : MOUTALY, Emine. *Etude d'une architecture radio-sur-fibre pour le fronthaul 5G*. 2019. Thèse de doctorat. Université Paris-Est; Université de Nouakchott.
- [9] : MICHAÏLOW, Nicola, GASPAR, Ivan, KRONE, Stefan, *et al.* Generalized frequency division multiplexing: Analysis of an alternative multi-carrier technique for next generation cellular systems. In : *2012 International symposium on wireless communication systems (ISWCS)*. IEEE, 2012. p. 171-175..
- [10] : AL MAMUN, Abdullah, ANWAR, Sultan, et ALI, Hassan. 4G and 5G Mobile Communication Networks: Features Analysis, Comparison and Proposed Architecture. *Dept. of Computer Engineering, King Fahd University of Petroleum & Minerals, KSA*, 2016.

Bibliographe

- [11] : MERIEM, Bendahmane Amira et RANIA, Ghermoul. Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC. *Mémoire de Master, Département Electronique, Université de Tlemcen, Algérie*, 2018.
- [12] : KHADIDJA, HADJ MEKHACHE et ACHA, REGUIBI R. ETUDE ET IMPLEMENTATION DES MODULATIONS MULTIPORTEUSES POUR LA 5G. 2019.
- [13] : S. Hayin, Communication systems, Wiley New York 1994.
- [14] : J.G. Proakis, Digital Communications, 3rd Ed, New York: McGraw Hill, 1995.
- [15] : Annick Le Glaunec ,Modulations M LE GLAUNEC, Annick. Modulations multiporteuses. *Rapport, Université de Supélec, <http://www.supelec-rennes.fr/ren/perso/aleglaun>*, 2000. multiporteuses
- [16] : DAOUD Khedidja , Réseaux et Systèmes de Télécommunication, Juin 2016
- [17] : HNIA, H. B., KACHOURI, Abdennaceur, BELGHITH, Ossama BEN, *et al.* al, "Etude des performances de la modulation ofdm pour l'utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4g,". *Mars*, 2004.
- [18] : RACHINI, Ali. *Etude de la synchronisation temporelle dans les systèmes MIMO-OFDM appliqués aux réseaux mobiles*. 2014. Thèse de doctorat. Rennes, INSA..
- [19] : Hasnaoui Saida & Nouas Wissam, « Allocation efficace des bits pour un système Multi- porteuses OFDM », mémoire de master en réseaux & télécommunications, Département d'électronique, université de blida1, Page 17- 27-30, 2013.
- [20] : FRANCO, G. et LACHS, G. An orthogonal coding technique for communications, 1961 IRE Intern. *Conv. Rec.*, p. 126-133.
- [21] : PELED, Abraham et RUIZ, Antonio. Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms. In : *ICASSP'80. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. IEEE, 1980. p. 964-967.
- [22] : LES ENJEUX DE LA 5G, RÉPUBLIQUE FRANÇAISE, Mars 2017
- [23] : ZOUHEIRA, B. et HADJRA, Z. Effet d'HPA sur le Système SC-FDMA. *Mémoire Master, Université Echahid Hamma Lakhdar-El Oued*, 2015.

Bibliographe

- [24] :BAUDOIN,Geneviève,VILLEGAS,Martine,BERCHER,Jean-François, *et al. Radiocommunications Numériques-Principe, Modélisation et Simulation. Tome 1.* Dunod, 2002..
- [25] : KADIONIK, Patrice. BASES DE TRANSMISSIONS NUMERIQUES Les modulations numériques. *Report, ENSEIRB, Bordeaux, 2000.*
- [26] : Mérouane Debbah. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).
- [27] : DILMI, Zakarya. *Les modulations multi-porteuses à base de bancs de filtres (FBMC).* 2020. Thèse de doctorat. Univ M'sila.
- [28] : HIDALGO STITZ, Tobias. Filter Bank Techniques for the Physical Layer in Wireless Communications. 2010.
- [29] : قریشي, خالد, موساوي, *et al.* Analyse des performances de FBMC dans un système de transmission sans fil. 2019.
- [30] : DALI Amina & BOUAFIA Zineb, Étude énergétique de la forme d'ondes multi porteuses à base de banc de filtres, MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER Réseaux et Systèmes de Télécommunications Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –2017
- [31] CHERUBINI, Giovanni, ELEFTHERIOU, Evangelos, et OLCER, Sedat. Filtered multitone modulation for VDSL. In : *Seamless Interconnection for Universal Services. Global Telecommunications Conference. GLOBECOM'99.(Cat. No. 99CH37042).* IEEE, 1999. p. 1139-1144.
- [32] : FARHANG-BOROJENY, Behrouz et BRUFANI, Hotel. Filter Bank Multicarrier (FBMC): An Integrated Solution to Spectrum Sensing and Data Transmission in Cognitive Radio Networks. 2009.
- [33] : SKRZYPCZAK, Alexandre. Contribution à l'étude des modulations multiporteuses OFDM/OQAM et OFDM suréchantillonnées. *PhD thesis, 2007.*
- [34] :Medjahdi, Y. 2012. Interference modeling and performance analysis Of asynchronous OFDM and FBMC wireless communication systems.Conservatoire national des arts et metiers-CNAM
- [35] : سلسبيل, بحري, تماسيني, *et al.* Analyse des performances de FBMC-OQAM. 2020.

Bibliographe

[36] : BASHEER, Atif et HABIB, Aamir. Filter bank multi carrier based MIMO system for 5G wireless communication. In : *2016 1st International Workshop on Link-and System Level Simulations (IWSLS)*. IEEE, 2016. p. 1-6.

[37] GAAD, M., & RAHMI, B. Conception et réalisation d'un émetteur OFDM à base d'une carte RASPBERRY PI (Doctoral dissertation).

[38] Guéguen, E. (2009). Etude et optimisation des techniques UWB haut débit multibandes OFDM (Doctoral dissertation).

[39] Datta, R., Fettweis, G., Koll, Z., & Horv, P. (2011, August). FBMC and GFDM interference cancellation schemes for flexible digital radio PHY design. In 2011 14th Euromicro Conference on Digital System Design (pp. 335-339). IEEE.