



**République Algérienne Démocratique et
Populaire**

**Ministère de l'enseignement Supérieur
Et de la Recherche scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes de Télécommunication

Thème

Analyse des performances de FBMC-OQAM

Réalisé par :

- Bahri Salsabil
- Rima Medelel
- Temasini Asma

Soutenu en septembre 2020 devant le jury composé de :

M. Boulila Mohammed

MAA

Président

M. Madjouri Abdelkader

MCB

Examineur

M. KHELIL Abdellatif

MCA

Directeur du mémoire

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2019/2020

REMERCIEMENTS

Nous rendons grâce à ALLAH de nous avoir donné le courage et la volonté.

Ainsi que nous remercions nos chers parents, pour leurs sacrifices, aides, soutiens et encouragements; afin que nous effectuions cette formation de master dans les meilleures conditions.

Nous tenons à remercier vivement notre promoteur

" Dr. KHELIL Abdellatif "

pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances, qu'il nous a apportées durant notre recherche.

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, qui nous ont donné les bases de la science et l'aides inestimables.

Aussi, nous entrons d'une large porte pour remercier très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examineur.

Nous tenons à remercier aussi l'ensemble du personnel de faculté de technologie et surtout du département de génie-électronique.

Merci à toute personne qui a participé de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Nous dédions mon travail à mes parents,

Mes sœurs et mes frères,

Tout la famille, mes amis, mes collègues de fin de cycle,

Et tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à

L'élaboration de ce modeste mémoire sans pour autant
oublier mon encadreur qui mérite une dédicace spéciale pour
leur effort qui m'a consacré afin de réussir ce travail.

Résumé

La modulation FBMC-OQAM se positionne comme un candidat potentiel pour les futurs systèmes de communication. Le but de cette thèse est de comparer les techniques de modulation 5G proposées FBMC-OQAM à l'OFDM qui est la technique de modulation utilisée dans les communications 4G. Dans ce travail, nous comparons la densité spectrale, le PAPR, le BER des techniques de modulation FBMC-OQAM et OFDM pour en analyser les mérites. Les résultats de la simulation montrent que le FBMC-OQAM a le BER inférieur, le PAPR plus élevé et les meilleures performances de densité spectrale par rapport à la modulation OFDM

Mots clés : FBMC–OQAM, HPA, CCDF, PAPR

Tableau des matières

Résumé.....	I
Tableau des matières.....	II
Liste de figures.....	VI
Liste de tableaux.....	VII
Abréviations.....	VIII
Introduction générale.....	1

Chapitre 1. Généralités Sur La 5G

1.1. Introduction	3
1.2. Définition	3
1.3. Système de la 5G.....	3
1.3.1 Architecture de la 5G	4
1.3.1.1. Les principes d'architecture sont les suivants	4
1.4. Objectif de la 5G	5
1.5. Technologies 5G	6
1.5.1. Les ondes millimétriques	7
1.5.2. Massive MIMO.....	7
1.5.3. Bandes millimétriques.....	8
1.5.4. Full Duplex.....	9
1.6. Catégories d'usage de la 5G.....	12

1.7. Caractéristiques de 5G	15
1.8 Les applications de la 5G	16
1.9. Les avantages	19
1.10. Conclusion.....	20

Chapitre 2. Modulation multi-porteuses à base de bancs de filtres FBMC

2.1. Introduction	21
2.2. Les modulations multi-porteuses	21
2.2.1. Principe de modulations multi porteuses	21
2.2.2 Caractéristiques des formes d'ondes multi-porteuses	22
2.2.2.1 Facteur de crête (PAPR).....	22
2.2.2.2 Rayonnements hors bande (Out Of Band (O.O.B))	23
2.3 La modulation OFDM	23
2.3.1 Principe.....	24
2.3.2 L'orthogonalité.....	25
2.3.3.Le préfixe cyclique.....	26
2.4 FBMC (Filter bank Multi Carrier)	27
2.4.1 Principe générale	27
2.4.2 Signal FBMC.....	27
2.5 OQAM-FBMC	29
2.5.1. Principe générale	29
2.5.2 Banc de filtre	30
2.5.3 Le bloc pré/post-traitement OQAM	32

2.5.3.1 OQAM pré-traitement	32
2.5.3.2 OQAM post-traitement	34
2.6. Types de FBMC	34
2.7 Conception de filtre de prototype	38
2.7.1 Le filtre PHYDYAS	38
2.7.2 Le filtre Hermite.....	39
2.7.3. Le filtre cosinus surélevé de la racine carré (SRRC)	40
2.8 Structure polyphasé	41
2.9 Les Avantages et les inconvénients de la modulation FBMC.....	41
2.9.1 Les Avantages	41
2.9.2 Les inconvénients	42
2.10. Peak to Average Power Ratio (PAPR).....	42
2.10.1 Définition de PAPR.....	42
2.10.2 Utilisation du PAPR.....	42
2.10.3 Etude PAPR.....	43
2.11 Amplificateur de puissance non linéaire HPA	45
2.11.1 Notion de rendement	46
2.11.2 La caractéristique de transfert	47
2.12 Problème du PAPR lors de l'amplification de puissance	49
2.13 Conclusion.....	50

Chapiter2. Simulations et Résulta

3.1. Introduction.....	51
------------------------	----

3.2. Les métriques utilisées.....	51
3.2.1. Densité spectrale (PSD).....	51
3.2.2. Peak to Average Power Ratio (PAPR).....	51
3.2.3. Taux d'Erreur Binaire (BER, TEB)	51
3.3. Modèle de simulation.....	52
3.4. Les résultats de simulation.....	52
3.4.1. Taux d'erreur binaire.....	53
3.4.2. Densité spectrale de puissance	53
3.4.3. CCDF de PAPR.....	54
3.4.3.1. Comparaison entre le PAPR OFDM et le PAPR FBMC.....	54
3.4.3.2. Impact de facteur de sur échantillonnage sur la CCDF PAPR.....	55
3.5. Conclusion.....	56
Conclusion générale.....	57
Bibliographie.....	58

Liste des figures

Figure 1.1. Architecteure 5GC	5
Figure 1. 2. Massive MIMO	7
Figure 1. 3. Full Duplex	9
Figure 1. 4. schéma bloc FBMC:	10
Figure 1. 5. schéma bloc UFMC	11
Figure 1.6. Schéma bloc GFDM.	11
Figure 1.7. Catégories d'usages de la 5G	14
Figure 1.8. Indicateurs clés de performance pour les trois catégories d'usage de la 5G	15
Figure 2. 1. Spectre d'un signal multi-porteur avec la réponse du canal	22
Figure 2. 2. Principe de système OFDM.	25
Figure 2. 3. Spectre en sortie du modulateur OFDM	25
Figure 2. 4. symbole OFDM avec CP	26
Figure 2. 5. Schéma block Filter Bank Multi Carrier FBMC[23]	27
Figure 2. 6. Comparaison entre l'OFDM et FBMC/OQAM	29
Figure 2. 7. Architecture d'un banc de filtre	30
Figure 2. 8. Bancs de filtres de synthèse /d'analyse.	30
Figure 2. 9. Prétraitement OQAM.....	32
Figure 2. 10. post-traitement OQAM.....	34
Figure 2.11. Le diagramme équivalent d'un système FMT / FBMC en bande de base	35

Figure.2.12. Le diagramme équivalent d'un système CMT / FBMC en bande de base	36
Figure 2. 13 Le diagramme équivalent d'un système SMT / FBMC en bande de base.	37
Figure 2.14 Bilan simplifié des différentes puissances dans un amplificateur de puissance.....	47
Figure 2.15.Exemple de CaractéristiqueAM / AM d'un Amplificateur de puissance	48
Figure 3.1. Le modèle de simulation	52
Figure 3. 2 Comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Pedestrian	53
Figure 3. 3 Comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre PHYDYAS.....	54
Figure 3.4. Comparaison entre la CCDF PAPR de FBMC et la CCDF PAPR de OFDM.....	55
Figure 3.5. CCDF PAPR d'un signal OQAM FBMC pour différentes valeurs de facteur de sur échantillonnage.....	56

Liste de tableaux

Table 3. 1 Paramètre de simulation.....	52
---	----

Abréviations

5G	5ème Génération
4G	4ème Génération
3G	3ème Génération
2G	2ème Génération
1G	1ère Génération
SR-VCC	Single Radio Voice Call Continuity
CS-Fallback	Call Switch Fallback
5G-RAN	5G Radio Access Network
GERAN	GSM Edge Radio Access Network
UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
E-UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
WLAN	Wireless Local Area Network
NR	New Radio
LMS	Algorithme des moindres carrées
RAN	Reseau d'accès
NAS	Non –Access Stratum
RANs	Radio Access Networks
NGCN	Next generation converged network
5GC	5G Core
N2	Plan de contrôle
N3	Plan utilisateur

LTE	Long Term Evolution
N3IWF	Non -3GPP Interworking Function
IP	Internet Protocol
NG-RAN	Next-Generation Radio Access Network
GNBs	Global Numeric Business School
EPC	Engineering Procurement and Construction
FTTS	Fibre to the site
HDTV	High Definition TV
UHDV	Ultra High Definition Video
FDD	Frequency division duplexing
TDD	time division duplexing
MAC	Multi carrier
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing :
FBMC	Filter Bank based Multi Carrier
UFMC	Universal Filtered Multi Carrier
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
SCMA	.Sparse Code Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
OQAM	Offset Quadrature Amplitude Modulation
uRLLC	ultra –reliable and Low Latency Communications
mMtc	massive Machine Type Communications
embb	Enhanced Mobile Broadband
V2V	Vehicle –to –vehicle
AR	realite augmente
VR	realite virtuelle
IA	Intelligence artificielle
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output

NOMA	Non Orthogonal Multiple Access .
AP	Amplificateur de puissance
BER	Bit Error Rate
CP	Cyclic Prefix
CCDF	Complementary Cumulative Density Function
CP-OFDM	Cyclic Préfixe Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CMT	Cosine Modulated Multitone
FFT	Fast Fourier Transform
FMT	Filtered Modulated Multitoned
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ICI	Inter-Carrier Interference
ISI	Inter-Symbol Interference
IOT	Internet Of Things
IES	Interférence Entre Symbole
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OOB	Out Of Band
PHYDAS	Physical Layer for Dynamic Spectrum Access and Cognitive
PPN	Polyphase Network
PAPR	Peak To Average Power Ratio
PAM	Pulse Amplitude Modulation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RF	Radio Frequency
SMT	Staggered Modulated Multitone
SSPA	Solid State Power Amplifier

TOP Tubes Ondes Progressives

TWT Travelling Wave Tube

Introduction générale

Introduction générale

La demande des nouveaux services et applications sans fil ainsi que l'augmentation rapide du nombre d'utilisateurs impose des contraintes de débit. Parmi les solutions étudiées pour répondre à ces 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).

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 fréquence. 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 remontées spectrale hors bande faible par rapport à l'OFDM.

Le paramètre majeur qui caractérise les performances énergétiques des systèmes de communication entre autre les systèmes FBMC, est le facteur de crête ou PAPR. Dans le système FBMC la superposition d'un grand nombre de sous-porteuses conduisent à des puissances de crête élevées. Les amplificateurs de puissance sont l'un des composants qui consomment plus d'énergie dans les systèmes de communication. L'amplificateur de puissance (AP) représente plus de 60% de la consommation d'énergie totale d'un émetteur.

La conjonction d'un PAPR élevé et d'AP travaillant dans un domaine proche de la saturation va générer un impact important sur les performances du système de communication en termes de taux d'erreur binaire, d'efficacité spectrale et d'interférences avec les porteuses voisines.

L'objectif de ce travail est d'analyser les performances de FBMC-OQAM en termes de BER, PSD et PAPR.

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres, dans le premier chapitre, on va présenter la 5^{ème} génération des réseaux cellulaires avec ses caractéristiques. Alors que le deuxième chapitre va aborder les deux modulations multi-porteuses (OFDM et FBMC) en commençant par la présentation des notions de base, on s'intéresse par la suite à la modulation FBMC/OQAM avec sa facteur de crête PAPR et les amplificateurs de puissance non linéaires HPA. Dans le troisième chapitre on va analyser les performances de FBMC-OQAM en termes de BER, PSD et PAPR. Enfin, on va terminer par une conclusion générale.

CHAPITRE I
Généralités Sur La 5G

I.1. Introduction

La 5G n'est plus seulement un accès mobile très performant, mais un véritable réseau d'intégration comprenant un ensemble de technologies.

Permettant d'offrir des services adaptés aux verticales, comme la télémédecine, la ville intelligente, la voiture connectée, l'accès à Internet à très haut débit pour des applications de réalité virtuelle, etc.

Dans ce chapitre nous parlons sur la Généralité de 5G, Ses caractéristiques et la nouvelle technologie.

I.2. Définition

La 5G est une occasion pour les décideurs de donner des moyens d'actions aux personnes et aux entreprises. Elle jouera un rôle prépondérant pour ce qui est d'aider les pouvoirs publics et les décideurs à rendre les villes intelligentes, ce qui permettra aux personnes et aux collectivités de tirer parti des avantages socio-économiques d'une économie numérique évoluée et riche en données. La 5G promet d'améliorer l'expérience de l'utilisateur final en offrant de nouveaux services et applications à des débits se mesurant en gigabits, et d'améliorer grandement la qualité de fonctionnement et la fiabilité des réseaux.

I.3. Système de la 5G

Le système 5G doit supporter toutes les capacités EPS (4G) avec les exceptions suivantes :

- ✓ SR-VCC et/ou CS-Fallback : Aucune mobilité ne peut être assurée entre le domaine 5G avec le domaine circuit.
- ✓ Handover entre 5G-RAN et GERAN (2G) ou entre 5G-RAN et UTRAN (3G) : Les seules mobilités possibles sont entre les radio 4G, 5G et Wifi.
- ✓ Accès au réseau cœur 5G via GERAN ou UTRAN : Le réseau cœur 5G n'offre d'interface qu'aux accès 4G, 5G et Wifi.

Le système 5G ne supporte donc que trois types d'accès : E-UTRAN, WLAN et NR (New Radio) et la voix est mise à œuvre via l'IMS et la mobilité ne peut être que paquet-paquet[1].

I.3.1 Architecture de la 5G

La figure.1.1 montre l'architecture de haut niveau qui peut être utilisée comme modèle de référence. La figure montre les éléments NextGen UE, NextGen RAN (Réseau d'accès), NextGen Core (Réseau cœur) et leurs points de référence.

I.3.1.1. Les principes d'architecture sont les suivants :

- ✓ L'UE peut être rattaché au réseau sans avoir de session établie pour la transmission des données (important notamment pour les devices IoT).
- ✓ L'UE ne peut dialoguer avec le 5GC que si l'UE supporte le protocole NAS (Non-Access Stratum) N1.
- ✓ Les RANs (Radio Access Networks) ne peuvent dialoguer avec le réseau cœur 5G appelé NGCN ou 5GC que s'il supportent les interfaces N2 (Plan contrôle) et N3 (Plan usager). Les seules radios autorisées à s'interfacer au 5GC sont LTE et ses évolutions (LTE-Advanced, LTE-Advanced Pro), New Radio basée sur les évolutions futures LTE et mmWave et enfin WiFi (aussi bien WiFi trusted que WiFi untrusted). Dans le cas de l'accès WiFi untrusted, un élément d'interfonctionnement a été spécifié appelé N3IWF (Non-3GPP Interworking Function).
- ✓ Le réseau 5GC donne accès à des réseaux externes IP (e.g., Internet, Intranet, IMS) appelées Data Networks.
- ✓ Le nouveau RAN (NG-RAN) est constitué des noeuds logiques suivants:
 - 1- gNBs comme nouveaux NodeBs qui implémentent la New Radio.
 - 2- ng-eNB est une évolution d'eNB qui prend en charge la connectivité à EPC et 5GC mais qui n'implémente que la radio LTE[1].

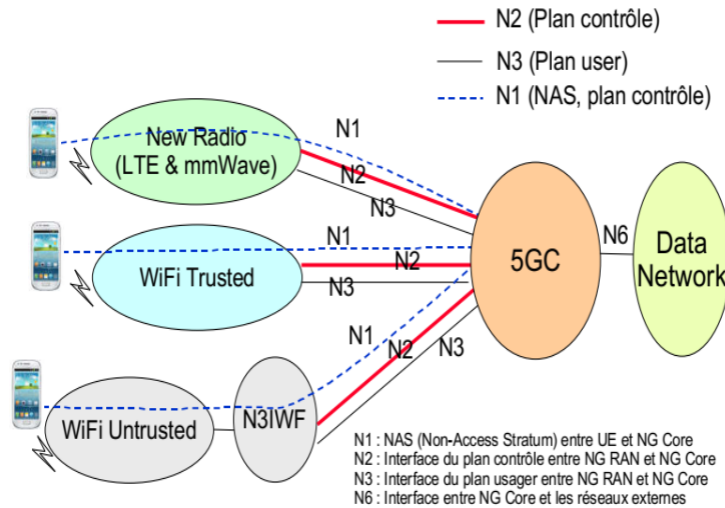


Figure.1.1. Architecture 5GC.

I.4. Objectif de la 5G

La 5G est l'Internet du futur. Cette technologie comprendra un réseau d'accès radio et un cœur de réseau convergent combinant accès fixe et accès mobile. Il s'agit notamment d'augmenter les débits et la capacité des réseaux, mais aussi de préparer l'évènement de « l'internet des objets ». Parmi les principaux objectifs :

- 1- De plus gros forfaits data : le volume de données devra être 1000 fois plus élevé.
- 2- Moins d'antennes : le nombre de terminaux pouvant être connectés par antenne devra être 100 fois supérieur, mais le nombre d'antennes dépend surtout des fréquences utilisées.
- 3- Les meilleurs débits (1 Gb par seconde).
- 4- Un temps de « latence » plus court donne l'impression que le réseau est très réactif.
- 5- Plus de batterie, moins de consommation[2].

I.5. Technologies 5G

La 5G va utiliser les bandes de fréquence pionnières suivantes :

- ✓ Fréquences moyennes ou "Coverage and Capacity Layer" s'appuie sur des fréquences dans la bande de 2 et 6 GHz (e.g., 3400-3800 MHz) pour délivrer le meilleur compromis entre capacité et couverture.
- ✓ Fréquences hautes ou "Super Data Layer" s'appuie sur des fréquences dans la bande au-dessus de 6 GHz (e.g., 24.25-29.5 GHz et 37-43.5 GHz) afin d'adresser les cas d'usage spécifiques exigeant des débits très élevés. Il s'agit des fréquences millimétriques.
- ✓ Fréquences basses ou "Coverage Layer" exploite des fréquences dans la bande sous 2 GHz (e.g. 700 MHz et 1400 MHz) fournissant une couverture très importante.

La 5G est la première technologie mobile à fonctionner dans des fréquences à la fois basses, hautes, et surtout très hautes (6 GHz et plus). Ces dernières, vraie rupture technologique même si ces fréquences sont à faible propagation en distance, répondent à l'incessante augmentation des débits et à l'inflation des volumes de données échangés.

Pour la transmission et les réseaux de collecte, la fibre est préférée avec la technologie FTTS (Fibre to the site), et les faisceaux hertziens seront toujours utiles.

I.5.1. Les ondes millimétriques

Les ondes millimétriques, c'est-à-dire des fréquences supérieures à 6 GHz, ils ont des longueurs d'onde courtes allant de 1 millimètre à 10 millimètre, la bande de spectre comprise entre 30 GHz et 300 GHz.

Les ondes millimétriques promettent donc une capacité de données plus élevée que nous avons actuellement maintenant. On dit que plus la fréquence est élevée, plus la transmission de data est importante.

L'avantage des longueurs d'ondes plus courtes d'ondes millimétriques est que les antennes utilisées pour transmettre et recevoir les signaux peuvent être considérablement réduites. Cela signifie que les téléphones utilisant les ondes millimétriques pourraient profiter de plusieurs antennes pour différentes bandes d'ondes millimétriques dans un seul appareil : ainsi le réseau disponible serait plus efficace, et la connexion internet beaucoup plus rapide lorsque plusieurs utilisateurs seraient connectés [3].

I.5.2. Massive MIMO

Indépendante de la largeur de la bande de fréquence, le Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) est considéré pour la 5G. Cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes », situées sur le même panneau (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences supérieures à 30 GHz, mmWave) L'attrait de l'utilisation du massive MIMO est double :

- 1- Permet d'augmenter les débits, grâce au multiplexage spatiotempore.
- 2- Permet de focaliser l'énergie sur un terminal, pour améliorer son bilan de liaison, grâce à la formation de faisceau, ou beamforming[1].

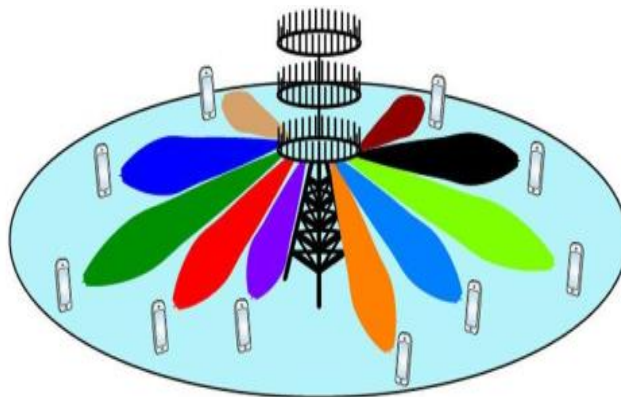


Figure.1.2. Massive MIMO.

I.5.3. Bandes millimétriques

Avec la croissance explosive de la demande de trafic de données mobile, la contradiction entre les exigences de capacité et la pénurie de spectre devient de plus en plus importante. Le goulot d'étranglement de la largeur de bande devient un problème clé des réseaux mobiles 5G.

D'autre part, avec une bande passante énorme dans la bande millimétrique (mmWave) de 28 GHz à 300 GHz, les communications à ondes millimétriques (mmWave) ont été proposées comme une partie importante du réseau mobile 5G pour fournir des services de communication multi-gigabit tels que la télévision haute définition (HDTV) et la vidéo ultra haute définition (UHDV).

La plupart des recherches actuelles se concentrent sur la bande de 28 GHz, la bande de 39 GHz, la bande de 60 GHz et la bande E (E-band) (71-76 GHz et 81-86 GHz).

L'utilisation de bandes millimétriques constitue l'une des technologies de rupture de la 5G.

Les bandes millimétriques n'ont encore jamais été prises en compte pour le déploiement des réseaux mobiles pour des raisons de maturité technologique et de qualité de propagation.

Les bandes millimétriques offrent la réserve de spectre et leur utilisation permettrait d'atteindre les très hauts débits attendus avec la 5G. En contrepartie, leur utilisation impose le développement de toutes les technologies nécessaires, miniaturisées, à bas coût et avec une consommation énergétique compatible avec des terminaux portables (amplificateurs, codeurs, traitement de signal, antennes). En particulier, à cause de la faible qualité de propagation des ondes millimétriques, chaque cellule aura une couverture réduite, ce qui nécessitera la mise en place de techniques de beamforming, pour mieux focaliser l'énergie transmise par les antennes[1].

I.5.4. Full Duplex

Dans les systèmes classiques, l'émission et la réception se font soit sur des bandes de fréquences différentes (duplexage en fréquences dit FDD (frequency division duplexing), utilisé sur toutes les bandes des réseaux mobiles français) soit à des instants différents (duplexage temporel dit TDD (time division duplexing), pressenti pour les réseaux de boucle locale radio LTE en France). Le full duplex ambitionne de permettre l'émission et la réception simultanée d'information, sur les mêmes fréquences, au même moment et au même endroit [3].

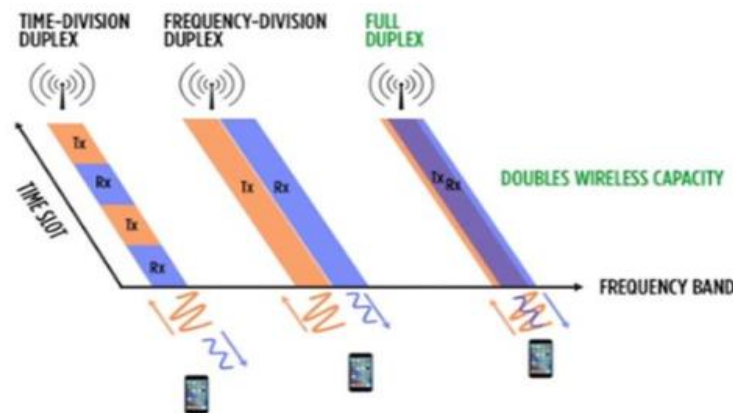


Figure.1.3. Full Duplex.

✓ Future physiques

La nouvelle couche physique MAC présente des possibilités intéressantes dans certain nombre de domaines.

a. Formes D'onde

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 utilisé jusqu'à au moins 2040 [2].

Quelques formes d'ondes 5G à l'étude

- ✓ **FBMC** : son principe de base est de divisé le spectre de fréquence en plusieurs sous-porteuse qui sont très étroits et les filtrés individuellement, il est capable de fournir un très haut niveau d'efficacité spectrale [3].

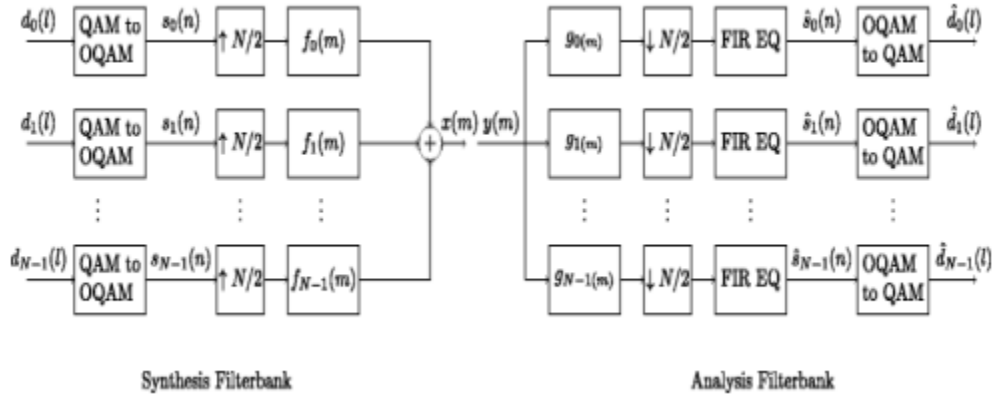


Figure 1.4. schéma bloc FBMC.

- ✓ **UFMC** : FBMC filtre le signal par sous-porteuse tandis que l'OFDM filtre le signal en un seul coup. Avec UFMC, nous appliquons le filtrage aux sous-ensembles de la bande complète au lieu des sous-porteuses simples ou de la bande complète. De cette manière, nous pouvons bénéficier d'une meilleure séparation des sous-porteuses de la FBMC et moins de complexité que l'OFDM. UFMC surpasse FBMC et OFDM dans certains aspects pertinents pour la communication [3].

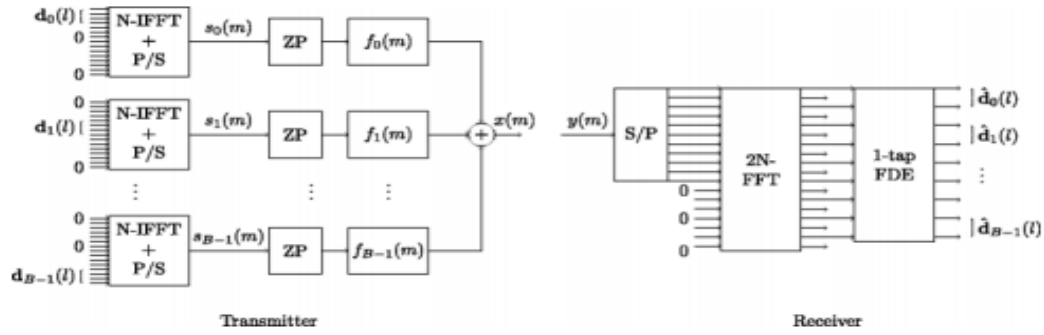


Figure 1.5. schéma bloc UFMC.

- ✓ **GFDM** : Est une technique de transmission multi-porteuse flexible qui présente de nombreuses similitudes avec OFDM. La principale différence est que les porteurs ne sont pas orthogonaux entre eux. GFDM fournit un meilleur contrôle des émissions hors bande et réduit le rapport puissance/puissance moyenne [2].

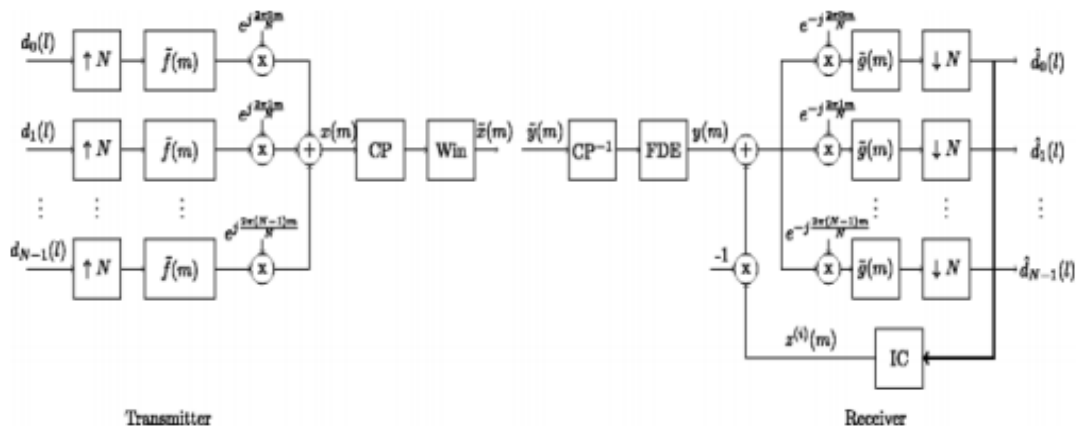


Figure 1.6. Schéma bloc GFDM.

b) Schémas d'accès multiple

- ✓ **Multiplexage NOMA** : LTE utilise un multiplexage dit orthogonal, chaque terminal utilise, de manière unique, une partie des fréquences à un instant donné. Pour améliorer l'efficacité spectrale de la 5G par rapport à la 4G des méthodes de multiplexage non orthogonale, c'est-à-dire que plusieurs utilisateurs peuvent recourir aux mêmes fréquences au même moment, sont envisagées. La discrimination entre plusieurs utilisateurs peut se faire en attribuant des codes différents à chaque utilisateur (SCMA, CDMA) [4].

c) Type De Modulation

La 4G utilise la modulation d'amplitude en quadrature (QAM). Cette modulation peut atteindre QAM-64, c'est-à-dire qu'à chaque instant, 6 bits d'information sont transmis. Grâce à l'amélioration du bilan de liaison de la 5G, via des technologies antennaires ou de traitement de signal, la modulation atteint à l'ordre QAM-256 (8 bits d'information), ces modulations offrent une excellente efficacité spectrale et ont permis de réaliser des débits de données très élevés [4].

d) Réseaux denses

La réduction de la taille des cellules permet une utilisation beaucoup plus efficace du spectre disponible. Des techniques permettant de garantir que les petites cellules du macro-réseau sont déployées en tant que femtocells qui peuvent fonctionner de manière satisfaisante [4].

I.6. Catégories d'usage de la 5G

Trois grandes catégories d'usages, avec leurs exigences respectives et potentiellement incompatibles entre elles, sont en train d'émerger et permettraient de répondre aux besoins métier :

- 1- **Les communications mMTC (Massive Machine Type Communications)** : communications entre une grande quantité d'objets avec des besoins de qualité de service variés. L'objectif de cette catégorie est de répondre à l'augmentation exponentielle de la densité d'objets connectés ;

- 2- **Le large bande eMBB** : connexion en ultra haut débit en outdoor et en indoor avec uniformité de la qualité de service, même en bordure de cellule ;
- 3- **uRLLC** (Ultra-reliable and Low Latency Communications) : communications ultra-fiables pour les besoins critiques avec une très faible latence, pour une réactivité accrue ;
- ✓ Le premier groupe (**mMTC**) englobe principalement tous les usages liés à l'Internet des objets. Ces services nécessitent une couverture étendue, une faible consommation énergétique et des débits relativement restreints. L'apport annoncé de la 5G par rapport aux technologies actuelles réside dans sa capacité à connecter des objets répartis de manière très dense sur le territoire.
 - ✓ L'ultra haut débit (**eMBB**) concerne tous les applications et services qui nécessitent une connexion toujours plus rapide, pour permettre par exemple de visionner des vidéos en ultra haute définition (8K) ou de « streamer » sans-fil des applications de réalité virtuelle ou augmentée.
 - ✓ Les communications ultra-fiables à très faible latence (**uRLLC**) regroupent toutes les applications nécessitant une réactivité extrêmement importante ainsi qu'une garantie très forte de transmission du message. Ces besoins se retrouvent principalement dans les transports (temps de réaction en cas de risque d'accident, par exemple), dans la médecine (téléchirurgie) et, de manière générale, pour la numérisation de l'industrie [5].

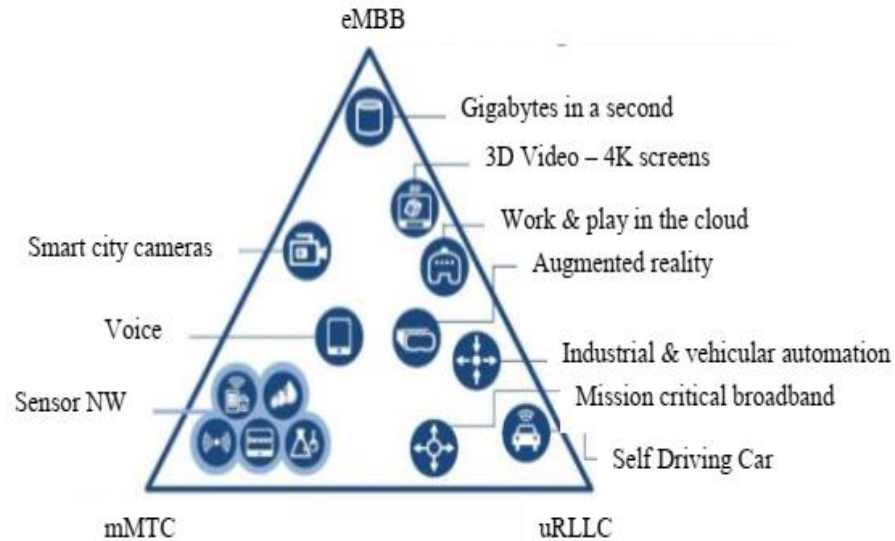


Figure.1.7. Catégories d'usages de la 5G [5].

✓ Les indicateurs de performance

Afin de mettre en œuvre ces trois types d'usages, huit indicateurs de performance (KPI –Key performance indicators) ont été établis par l'UIT pour préciser, quantifier et mesurer les caractéristiques de systèmes 5G :

- 1- Débit crête par utilisateur (Gbit/s).
- 2- Débit moyen perçu par l'utilisateur (Mbit/s).
- 3- Efficacité spectrale (bit/Hz).
- 4- Vitesse maximale des terminaux (km/h).
- 5- Latence (ms).
- 6- Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km²).
- 7- Efficacité énergétique du réseau.
- 8- Débit sur une zone (Mbit/s/m²).

Il est fondamental de comprendre que l'ensemble de ces indicateurs détermine l'enveloppe des performances maximales de la 5G. Cependant, ces valeurs extrêmes ne pourront être atteintes simultanément pour tous les indicateurs. Tous les besoins ou cas d'usage ne sont pas compatibles entre eux et un choix devra être réalisé pour définir des classes d'utilisation disposant chacune de son enveloppe de performances, notamment pour les familles mMTC, eMBB et URLLC [5].

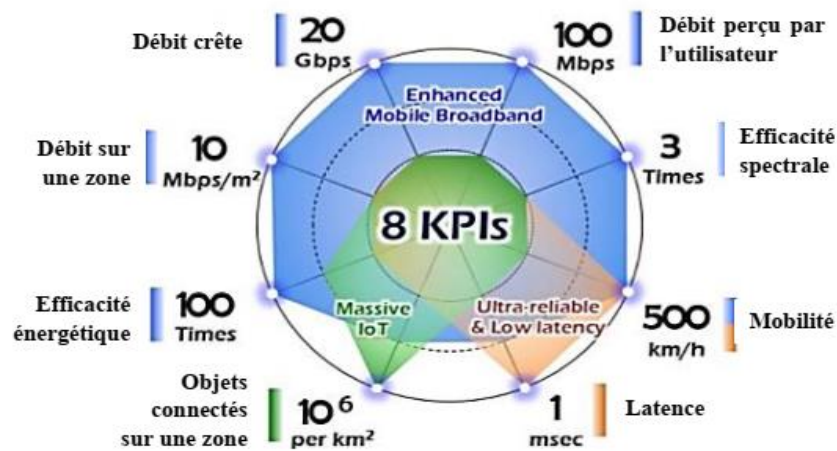


Figure.1.8. Indicateurs clés de performance pour les trois catégories d'usage de la 5G [5].

I.7. Caractéristiques de 5G

- ✓ Fiabilité.
- ✓ Bande passante.
- ✓ Augmentation du volume de données.
- ✓ Plus d'appareils.
- ✓ La haute disponibilité.
- ✓ Couverture à 100%.

- ✓ Déploiement rapide des services.
- ✓ Transfert de données plus rapide.

I.8. Applications de la technologie 5G

1.8 Les applications de la 5G

Les progrès des réseaux mobiles ont créé une multitude d'applications diverses pour améliorer la qualité des services fournis des utilisateurs finaux, notamment la mobilité intelligente, le commerce numérique, les réseaux sociaux et les soins de santé. Dans une perspective plus large, les applications mobiles font partie des services Internet, qui ont connu une évolution rapide au cours des dernières décennies. Les services Internet ont évolué depuis les échanges classiques de données point à point, le World Wide Web (WWW), les applications mobiles et sociales, vers les services IdO récents et le futur Internet tactile [6].

1) Mobilité intelligente:

Les applications de mobilité en 5G vont de la planification route/itinéraire traditionnelle aux nouveaux services de conduite autonome (véhicules connectés ou V2V : Vehicle-to-Vehicle en anglais) en passant par les économies de partage étendues du transport intelligent. Parmi les avantages de la mobilité intelligente, on peut citer l'équilibrage du trafic, l'acheminement efficace, la prévention des accidents, les économies d'énergie, les coûts et la réduction des émissions [6]. Ce groupe d'applications suscite une forte demande pour la 5G, qui prend en charge la connectivité omniprésente, une faible latence, une grande vitesse, et des

La connectivité omniprésente, une faible latence, une grande vitesse, et des liaisons fiables, sécurisées et à faible consommation.



2)Énergie Intelligent

Cette catégorie d'applications comprend la surveillance et la gestion des centrales électriques, la mise en réseau intelligente, la détection et la résolution des pannes de courant, de nouveaux services permettant d'économiser la consommation pour les maisons et les immeubles de bureaux, le marché de l'énergie et les bornes de recharge intelligentes pour les véhicules électroniques. L'énergie intelligente devrait améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes électriques utilisant des énergies renouvelables et permettre une distribution intelligente. Les principales exigences de la 5G concernent la fiabilité, la sécurité et la confidentialité des liaisons [6].

3)Santé intelligente

Les applications de santé deviennent de plus en plus populaires parmi les utilisateurs de téléphones mobiles en raison de la prise de conscience croissante de leur intégrité et de leur bien-être. Parallèlement aux progrès des technologies vestimentaires intelligentes, les applications de cette catégorie couvrent la surveillance et le diagnostic de l'état sur mobile, ainsi que l'inspection de la qualité environnementale. Avec plus de données collectées à partir de capteurs déployés sur des appareils portables, Santé intelligente aura une influence positive sur les systèmes médicaux et de santé [6]. Une autre application émergente dans ce domaine est la chirurgie compatible AR/VR (AR : réalité augmenté / VR : réalité virtuelle), qui exigera une latence faible et une bande passante élevée, en plus des exigences générales de faible consommation, de sécurité et de confidentialité des données de la 5G.



4) Applications industrielles

Des applications telles qu'Industrie IdO 4.0 [6] représentent la prochaine génération de services cyber-physiques en termes de fabrication, de communication M2M, d'impression 3D et de construction assistée par l'IA (intelligence artificielle). L'impact de ces applications industrielles ira au-delà des usines et profitera directement à la société tout entière. Les principales exigences de la 5G comprennent une fiabilité critique, une latence ultra faible prise en charge d'un déploiement massif, la sécurité et la confidentialité.



5) Applications grand public

La grande quantité d'applications grand public reflète le potentiel des innovations commerciales et technologiques mobiles 5G. Comme nous sommes familiers avec les

applications mobiles typiques fonctionnant sur les Smartphones et les tablettes, les applications émergentes incluent le streaming mobile ultra HD (4K/8K), la technologie financière basée sur le block Chain (Fin Tech), le jeu omniprésent (comme Pokemon GO). [6], des services de réalité mixte mobiles AR/VR pris en charge par des véhicules aériens sans pilote et une technologie holographique telle que HoloLens (paire de lunettes de réalité mixte) [6]. Tous ces services avancés exigent de la 5G de prendre en charge une connectivité étendue, une bande passante élevée, une latence faible, une faible consommation d'énergie, ainsi que la fiabilité et la sécurité des liaisons.

I.9. Les avantages

Il y a plusieurs avantages de la cinquième génération Nous les mentionnons

- ✓ Les communications massives de machine à machine.
- ✓ Des communications ultra-fiables à faible latence.
- ✓ Le haut débit mobile amélioré.

Pour les communautés, la 5G permettra la connexion de milliards d'appareils

- ✓ Villes intelligentes.
- ✓ Améliorer les soins de santé.
- ✓ Écoles et maisons intelligentes.
- ✓ Des véhicules intelligents et plus sûrs.
- ✓ L'éducation, et fournir un lieu de vie plus sûr et plus efficace.

Pour les entreprises et l'industrie, la 5G et l'OT fourniront une multitude de données leur permettant de mieux comprendre leurs opérations.

- ✓ Les entreprises Premièrement, opérer et prendre des décisions clés motivées par les données.
- ✓ Deuxièmement, innover dans l'agriculture.
- ✓ Fermes et fabrication intelligentes.
- ✓ Ouvrir la voie à des économies de coûts.
- ✓ Enfin, une meilleure expérience client et une croissance à long terme.

1.10. Conclusion

La technologie de la 5G est l'amélioration et sommation de plusieurs technologies utilisées dans les autres standards comme (4G ,3G ...etc.). Dans le présent chapitre, nous avons présenté la définition de la 5G et catégories d'usage de la 5G, Architecture de la 5G, les caractéristiques et applications. Technique FBMC font l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2

*Modulation multi-porteuses à base
de bancs de filtres FBMC*

2.1 Introduction

Ce chapitre présente les notions principales qui vont être utilisées dans cette mémoire. Dans la première partie, nous présentons les deux modulations multi-porteuses (OFDM et FBMC) et nous nous sommes concentrés sur la modulation FBMC-OQAM avec son facteur de crête PAPR. Ensuite, nous avons donné quelques notions sur les amplificateurs de puissance (AP), finalement nous avons proposé un problème qui est lié aux amplificateurs de puissance (AP) avec le facteur de crête PAPR.

2.2 Les modulations multi-porteuses

Dans des canaux RF multi-trajets, les communications mono-porteuses nécessitent une égalisation complexe au niveau du récepteur. Face à ces contraintes, des systèmes de communication multi-porteuse viennent remplacer les systèmes mono-porteurs tout en offrant une transmission simultanée sur plusieurs porteuses. [7]

2.2.1 Principe de modulations multi porteuses

Dans le cas d'un canal à trajet multiples les techniques de modulation classique sont sensibles aux IES (interférences entre symboles). Pour compenser cet effet négatif, des processus d'égalisation sont utilisés. Cependant leur mise en place s'est avérée d'une grande complexité surtout lorsque le canal varie beaucoup dans le temps ou suivant la fréquence du signal. Les techniques de modulations multi porteuses sont donc apparues pour remédier à ce problème en éliminant les IES en simplifiant l'égalisation. L'information est alors répartie sur un grand nombre de sous porteuses. Ainsi dans un canal de transmission avec des chemins multiples ou certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de chemins, le système sera tout de même capable récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été affectées. [7]

La modulation multi porteuses consiste à diviser la bande de fréquence Δf à N sous bandes centrées sur des fréquences dites sous-porteuses (voir Figure 2.1), chaque une

module par un symbole élémentaire transmis en parallèle, les sous bands de fréquence seront plus étroites et plus petites que B_c .

Dans le domaine temporel, ceci est équivalent à augmenter la durée du symbole $T_s > \tau_R$, Les interférences entre symboles sont ainsi réduites.

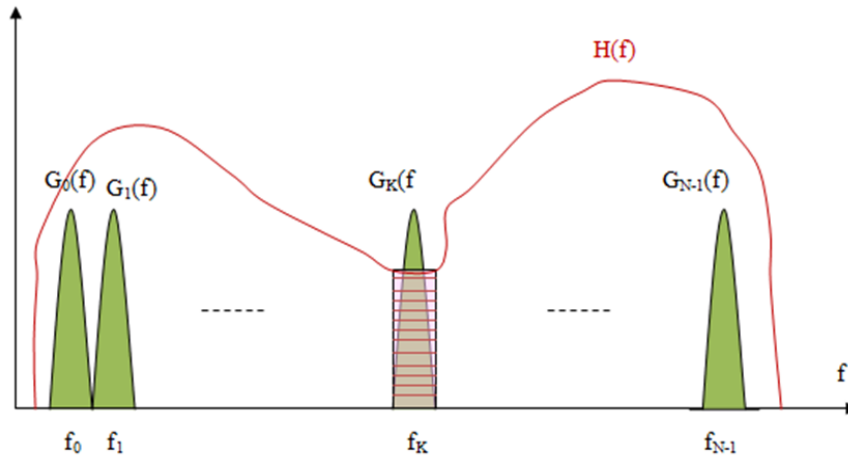


Figure 2.1. Spectre d'un signal multi-porteur avec la réponse du canal.

2.2.2 Caractéristiques des formes d'ondes multi-porteuses

2.2.2.1 Facteur de crête (PAPR)

Le paramètre PAPR nous donne une idée sur le comportement du signal, plus précisément sur les pics d'amplitude et donc de puissance. Cette dernière a une influence directe sur l'amplificateur de puissance (AP). Si nous considérons une fenêtre d'observation T du signal $s(t)$, le PAPR représente le rapport entre la puissance maximale et la puissance moyenne du signal $s(t)$ sur l'intervalle T .

Dans la littérature nous retrouvons différentes définitions du PAPR. L'expression du PAPR classique est donnée par :

$$PAPR_{(s(t))} = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} |s(t)|^2}{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} |s(t)|^2 . dt}$$

À chaque fois qu'on aura un pic, l'AP doit consommer plus d'énergie pour le transmettre. Or il est nécessaire d'optimiser la consommation d'énergie surtout dans les transmissions sans fil [8].

2.1.2.2 Rayonnements hors bande (Out of Band (O.O.B))

Le rayonnement hors bande ou l'OOB (Out Of Band) est l'un des problèmes majeurs des modulations multi-porteuses. Il représente une émission de puissance dans les fréquences hors de la bande nécessaire à la transmission à cause du processus de la modulation, donc il est nécessaire de réduire ce rayonnement pour éviter des pertes d'énergie et interférences avec d'autre bande fréquences.

Comme il est détaillé dans plusieurs documents, le rayonnement OOB (**OOBradiation**) est défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie qui est émise dans la plage de fréquence *OOB* et la quantité d'énergie dans la bande passante allouée *B* par :

$$OOB_{radiation} = \left| \frac{B}{OOB} \right| * \frac{\int_{f \in OOB} PSD(f) df}{\int_{f \in B} PSD(f) df}$$

Dans cette thèse, nous concéderons deux systèmes multi-porteurs, que nous détaillerons dans les paragraphes suivants :

2.3 La modulation OFDM

OFDM est une technique de transmission de données analogiques apparue dans les années 60. Pour émettre un signal, OFDM divise une bande de fréquence en plusieurs sous canaux appelés « porteuses » espacés par des zones de taille fixes (intervalle de garde).

Cette technique divise la bande du système en un grand nombre de porteuse individuelles appelés sous-porteuse, ces dernières sont dites orthogonale car pour une transmission idéale, un symbole transmis sur une sous porteuse peut être démodulé sans interférence de la part des sous porteuse adjacentes.

D'un point de vue implémentation numérique, les systèmes OFDM transmettent les données par blocs : le flux original de donnée de débit R est multiplexé en N flux parallèles de débit R/N . Il s'agit bien d'un multiplexage fréquentiel puisque les données sont transmises sur N canaux différents.

Afin d'effectuer cette transmission, au lieu de transmettre les données en série comme le font les systèmes mono-porteuses, les schémas OFDM transmettent les données par bloc en introduisant aux informations utiles de la redondance (appelée intervalle de garde) dont la structure cyclique permet, à l'aide de transformées de Fourier, une inversion simple (scalaire) du canal de propagation [9].

2.3.1 Principe

Le principe de l'OFDM consiste à diviser sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique à transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission indépendants, de fréquences porteuses différentes. L'OFDM utilise des fréquences porteuses orthogonales. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent, mais grâce à l'orthogonalité elles n'interfèrent pas entre elles. Ainsi dans un canal de transmission avec des chemins multiples où certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de chemins, le système OFDM sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites. Chaque porteuse est modulée indépendamment en utilisant des modulations

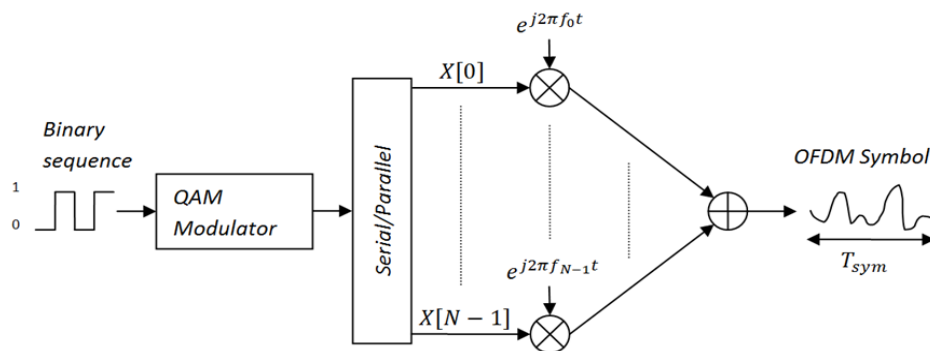


Figure 2.2. Principe de système OFDM.

2.3.2 L'orthogonalité

La technique de modulation OFDM autorise un fort recouvrement spectral entre les sous porteuses. Cependant, les porteuses doivent respecter une contrainte d'orthogonalité dans les domaines temporel et fréquentiel au même temps pour un bon fonctionnement.

L'orthogonalité se réalise si l'espace entre deux fréquence adjacentes $f_n = 1/T_n$ (figure 2.3). En effet chaque symbole moduler par une porteuse pendant une fenêtre rectangulaire de durée temporelle, sinus cardinal représente sons spectre en fréquence.

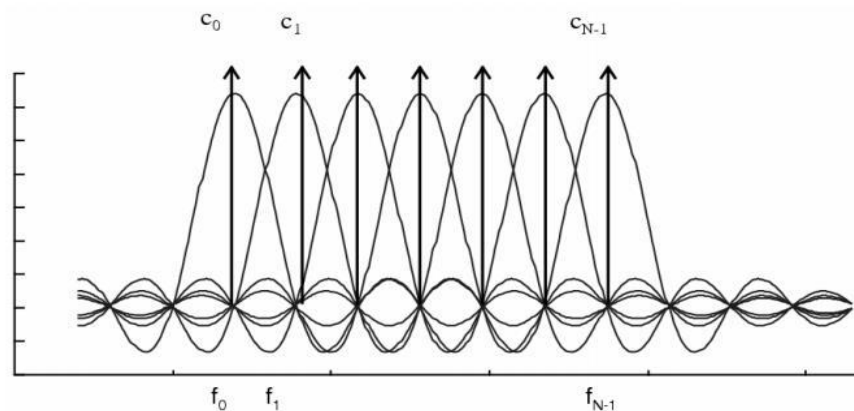


Figure 2.3. Spectre en sortie du modulateur OFDM.

Ainsi, il n'existe pas des interférences avec les autres sous porteuse, c'est ce qui permet recouvrement de spectre des différentes porteuses et une occupation optimale du spectre. En doit choisir le nombre de sous porteuse N a fin qui remplir les deux conditions primordiales $TS \gg T_m$ afin de pouvoir considérer le canal plat, et $T_s < 1/B_d$. [7]

Cette solution proposée par l'OFDM s'avère très simple et efficace pour assurer une bonne séparation entre les sous-porteuses à la réception

2.3.3. Le préfixe cyclique

Les symboles subissent des échos et un symbole émis parvient au récepteur sous forme de plusieurs symboles atténués et retardés. Un symbole émis lors d'une période iTS peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période $(i-1)S$, il se produit alors des interférences. Pour éviter ces interférences, on ajoute un intervalle de garde d'une durée T_g . Chaque symbole est précédé par une extension périodique du signal lui-même, la durée du symbole totale transmis est alors $T = T_s + T_g$. Pour que les interférences soient éliminées.

Le préfixe cyclique est une technique qui consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre en amont de la trame. Plus clairement, il s'agit de récupérer une partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début de trame appeler cyclique préfix (CP-OFDM) [10].

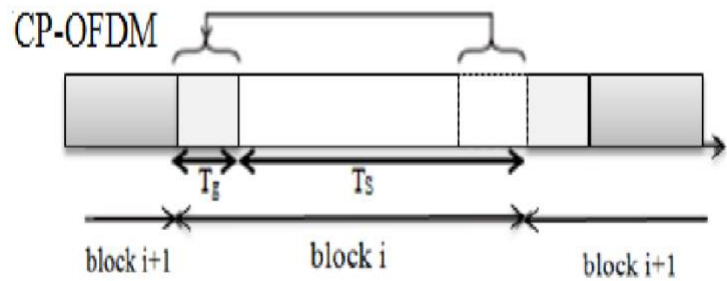


Figure 2.4. Symbole OFDM avec CP.

L'OFDM utilise le préfixe cyclique (CP) avec un filtre rectangulaire en forme d'impulsion et un niveau très élevé des lobes latéraux entraînant une fuite de puissance entre les différentes sous-porteuses, pour cela ils ont développé ce système et apporté la technologie FBMC/OQAM suivants :

2.4 FBMC (Filter bank Multi Carrier)

2.4.1 Principe générale

La FBMC est une technique multi-porteuse qui utilise un réseau de filtres à l'émission et à la réception, des filtres de synthèse et d'analyse spécifiques, ainsi qu'une transformée de Fourier inverse rapide (IFFT) en tant que modulateur et transformée de Fourier rapide (FFT) en tant que démodulateur [10].

La figure 2.5 représente la structure générale de la technique FBMC/OQAM :

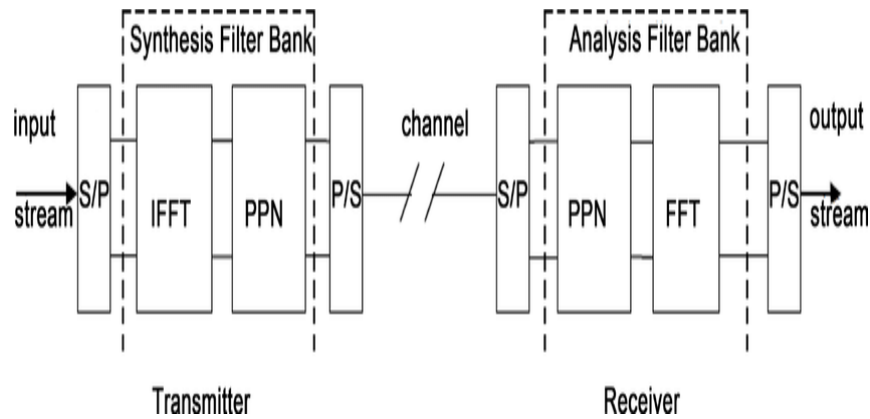


Figure 2.5. Schéma block Filter Bank Multi Carrier FBMC [10].

2.4.2 Signal FBMC

Le signal FBMC numérique en bande de base peut être écrit sous la forme suivant :

$$S\{m\} = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_{k,n} g\left[m - \frac{nM}{2}\right] \exp\left(j \frac{2\pi k}{M} \left(M - \frac{D}{2}\right)\right) \exp(j\phi_{k,n})$$

Où $D/2$ est le terme de retard qui dépend de L_g la longueur du filtre prototype

Nous avons :

$$D = L_g = KM - 1$$

Le terme de phase $\phi_{k,n}$ garantie le respect de la condition d'orthogonalité réelle. Le terme de phase $\phi_{k,n}$ assure le déphasage de $\pm\pi/2$ entre les symboles PAM transmis adjacents et peut être donné Par :

$$\phi_{k,n} = \frac{\pi}{2(n+k)} + \epsilon \pi kn$$

Où E peut prendre l'une des trois valeurs : $\{-1, 0, 1\}$.

Les symboles $a_{k,n}$ sont déduits d'une constellation PAM réelle, $g[m]$ est la réponse impulsionnelle du filtre prototype.

Dans un canal parfait, le signal à la sortie du récepteur s'écrit comme suit :

$$y_{k,n} = \sum_{k'}^{M-1} \sum_{n'=-\infty}^{+\infty} a_{k',n'} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} g_{k',n'}[m] g_{k,n}^*[m]$$

$$g_{k,n}[m] = g\left[m - \frac{nM}{2}\right] \exp\left(j \frac{2\pi k}{M} \left(M - \frac{D}{2}\right)\right) \exp(j\phi_{k,n})$$

2.5 OQAM-FBMC

2.5.1. Principe générale

La technique de modulation est nécessaire pour annuler l'effet du chevauchement et pour maintenir l'orthogonalité entre les sous porteuses adjacents. L'idée principale de la technique FBMC-OQAM est de remplacer la modulation QAM habituelle par la modulation OQAM. Pour cela un décalage d'une demi-période symbole $T/2$ est introduit entre la partie réelles et la partie imaginaire d'un symbole QAM donné. Ici, la partie réelle et la partie imaginaire sont transmises à des instants différents. Si la partie imaginaire est retardé de $T/2$ sur une sous-porteuse, c'est la partie réelle qui sera retardée sur la sous-porteuse suivante. [11]

La figure 2.6 représente la comparaison entre l'OFDM et le FBMC /OQAM.

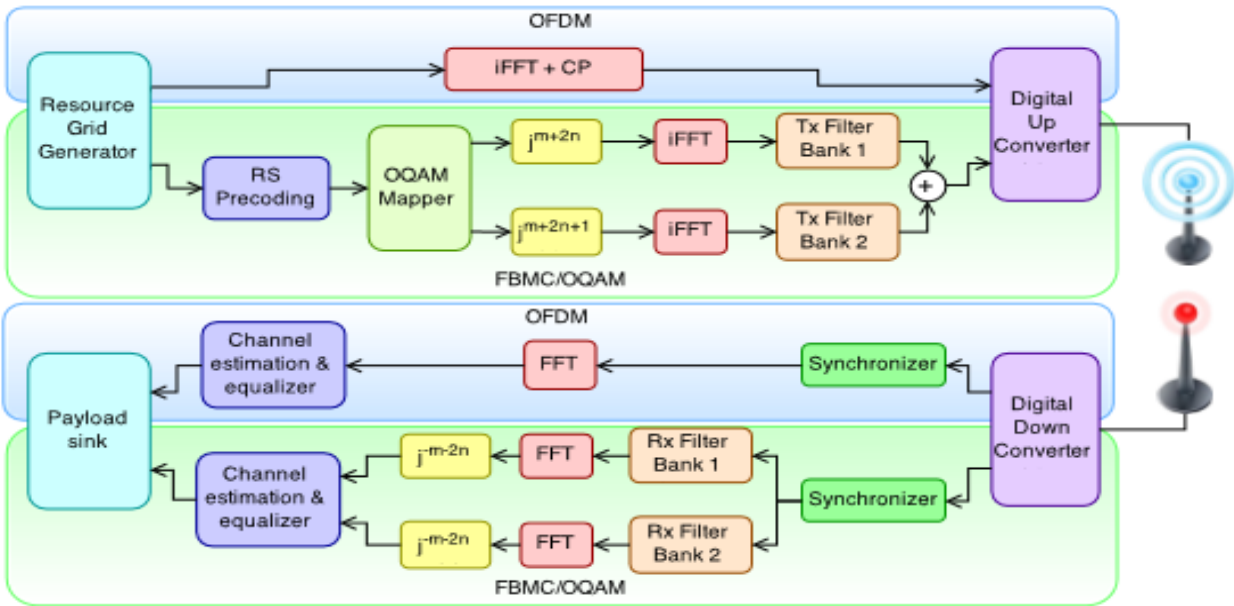


Figure 2.6. Comparaison entre l'OFDM et FBMC/OQAM.

2.5.2 Banc de filtre

A l'inverse de l'OFDM la FBMC utilise des bancs de filtre qui sont considérées comme un tableau qui regroupe M signaux en entrée sur M lignes et donne M signaux en sortie, tel qu'il est représenté sur la figure 2.7.

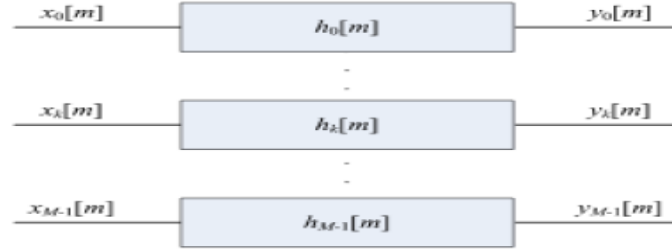


Figure 2.7. Architecture d'un banc de filtre.

2.5.2.1 Principe Banc de filtre

Le système de la figure 2.8 (a) est appelé banc de filtres d'analyse, et les filtres H_k (n) (a) sont les filtres d'analyse. Ce banc décompose le signal $x(n)$ en M signaux $v_i(n)$ appelés signaux de sous-bandes. Le système de la figure 2.8.(b) est appelé banc de filtres de synthèse et les filtres $F_k(n)$ sont les filtres de synthèse. Il combine les M signaux $w_k(n)$ en un seul signal $y(n)$. [12]

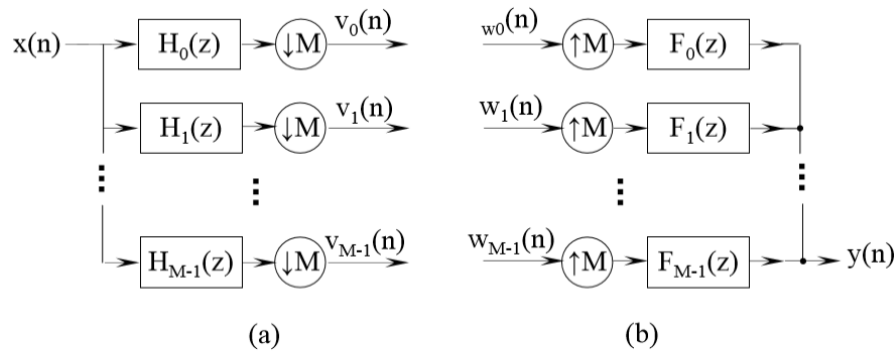


Figure 2.8. Bancs de filtres de synthèse /d'analyse [12].

La figure 2.8 illustre un tel banc de filtres, le principe de cette transformée est :

Les bancs de filtres d'analyse et de synthèse sont généralement associés, le premier décompose un signal pour appliquer un traitement à chaque signal de sous-bande, et le second recombine les signaux de sous-bandes traités pour construire le signal modifié. Un tel système d'analyse/synthèse est appelé banc de filtres à reconstruction parfaite quand en l'absence de tout traitement dans les sous-bandes, c'est-à-dire quand $(n)=vk(n)$, $k=0,...,M-1$, le signal de sortie $y(n)$ vaut $x(n-\tau)$, où τ est un retard pur. Pour obtenir des conditions nécessaires et suffisantes assurant la reconstruction parfaite, commençons par donner l'expression du $k^{\text{ème}}$ signal de sous-bande :

$$V(n)=\sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i)h_k(nM-i)$$

Où $h_k(n)$ est la réponse impulsionnelle du $k^{\text{ème}}$ filtre d'analyse. Le signal reconstruit s'exprime en fonction des signaux de sous-bandes traités comme suit :

$$Y(n)=\sum_{k=0}^{M-1}\sum_{i=-\infty}^{\infty} W_k(i)f_k(n-Mi)$$

Où $f_k(n)$ est la réponse impulsionnelle du $k^{\text{ème}}$ filtre de synthèse. Lorsque les signaux de sous-bandes ne sont pas modifiés, $w_k(n)=v_k(n)$ quel que soit k , la fonction $v_s(n)$ peut être injectée dans $y(n)$, pour obtenir : Où $f_k(n)$ est la réponse impulsionnelle du $k^{\text{ème}}$ filtre de synthèse. Lorsque les signaux de sous-bandes ne sont pas modifiés, $w_k(n)=v_k(n)$ quel que soit k , la fonction $v_k(n)$ peut être injectée dans $y(n)$, pour obtenir :

$$Y(n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i)s(n, i)$$

Où le noyau S du système global est donné par :

$$S(n, i) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} f_k(n - Mi)h_k(nM - i)$$

2.5.3 Le bloc pré/post-traitement OQAM :

Dans ce bloc, les symboles OQAM sont transmis plutôt que les symboles QAM. Pour effectuer cette modulation, des blocs de pré / post-traitement sont placés respectivement du côté émetteur /récepteur [14].

2.5.3.1 OQAM prétraitement

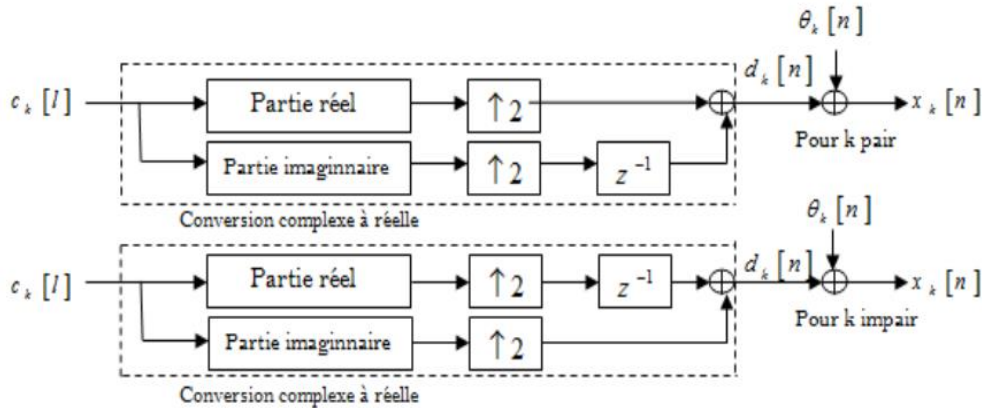


Figure 2.9. Prétraitement OQAM.

La première opération est une conversion complexe/réelle où les parties réelles et imaginaires d'un symbole complexe $C_k(l)$ transmises à un débit $1/T$, sont séparées pour former deux nouveaux symboles $d_k(n)$ et $d_k[n+1]$.

$T = \frac{1}{\Delta f}$ Représente la période du signal avec Δf l'espacement entre les sous-porteuses

$$d_k[n] = \begin{cases} Re(C_k[l]), k \text{ pair} \\ Im(C_k[l]), k \text{ impair} \end{cases}$$

$$d_k[n+1] = \begin{cases} Re(C_k[l]), k \text{ pair} \\ Im(C_k[l]), k \text{ impair} \end{cases}$$

Avec :

"L" L'indice d'échantillon à l'entrée du bloc Prétraitement OQAM et à la sortie du bloc post-traitement OQAM.

"n" L'indice d'échantillon à la sortie d2.

bloc Prétraitement OQAM et à l'entrée du bloc post-traitement OQAM.

La seconde opération du bloc Prétraitement OQAM est une multiplication par $\theta_k[n]$ pour maintenir les symboles orthogonaux.

$$\theta_k[n] = j^{k+n}$$

Les données à la sortie du bloc Prétraitement OQAM $x_k[n]$ peuvent s'exprimer comme suit [14] :

$$X_k[n] = d_k[n] \theta_k[n]$$

2.5.3.2 OQAM post-traitement

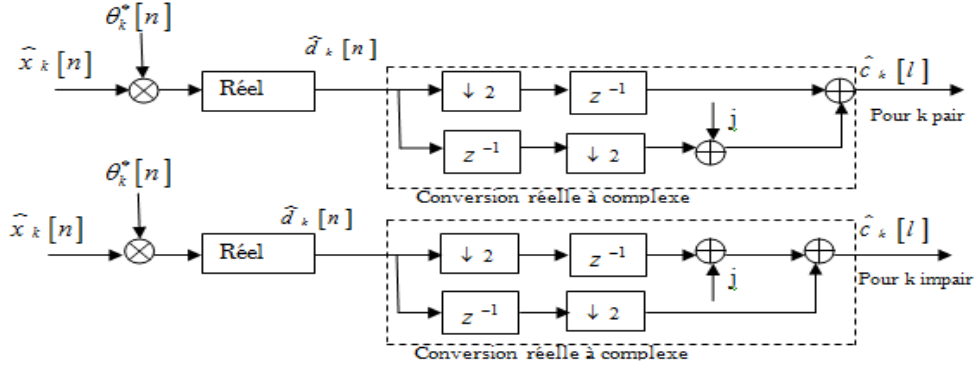


Figure 2.10. Post-traitement- OQAM.

* La première opération est une multiplication par le complexe conjugué de $\theta_k[n]$ note $\theta_k^*[n]$ suivie de l'opération qui ne consiste qu'à prendre que la partie réelle.

* La deuxième opération est la conversion réelle/complexe dans laquelle deux symboles réels successifs, dont l'un des symboles est multiplié par j forment un symbole complexe noté défini par [14] :

$$c_k[l] = \begin{cases} \hat{d}_k[n] + j\hat{d}_k[n+1] & \text{si } k \text{ pair} \\ \hat{d}_k[n+1] + j\hat{d}_k[n] & \text{si } k \text{ impair} \end{cases}$$

2.6. Types de FBMC

Dans cette section, trois types de systèmes de communication FBMC seront introduits, nommé FMT/FBMC (filtered multitone based FBMC), CMT/FBMC (cosine modulated multitone-based FBMC), et OQAM/FBMC (offset quadrature amplitude modulation-based FBMC) [10].

A. FMT/FBMC

FMT / FBMC est une solution intéressante pour la transmission numérique à très haut débit, intermédiaire entre les autres méthodes proposées à porteuse unique et à porteuses multiples, ainsi qu'elle offre des avantages inhabituels liés à la gestion du spectre, au dégroupage et au duplexage. La figure 2.11 présente la structure d'un système à multi porteuses FMT / FBMC. Les symboles de modulation à valeurs complexes $(mT), k=0,1,...,K-1$ sont obtenus à partir de constellations modulées en amplitude quadrature (QAM), où $1/T$ est le débit de symboles. Après le sur échantillonnage par un facteur de M , chaque flux de symboles est filtré par un filtre de bande de base avec la fréquence caractéristique $H(ej2\pi f)$ et la réponse impulsionnelle $h(t)$. Le signal transmis $s(tT/M)$ est alors obtenu au débit de transmission de M/T en additionnant les signaux sur toutes les K sous-porteuses au niveau du récepteur, on utilise un filtrage apparié (où désigne une conjugaison complexe), puis un sous-échantillonnage d'un facteur M . Quand $M=K$ ($M > K$), la banque de filtres dite que l'échantillonnage est de manière critique (non critique) [10].

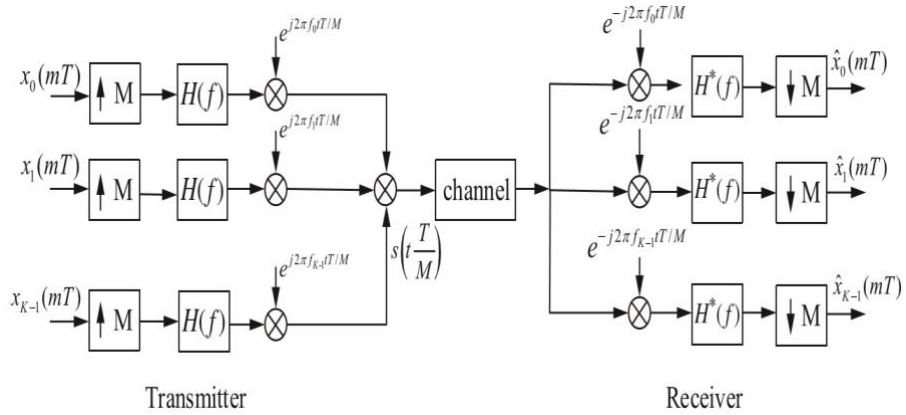


Figure 2.11. Le diagramme équivalent d'un système FMT / FBMC en bande de base [10].

B. CMT/FBMC

Dans CMT / FBMC, les symboles de sous-porteuse sont modulés en amplitude et en bande latérale résiduelle (VSB). La figure 2.12 présente la structure d'un système à multi porteuses CMT / FBMC. Une banque de filtres de synthèse est utilisée pour limiter un ensemble des symboles PAM aux signaux VSB dans la bande et les moduler dans diverses bandes de fréquences. Fondamentalement, le filtrage VSB est effectué à travers une version décalée en fréquence du filtre passe-bas $h(t)$ centré à $f = \frac{\pi}{2T}$ avec impulsienne $h(t) e^{\frac{\pi t}{2T}}$. Pour extraire la k ème séquence de données de sous-porteuse $x_k(m)$, $s(t)$ est d'abord multiplié par $e^{-j(\omega_k + \theta_k)t}$. Le signal reçu est ensuite passé à travers un filtre passe-bas dont la réponse est adaptée au filtre d'émission $h(t) e^{\frac{\pi t}{2T}}$, qui est $h(-t) e^{\frac{\pi t}{2T}}$.

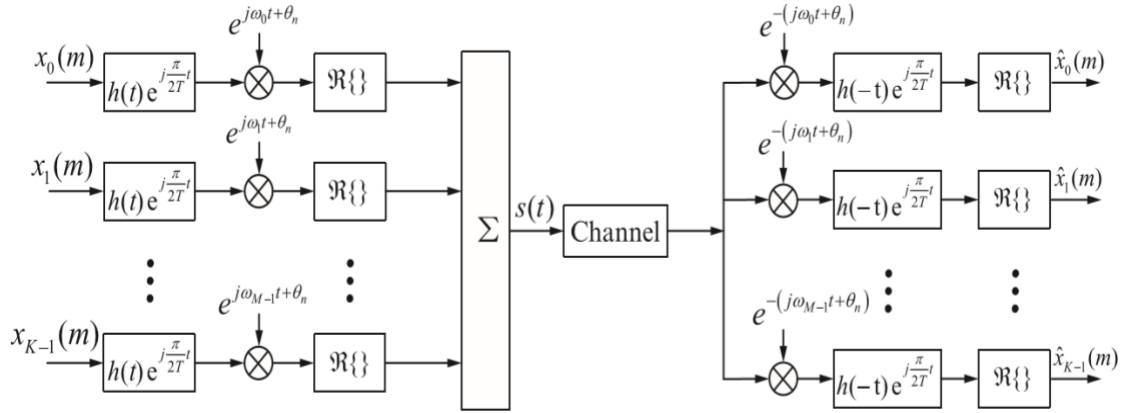


Figure 2.12. Le diagramme équivalent d'un système CMT / FBMC en bande de base. [10].

C. SMT-FBMC (OQAM/FBMC)

OQAM / FBMC est basée sur les symboles QAM dont les composantes en phase et en quadrature sont décalées de la moitié de la période des symboles. Contrairement à FMT/FBMC, Un chevauchement important entre les bandes adjacentes est autorisé dans OQAM / FBMC. La séparation de signal réussie est néanmoins possible grâce à

un dispositif de signalisation spécifique. Une condition d'orthogonalité introduite entre sous-porteuses garantit les symboles reçus sans ISI ni ICI. L'orthogonalité de la porteuse est obtenue au fil du temps en décalant les composantes en phase et en quadrature des symboles de la sous-porteuse et en concevant des filtres à formation d'impulsions dotés d'une bonne propriété de localisation de fréquence. Le diagramme équivalent d'un système OQAM / FBMC en bande de base est présenté à la figure 2.13.

Le symbole transmis $x_k(m)$ est un symbole à valeur réelle avec un indice de fréquence k et un indice de temps m , et $T/2$ est l'intervalle des symboles à valeur réelle. $x_k(2m)$ et $x_k(2m+1)$ sont obtenus en prenant les parties réelle et imaginaire d'un symbole à valeur complexe de la constellation QAM, respectivement. $h(t)$ est un filtre de mise en forme d'impulsions symétrique à valeur réelle.

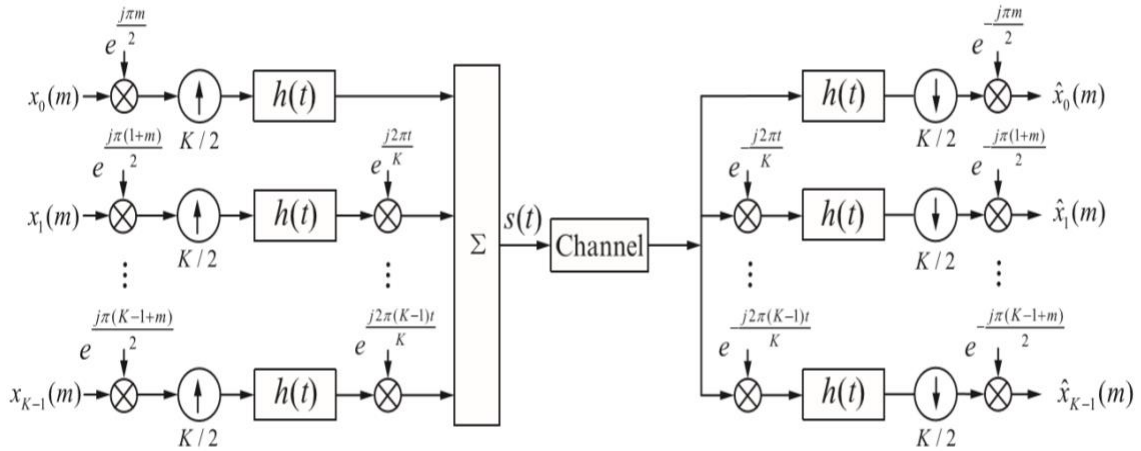


Figure 2.13. Le diagramme équivalent d'un système SMT / FBMC en bande de base. [10].

2.7 Conception de filtre de 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_s et 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, et le filtre Hermite.

2.7.1 Le filtre 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 G_K qui sont uniformément espacés aux points de fréquence $F_K = k/T$, k où K est le facteur de sur échantillonnage et T est la période de symbole.

$$G(f) = \sum_k G_K \frac{\sin(\pi(KTf - K))}{\pi(KTf - K)}$$

La réponse impulsionnelle continue du filtre prototype est obtenue en effectuant une opération de transformée de Fourier inverse sur (f) , qui est $g(t)$:

$$g(t) = \sum_k G_K e^{\frac{j\pi kt}{KT}}$$

Pour le filtre prototype PHYDYAS, le facteur de sur-échantillonnage est choisis 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 G_k choisis pour filtre PHYDYAS sont donnés par :

$$G_0 = 0$$

$$G_1 = 0.9716960$$

$$G_2 = 1/\sqrt{2}$$

$$G_3 = \sqrt{1 - G_1^2} = 0.235147$$

$$G_k = 0 \quad \text{pour } k > 3$$

$$G_k = G_{-k} \quad \text{pour } k < 0$$

2.7.2 Filtre Hermite

Le filtre Hermite est obtenu à partir des combinaisons linéaires des fonctions Hermite-Gaussiennes. En déformant le filtre gaussien avec les fonctions Hermite haut de gamme, des passages à zéro sont fournis pour satisfaire le critère de Nyquist. Il présente des caractéristiques similaires avec l'IOTA et donne une réponse isotrope.

La procédure de conception proposée par Haas et Belfiore construit un filtre isotrope selon l'équation :

$$P(t) = \sum_{k=0}^L a_k h_{4k}(t)$$

Où h_n est l'ensemble des fonctions Hermite définies comme

$$H_n(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\pi t^2} \frac{d^n}{dt^n} e^{-\pi t^2}$$

2.7.3. Le filtre cosinus surélevé de la racine carré (SRRC) :

Le filtre à cosinus surélevé à racine carrée (SRRC) est un filtre de référence bien connue en communication numérique. Pour une vitesse de transmission de $F = 1/T$, le filtre SRRC est défini dans le Domaine fréquence par :

$$G(f) = \begin{cases} \sqrt{T} & |f| \leq (1-r) \frac{1}{2T} \\ \sqrt{T} \cos\left(\frac{\pi}{2r} \left(T|f| - \frac{1-r}{2}\right)\right) & \frac{1}{2T} < |f| \leq (1+r) \frac{1}{2T} \\ 0 & (1+r) \frac{1}{2T} < |f| \end{cases}$$

Où r est le paramètre roll-off ($0 \leq r \leq 1$). Ce filtre a une réponse en fréquence plus intéressante du faite son spectre est bien localisé parce qu'il est limité en fréquence. La réponse impulsionnelle du filtre SRRC en temps continu est donnée par :

$$g(t) = \frac{\sin\left(\frac{(1-r)\pi t}{T} + \frac{4rt}{T} \cos\left(\frac{(1+r)\pi t}{T}\right)\right)}{\frac{\pi t}{T} \left(1 - \left(\frac{4rt}{T}\right)^2\right)}$$

La réponse impulsionnelle, à temps discret, du filtre RRC est obtenue par échantillonnage de la fonction temps continu $g(t)$.

2.8. Structure 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. Dans le cas des modulations à banc de filtres, le nombre de composantes polyphasés du filtre est noté $\xi_k [m]$:

$$\begin{aligned} \xi_k [m] &= \exp\left(j \frac{2\pi k}{M} \left(m - \frac{Lp-1}{2}\right)\right) \\ &= \exp\left(-j \frac{2\pi k}{M} \left(\frac{Lp-1}{2}\right)\right) \exp\left(j \frac{2\pi mk}{M}\right) \\ &= b_k \gamma_k [m] \end{aligned}$$

2.9. Les Avantages et les inconvénients de la modulation FBMC

2.9.1. Les Avantages

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

2.9.2 Les inconvénients

- ❖ Permet les inconvénients que pose un problème est la grande complexité

D'implémentation de PPN.

- ❖ Fournir brouilleurs à bande étroite robuste.

2.10. Peak to Average Power Ratio (PAPR)

2.10.1. Définition de PAPR

D'une façon générale, Le PAPR est une variable aléatoire, qu'est un paramètre pratique dans la mesure de la sensibilité d'un amplificateur de puissance non linéaire, lorsqu'une entrée d'enveloppe non constante doit être transmise. Les valeurs faibles de PAPR sont synonymes d'un signal transmis avec une puissance toujours très proche de sa puissance moyenne alors que les valeurs élevées de PAPR indiquent que la puissance instantanée peut être très élevée par rapport à la moyenne.

2.10.2. Utilisation du PAPR

En télécommunications, le PAPR est une grandeur fondamentale, notamment pour le dimensionnement des amplificateurs. En effet, l'amplificateur devra être dimensionné par rapport au pic du signal (nécessité d'avoir un amplificateur linéaire sur toute la gamme de variation du signal). Cependant, la valeur efficace du signal est la valeur "utile" moyenne, celle qui va vraiment caractériser la puissance transmise, et est donc la valeur à maximiser.

Le PAPR représente le rapport de surdimensionnement nécessaire entre la puissance maximale de l'amplificateur (la puissance pour laquelle il est dimensionné), et la puissance moyenne réellement transmise

- C'est pourquoi il est important de minimiser le PAPR, ce qui permet d'avoir des amplificateurs dimensionnés au plus juste par rapport à la puissance à transmettre.
- Pour les applications embarquées (mobiles), cela permet d'avoir des amplificateurs plus petits, moins lourds et moins chers. Cela est particulièrement critique pour les applications spatiales (amplificateurs de télécommunication) pour lesquelles chaque gramme compte et pour les terminaux de téléphonie mobile (smartphones).
- Pour les applications terrestres, cela permet de limiter la consommation énergétique des amplificateurs [16].

Dans d'autres domaines

En Acoustique, le signal pour mesurer les réponses impulsionnelles de salle, les signaux émis sont choisis avec un faible facteur de crête pour limiter les erreurs. Par exemple les Maximum Length Séquences ont un facteur de crête de 1[16].

2.10.3. Etude PAPR

Le rapport de puissance facteur de crête d'un signal donné $s(t)$ est défini comme le rapport de la puissance de crête de $s(t)$ à sa puissance moyenne. Le PAPR est un paramètre qui mesure la sensibilité aux dispositifs non linéaires des schémas de transmission comportant une enveloppe non constante et, en particulier, des modulations multi porteuses. Le PAPR de l'enveloppe complexe $s(t)$ d'un signal continu en bande de base transmettant des symboles complexes avec une durée peut être écrit comme.

$$PAPR_{(s(t))} = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2}{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} |x(t)|^2 \cdot dt}$$

Le signal OFDM / OQAM $s[m]$ est obtenu par une sommation sur M sous-porteuses statistiquement indépendantes, ce qui entraîne un signal d'enveloppe non constant. La mesure de PAPR est un outil approprié pour quantifier l'impact de ce phénomène.

$$PAPR_{(s(t))} = \frac{\max_{0 \leq m \leq N-1} |s_m|^2}{E\{|s_m|^2\}}$$

Avec :

$$S[m] = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_{k,n} g\left[m - \frac{nM}{2}\right] e^{j\frac{2\pi k}{M}\left(m - \frac{B}{2}\right)} e^{j\varphi_{k,n}}$$

Le comportement PAPR est en relation directe avec les statistiques de $s[k]$ l'équation (3.7) montre que, à un temps discret donné k , est obtenu par la sommation sur les supports M des échantillons suivants :

$$x_k = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_{k,n} g\left[m - \frac{nM}{2}\right] e^{j\frac{2\pi k}{M}\left(m - \frac{D}{2}\right)} e^{j\varphi_{k,n}}$$

Nous supposons que les $a_{k,n}$ ne sont corrélés et nous désignons leur variance par σ_a^2 . Ensuite, le x_k n'est pas corrélé et, en plus, il est facile de montrer que :

$$E\{x_k\} = 0$$

$$\sigma_a^2 = E\{x_k x_k^*\} = \sigma_a^2 \sum_{n \in \mathbb{Z}} g\left[m - \frac{nM}{2}\right]^2$$

Donc, la moyenne et la variance de son toutes deux indépendantes de k .

Si on suppose que :

$$X_M = \sum_{k=0}^{M-1} x_k = S[m]$$

A partir de théorème de limite centrale, et pour M soit assez grand ; X_M suit un processus gaussien complexe avec un moyen zéro et une variance donné par $2\sigma_k^2 = M\sigma_x^2$; ou σ_k^2 représente également la variance du réel (S_R) et imaginaire (S_I) des parties de S . Ainsi, S_R et S_I sont conjointement gaussiens, car il peut également être prouvé qu'ils ne sont pas corrélés, S_R et S_I sont indépendants. L'efficacité d'une technique de réduction du PAPR est mesurée par la [fonction de distribution cumulative](#) complémentaire (CCDF), qui est la probabilité que le PAPR dépasse un certain seuil.

$$\text{CCDF} = \text{Prob}(\text{papr} > X_0)$$

Où X_0 est le seuil. [13]

2.11. Amplificateur de puissance non linéaire HPA

Pour assurer correctement l'acheminement des informations, les émetteurs ont besoin d'amplificateurs de puissance pour fournir une certaine puissance aux signaux (radiofréquence) pour éviter qu'ils ne s'affaiblissent fortement lors de leur propagation dans l'espace libre. La puissance nécessaire utile au signal dans une source de courant continu qu'il injecte ensuite dans le signal. En général, on distingue deux catégories d'amplificateurs de puissance qui sont utilisés dans les systèmes de télécommunication :

L'amplificateur à tubes à ondes progressives (TOP, TWTA pour “Travelling Wave Tube Amplifier”) plus utilisé dans les transmissions par satellites pour transmettre de fortes puissances.

L'amplificateur à semi-conducteur (SSPA pour “Solid State Power Amplifier”) utilise dans les transmissions radio terrestres comme dans le cas des téléphones portables ou de la boucle radio. Cependant, même dans les applications spatiales, les TOP sont abandonnées de plus en plus au bénéfice des SSPA vu les avantages qu'ils présentent (masse plus faible, encombrement plus réduit, flexibilité d'utilisation).

2.11.1 Notion de rendement

La figure 2.14 illustre un bilan simplifié des différentes puissances mises en jeu lors de L'amplification d'un signal. Comme il est impossible d'avoir un transfert total de l'énergie vers le signal, la notion de rendement est alors à définir. Le bilan de puissance est donné par la relation :

$$P_e + P_{\text{alim}} = P_s + P_d$$

Les puissances d'entrée et d'alimentation sont converties en puissance de sortie et en perte (puissance dissipée).

Deux notions de rendement sont, en général, définies dans la littérature

- ✓ Le rendement en puissance : il exprime le rapport entre la puissance de sortie et la puissance fournie par l'alimentation. Ce paramètre est d'autant important qu'il rend compte de la consommation de l'amplificateur. Il est donné par la relation ci-dessous

$$\eta_{\text{dc}} = P_s / P_{\text{alim}}$$

- ✓ Le rendement en puissance ajoutée : il prend en compte la puissance d'entrée. Tout comme le rendement en puissance, il rend compte de la consommation de L'amplificateur. Il est donné par la relation ci-dessous

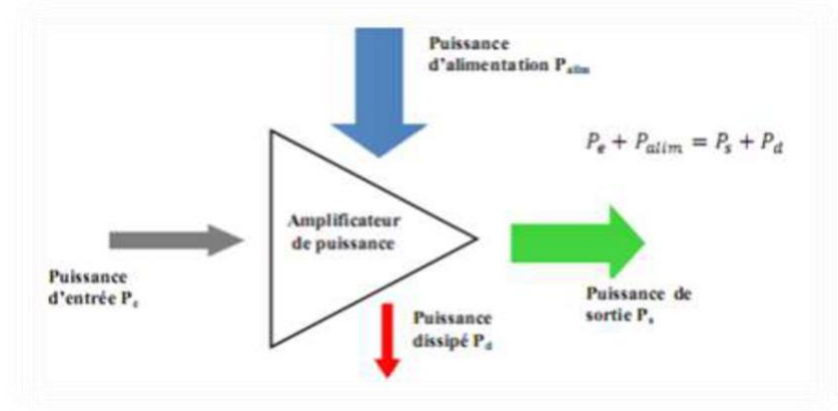


Figure 2.14. Bilan simplifié des différentes puissances dans un amplificateur de puissance.

2.11.2 La caractéristique de transfert

Dans un amplificateur de puissance la relation entrée-sortie est caractérisée par deux fonctions de transferts ; l'une relative à la phase et l'autre à l'amplitude du signal de sortie de l'amplificateur AM /AM (Amplitude-à-Amplitude) et AM /PM (Amplitude-à-Phase) sont un moyen typique qui caractérise la non-linéarité d'un amplificateur de puissance. Un exemple de caractéristiques AM /AM et AM /PM est montré à la Figure 2.15 Avec une réponse idéalement linéaire, on obtient :

$$A_{out}=G_0A_{in}$$

* G_0 = est le gain linéaire permanent amplificateur de puissance.

* A_{in} et A_{out} sont les amplitudes d'entrée et de sortie de l'amplificateur de puissance respectivement

La caractéristique AM/AM d'un amplificateur de puissance comporte trois zones particulières [37].

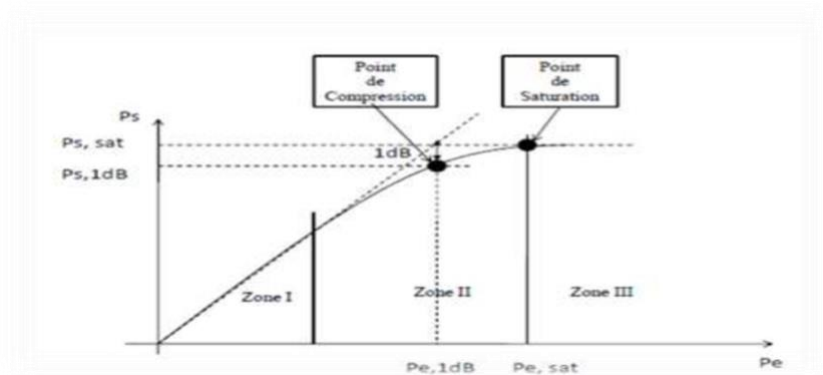


Figure 2.15. Exemple de Caractéristique AM/AM d'un Amplificateur de puissance.

- ✓ **Zone I linéaire** : dans cette zone, l'amplificateur a un comportement proche d'un système linéaire. La puissance de sortie est proportionnelle à la puissance d'entrée selon un rapport appelé gain de l'amplificateur. Les puissances d'entrées sont faibles. Les distorsions produites dans cette zone sont quasi inexistantes [13].
- ✓ **Zone II de compression** : dans cette zone, la puissance de sortie n'est déjà plus proportionnelle à la puissance d'entrée. La courbe commence à s'incurver (par rapport à la droite linéaire). Les distorsions du signal apparaissent et sont de plus en plus importantes. Le gain de l'amplificateur diminue pour de fortes puissances d'entrées. On parle de zone de compression du gain. Un point important est situé dans cette zone. Il s'agit du point où l'écart entre la courbe de gain et le gain linéaire vaut 1 dB ($P_{e, 1dB}$), c'est un point caractéristique de l'amplificateur de puissance [13].

- ✓ **Zone III de saturation** : à partir d'une certaine puissance d'entrée, la puissance de sortie devient quasiment constante et la courbe de gain décroît linéairement. La saturation se manifeste par un écrêtage du signal de sortie. La puissance de saturation en sortie est, elle aussi, une caractéristique de l'amplificateur désignée par [13].

2.12. Problème du PAPR lors de l'amplification de puissance

Dans la modulation mono-porteuse, les données sont modulées par une porteuse occupant toute la bande de fréquence. C'est pour cette raison que les variations de l'enveloppe du signal modulé ne dépendent que de la constellation et du filtre de mise en forme.

Contrairement à la modulation mono-porteuse, dans la modulation multi-porteuses, la bande allouée est divisée en plusieurs sous-bandes, et les données sont modulées parallèlement sur plusieurs fréquences porteuses. L'addition de ces porteuses engendre une forte dynamique de l'enveloppe du signal. La puissance instantanée varie considérablement par rapport à la puissance moyenne. Afin d'avoir suffisamment de puissance pour lutter contre les évanouissements du canal et être détecté par le récepteur, le signal émis est introduit dans un amplificateur de puissance (PA).

L'amplificateur de puissance doit fonctionner dans une zone dite non-linéaire (ou de saturation) malheureusement, c'est dans cette zone que se présentent les non-linéarités de l'amplificateur, sources de distorsions (inter-modulation, remonté spectrale, etc.) des signaux à transmettre. Ces effets sont d'autant plus gênants que les signaux à amplifier sont à fort PAPR

Le principal problème du système FBMC est un PAPR élevé qui réduit l'efficacité de l'amplificateur de puissance. Le système FBMC est utilisé pour envoyer des symboles complexes qui modulent différentes sous-porteuses résultant en un PAPR élevé.

2.13 Conclusion

FBMC est considéré comme une technique plus avantageuse que l'OFDM du fait de sa grande efficacité spectrale. Cependant le filtrage par sous-porteuse sera plus long et nécessitera aussi un traitement OQAM. Mais comme toute autre technique de modulation multi-porteuses, FBMC-OQAM souffre d'un facteur de crête ou d'un PAPR (pour Peak to Average Power Ratio) élevé.

Dans la 3^{ème} chapitre nous avons fait la simulation et analysé son facteur de crête (PAPR) de FBMC par rapport à la modulation OFDM.

CHAPITRE 3

Résultats & simulations

3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré aux résultats obtenus lors de nos simulations. Nous proposons, dans le cadre de cette simulation, l'utilisation du langage Matlab. Nous allons établir la simulation de la technique de transmission FBMC (émetteur canal récepteur) comparée avec OFDM. Nous nous intéressons à évaluer les performances de PAPR, BER et densité spectrale.

3.2. Les métriques utilisées

Le projet mis en œuvre implique une comparaison des techniques de modulation entre OFDM et FBMC. La comparaison consiste à simuler ces modulations sur différents ensembles de paramètres. Les résultats obtenus comprennent des mesures telles que le BER, le PAPR et la densité spectrale de puissance. L'implémentation est réalisée à l'aide de MATLAB.

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.

3.2.2. Peak to Average Power Ratio (PAPR)

L'un des problèmes majeurs des systèmes FBMC-OQAM est le rapport de puissance crête / moyenne (PAPR) élevé des signaux FBMC-OQAM transmis. Étant donné que l'amplificateur de puissance utilisé dans les systèmes FBMC-OQAM a une portée linéaire limitée, les signaux FBMC-OQAM avec un PAPR élevé seront sérieusement écrêtés et une distorsion non linéaire sera introduite, entraînant une grave dégradation des performances du taux d'erreur binaire. Il joue un rôle essentiel dans les applications de traitement du signal. Le système est plus efficace si le PAPR est minimale.

3.2.3. Taux d'Erreur Binaire (BER, TEB)

BER représente le nombre d'erreurs sur les bits par unité de temps. C'est un paramètre important pour caractériser les performances du système.

3.3. Modèle de simulation

La figure 3.1 représente le modèle de simulation utilisé lors de nos expériences.

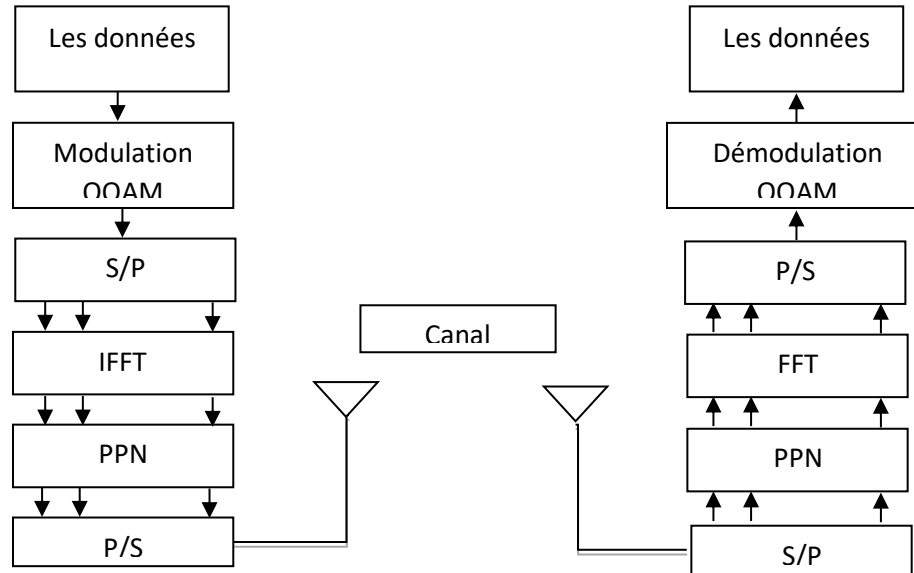


Figure 3.1. Le modèle de simulation.

3.4. Les résultats de simulation

Le tableau 3.1 représente les paramètres de simulation utilisés lors de nos expériences.

Paramètres	Valeurs
Nombre de sous porteuses	24
Nombre de symboles FBMC	14
Espacement entre sous porteuses	15 KHz
Fréquence porteuse	2.5 GHz
Modulation	64 QAM
Prototype de filter	PHYDYAS
Canal	Pedestrian A

Tableau 3.1. Paramètres de simulation.

3.4.1. Taux d'erreur binaire

Cette partie présente les résultats de simulation présentant la comparaison des performances des techniques FBMC et OFDM. Nous exprimons les performances en termes de BER en fonction du SNR.

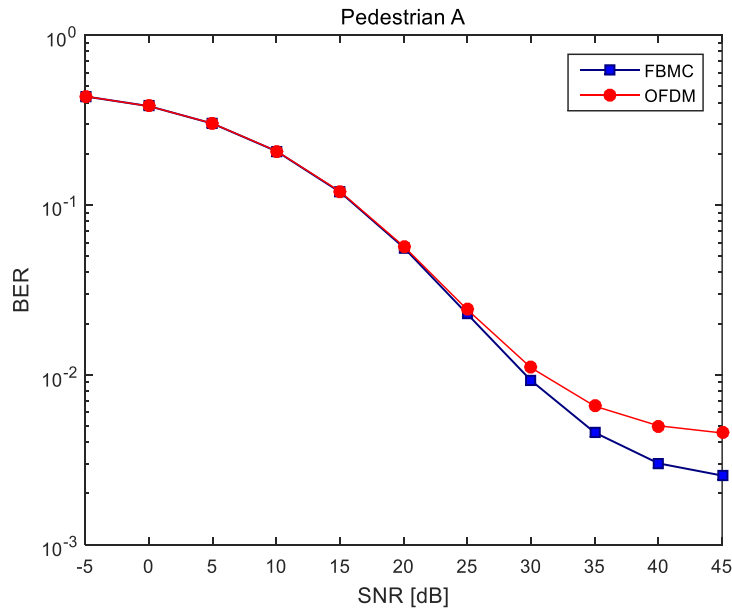


Figure 3.2. Comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Pedestrian A.

La Figure 3.2 présente la comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Pedestrian A, à partir de cette figure on remarque que les valeurs de taux d'erreur binaire FBMC et OFDM sont les mêmes quand $SNR \leq 20$, et le BER de FBMC diminue par rapport le BER d'OFDM quand $SNR > 20$

3.4.2. Densité spectrale de puissance

Dans cette simulation on va comparer les PSD d'OFDM et FBMC en variant le type du filtre. Nous exprimons les résultats en termes de $PSD_{[db]}$ en fonction de la fréquence [Hz].

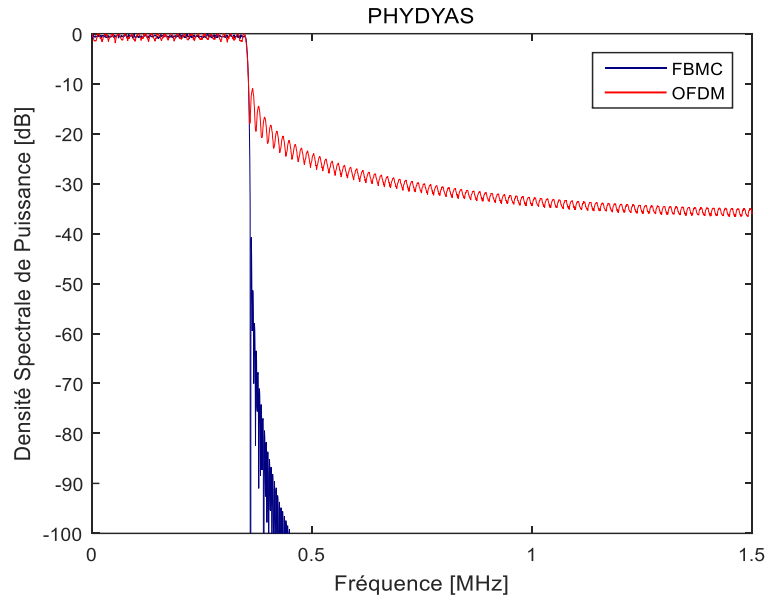


Figure 3.3. Comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre PHYDYAS.

La figure 3.3 présente la comparaison entre la PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre PHYDYAS OQAM, à partir de cette figure on observe une grande diminution de fuite spectrale et des lobes latéraux secondaires. Le FBMC a la densité spectrale la plus proche de la fréquence normalisée par rapport à la modulation OFDM.

3.4.3. CCDF de PAPR

Cette partie est consacrée pour la simulation de CCDF PAPR de la technique FBMC avec une modulation OQAM.

3.4.3.1. Comparaison entre le PAPR OFDM et le PAPR FBMC

Dans cette partie, nous comparons entre la CCDF PAPR de FBMC et celle d'OFDM pour un nombre total de sous porteuses égale 256.

Étant donné que l'OFDM et le FBMC sont des formes spéciales de technologie de modulation multi-porteuse, ils produisent inévitablement un PAPR élevé. Comme on peut le voir sur la figure 3.4, le FBMC a un PAPR plus élevé que l'OFDM. Des rapports de puissance crête/moyenne plus élevés peuvent entraîner une consommation électrique importante.

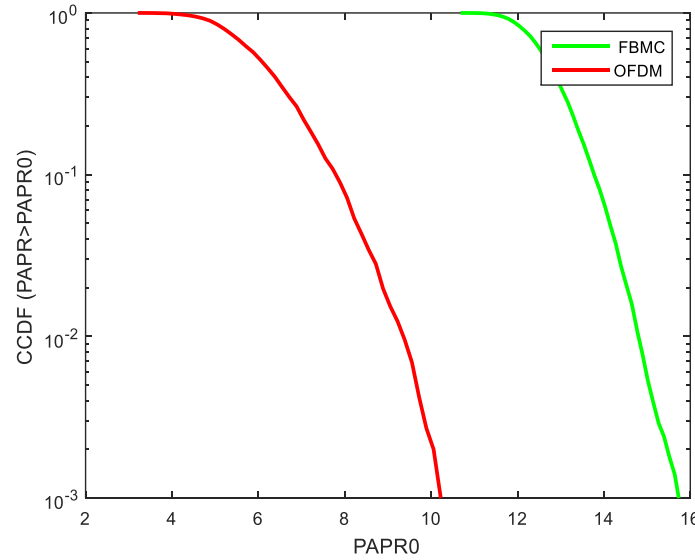


Figure 3.4. Comparaison entre la CCDF PAPR de FBMC et la CCDF PAPR de OFDM.

3.4.3.2. Impact de facteur de sur échantillonnage sur la CCDF PAPR

Cette partie de simulation est dédiée pour tester l'impact du facteur de sur échantillonnage sur les performances de PAPR de la technique FBMC. On change le facteur de sur échantillonnage et on remarque à chaque fois qu'on augmente le facteur, la CCDF donne des valeurs différentes. Donc, la CCDF a une relation directe avec le facteur de sur échantillonnage.

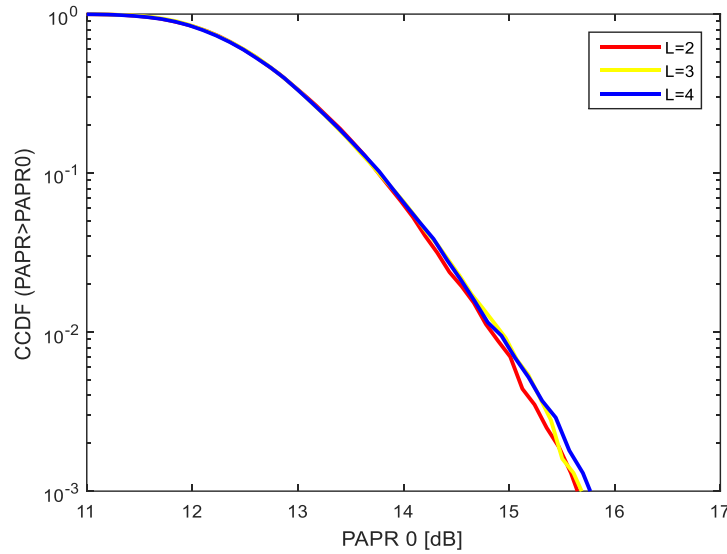


Figure 3.5. CCDF PAPR d'un signal OQAM FBMC pour différentes valeurs de facteur de sur échantillonnage.

3.5. Conclusion

Le but de ce mémoire est d'obtenir une analyse des performances des différents schémas de modulation FBMC et OFDM implémentés dans les communications 5G. Cela a aidé à obtenir l'efficacité des techniques de modulation en tenant compte de paramètres tels que PAPR, BER et densité spectrale. Selon les résultats de simulation, comparé au système OFDM, le FBMC a un taux d'erreur binaire inférieur, une efficacité spectrale plus élevée et un PAPR plus élevé. Dans la recherche suivante, nous nous concentrerons sur l'algorithme de suppression du PAPR dans le système FBMC.

Conclusion générale

Au cours des dernières décennies, les techniques de communication multi-porteuses ont été largement adoptées dans de nombreux systèmes de communication pour la transmission à haut débit. Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM) est certainement l'une des technologies multiporteuses les plus connues et acceptées parmi les systèmes de communication principalement sans fil. Cependant, l'utilisation de préfixes cycliques et de bandes de garde pour éviter des lobes latéraux trop gros, se traduit par une perte d'efficacité spectrale par rapport aux performances théoriques. En raison des inconvénients mentionnés ci-dessus dans les systèmes OFDM, FBMC-OQAM a récemment attiré de plus en plus l'attention de nombreux chercheurs. FBMC-OQAM utilise la mise en forme d'impulsions via une banque de filtres IFFT/FFT et des symboles OQAM décalés, symboles réels à deux fois le débit de symboles de FBMC-QAM. Indépendamment de la complexité plus élevée par rapport à l'OFDM, FBMC-OQAM peut fournir des émissions hors bande remarquablement réduites, une robustesse contre décalage de fréquence porteuse, et une meilleure efficacité spectrale comme CP n'est pas nécessaire.

Dans ce mémoire, nous avons comparé les techniques de modulation FBMC à la technique OFDM existante en comparant la densité spectrale, le PAPR et le BER de la modulation FBMC et OFDM techniques pour en analyser les mérites.

Cela a aidé à obtenir l'efficacité des techniques de modulation en tenant compte de paramètres tels que PAPR, BER et densité spectrale. Selon les résultats de simulation obtenus, par rapport au système OFDM, le FBMC-OQAM a un taux d'erreur binaire inférieur, une efficacité spectrale plus élevée et un PAPR plus élevé. Dans la recherche suivante, nous nous concentrerons sur l'algorithme de suppression du PAPR dans le système FBMC.

Bibliographie

- [1] http://efort.com/index.php?PageID=21&l=fr&f_id=139&imageField.x=2&imageField.y=2pp4_5.
- [2] Bendahmane Amira Meriem et Ghermoul Rania, Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC, pour l'obtention du diplôme de Master, – Université Aboubekr Belkaïd – Tlemcen 2018/06/25 p4.
- [3] Korichi Khaled et Moussaoui Salah Eddine, Analyse des performances de FBMC dans un système de transmission sans fil, Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER, Université d'EL-Oued Faculté des Sciences et de la Technologies, 2018/2019,9,11_13.
- [4] HACINI Khaled ABADELIA Anes, Egaliseur LTE-LMS avec différentes modulations, diplôme de Master Académique, Université 8Mai 1945 – Guelma, Juillet 2019, pp12,14.
- [5] RAKOTOMAMONJY Fenitrarivony Princius, ETUDE DE PERFORMANCE DES FORMES D'ONDES ET DU MASSIVE MIMO SUR LA 5G, du DIPLOME de MASTER, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2017 / 2018, pp8_11.
- [6] YUCEFI Abdessamad Mazlumi Ibrahim, "Les différentes formes d'onde candidates dans les applications 5G", Thèse de Master, Université du Guelma, Juillet 2019.
- [7] BENSENOUCI Salima, BENSABER Habiba Bochra, *Evaluation d'un système de communication FBMC*, Thèse de MASTER, Télécommunications, Réseau et Télécommunications, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2019.
- [8] BELARBI Abderrahmane, BELMEDANI Houssam Eddine, « ETUDE COMPARATIVE DES FORMES D'ONDES CANDIDATES À LA 5G OFDM, FBMC ET UPMC », Thèse de MASTER, Faculté de TECHNOLOGIE, Télécommunications, Réseau et Télécommunications, Université du Tlemcen 2019.
- [9] HACINI Khaled, ABADELIA Anes, « Egaliseur LTE-LMS avec différentes modulations », Thèse de MASTER, Département d'Electronique et Télécommunications, Systèmes de Télécommunications, Université du Guelma, 2019.

- [10] Korichi Khaled , Moussaoui Salah Eddine, « Analyse des performances de FBMC dans un système de transmission sans fil », Thèse de MASTER, Faculté de TECHNOLOGIE, Système de Télécommunication, Université d'EL-Oued, 2018-2019.
- [11] RAKOTOMAMONJY Fenitrarivony Princius, « ETUDE DE PERFORMANCE DES FORMES D'ONDES ET DU MASSIVE MIMO SUR LA 5G », diplôme de MASTER , Sciences de l'Ingénieur, Télécommunication ,Ingénierie des Radiocommunications (IRC), UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2017 / 2018.
- [12] ARI VIHOLAINEN, MAURICE BELLANGER, and MATHIEU HUCHARD, "Prototype filter and structure optimization," website : www.ict-phydyas.org : Document D5.1 deliverable, 2009.
- [13] DALI Amina , BOUAFIA Zineb, « Étude énergétique de la forme d'ondes multi porteuses à base de banc de filtres », , diplôme de MASTER, Réseaux et Systèmes de Télécommunications, Université du Tlemcen, 2019.
- [14] REZGUI BADREDDINE, « Conception d'un système de communication sans fils multi- porteuses à base de Bancs de filtres FBMC », Thèse du Master, département GENIE ELECTRIQUE, Electronique Système Embarque, Université D'OUM EL BOUAGHI, 2019.
- [15] Hanen BOUHADDA, « Impacts des non-linéarités dans les systèmes multi- porteuses de type FBMC/OQAM », Thèse de DOCTORAT, Sciences de l'information et de la communication/Radiocommunications, École Doctorale en Technologies de l'Information et de la Communication Laboratoire Innov'Com, 22 Mars 2016
- [16] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Wikipédia:Accueil_principal

Résumé

La modulation FBMC-OQAM se positionne comme un candidat potentiel pour les futurs systèmes de communication. Le but de cette thèse est de comparer les techniques de modulation 5G proposées FBMC-OQAM à l'OFDM qui est la technique de modulation utilisée dans les communications 4G. Dans ce travail, nous comparons la densité spectrale, le PAPR, le BER des techniques de modulation FBMC-OQAM et OFDM pour en analyser les mérites. Les résultats de la simulation montrent que le FBMC-OQAM a le BER inférieur, le PAPR plus élevé et les meilleures performances de densité spectrale par rapport à la modulation OFDM.

Mots clés : FBMC–OQAM, HPA, CCDF, PAPR.

Abstract

FBMC-OQAM modulation is positioned as a potential candidate for future communication systems. The purpose of this thesis is to compare the proposed 5G modulation techniques FBMC-OQAM against OFDM which is the modulation technique used in 4G communications. In this work, we compare Spectral Density, PAPR, BER of FBMC-OQAM and OFDM modulation techniques to analyze the merits of them. The simulation results show that FBMC-OQAM has the lower BER, higher PAPR and the better performance of Spectral Density compared to OFDM modulation.

Keywords: FBMC-OQAM, HPA, CCDF, PAP.

ملخص

يتم وضع تعديل FBMC-OQAM كمرشح محتمل لأنظمة الاتصالات المستقبلية. الغرض من هذه الرسالة هو مقارنة تقنيات التعديل G5 المقترحة FBMC-OQAM مقابل OFDM وهي تقنية التعديل المستخدمة في اتصالات 4G. في هذا العمل ، قمنا بمقارنة تقنيات تعديل الكثافة الطيفية ، و PAPR ، و BER لـ FBMC-OQAM و OFDM لتحليل مزاياها. تظهر نتائج المحاكاة أن FBMC-OQAM لديها معدل BER أقل ، وأعلى PAPR وأداء أفضل للكثافة الطيفية مقارنة بتشكيل OFDM

الكلمات الرئيسية: FBMC-OQAM, HPA, CCDF, PAP.

