

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8Mai 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 Académique

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Télécommunication**
Spécialité : **Systemes des télécommunications**

**Architecture et transmission de l'information dans les
réseaux radio-mobiles 5G**

Présenté par :

Azzedine Marwa

Yahiaoui Marwa

Sous la direction de :

Pr. Redadaa Salah

Juillet 2021

REMERCIEMENTS

Tout d'abord nous remercions ALLAH le tout puissant pour ces Faveurs et ses bontés.

Nous tenons à remercier Monsieur Pr. SALAH RDADAA notre encadreur, pour sa patience, sa disponibilité, son soutien, ses précieux conseils, ses remarques pertinentes, ainsi que ses explications ont été déterminants dans la réalisation de ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements aux membres de jury. Veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance, également tous les membres du département d'électronique et de télécommunication de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma.

Nous profitons aussi de ce mémoire pour exprimer nos plus vifs remerciements envers tous les professeurs de la faculté qui nous ont apportés du soutien durant nos études.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à celle qui

M'a mis au monde, le symbole de tendresse et la joie,

Qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère, à mon chéri papa.

A mes adorables sœurs Hanane, kawther et Sandra pour leur amour et leur soutien,

A ma belle nièce Dania et mon petit homme, mon neveu Anas,

A tous mes familles et à tous mes amis.

A tous ceux qui m'aime et tous ceux que j'aime.

AZZEDINE MARWA

Dédicaces

Je dédie ce mémoire a : ma famille

A l'âme pure de mon père, que Dieu la place au paradis

A ma Mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie ; reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude

A mes chères sœurs qui m'ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux. J'espère qu'un jour, Je pourrai rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi.

A mes chers amis que je les considère comme une deuxième famille.

A tous celles et ceux qui m'ont poussé à viser plus haut et plus loin.

MARWA YAHIAOUI.

Résumé

Avec l'augmentation du trafic de données, la multiplication des objets connectés et la diversification des types de communication, la cinquième génération de réseaux cellulaires (5G) relève un grand nombre de défis. Dans ce contexte, les systèmes « massive MIMO » présentent de nombreux avantages en utilisant un grand nombre d'antennes combiné à des techniques de traitement de signal adaptées. Actuellement, les techniques multi-porteuses sont largement utilisées dans les systèmes de transmission grâce à leur robustesse aux effets de trajets multiples et leur implémentation efficace utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). Bien que l'OFDM soit la technique multi-porteuse la plus répandue, sa forme d'impulsion rectangulaire et son utilisation de préfixe cyclique (CP) le rendent inapproprié pour les applications 5G. La proposition de la nouvelle approche appelée la modulation FBMC/OQAM basée sur les bancs de filtres, au lieu de la modulation OFDM pourrait améliorer la performance des systèmes dans certaines situations. Le filtre prototype bien localisé en temps et en fréquence, le débit binaire élevé, l'efficacité spectrale, tous ces avantages font le FBMC-OQAM un candidat de choix pour le réseau 5G et au-delà.

Dans ce travail, quatre parties ont été traitées. Tout d'abord, nous présentons la 5ème génération, leurs caractéristiques et son architecture. Deuxièmes, le principe et les avantages de la modulation OFDM et ses limites en 5ème génération. Troisièmes : le principe et la structure de la modulation FBMC/OQAM et sa comparaison avec l'OFDM. Enfin, nous avons effectué différentes simulations à l'aide des outils MATLAB pour la vérification des concepts théoriques abordés dans ce mémoire.

ABSTRACT

With the increase in data traffic, the proliferation of connected objects and the diversification of types of communication, the fifth generation of cellular networks (5G) meet a large number of challenges. In this context, “massive MIMO” systems have many advantages by using a large number of antennas combined with suitable signal processing techniques. Currently, multi-carrier techniques are widely used in transmission systems due to their robustness to multipath effects and efficient implementation using FFT. Although OFDM is the most popular multi-carrier technique, its rectangular pulse shape and use of cyclic prefix (CP) make it unsuitable for 5G applications and beyond.

Using the new approach called FBMC / OQAM modulation based on filter banks, instead of OFDM modulation could improve system performance in certain situations. The prototype filter well localized in time and frequency, the high bit rate, the spectral efficiency, all these advantages make the FBMC a prime candidate for the 5G network.

In this work, four parts are addressed. First, we present the 5th generation, their characteristics and architecture. Second: The principle and advantages of OFDM modulation and its limits in 5th generation. Third: The principle and structure of FBMC / OQAM modulation and its comparison with OFDM. Finally, we performed different simulations using MATLAB tools to select the best modulation.

ملخص

مع زيادة حركة البيانات وتنوع طرق الاتصال، أصبح يواجه الجيل الخامس من الشبكات الخلوية عدد كبير من التحديات والعراقيل.

في هذا السياق، تقدم «massive MIMO» العديد من المزايا باستعمال عدد معتبر من الهوائيات المعززة بتقنيات حديثة لمعالجة الاشارات المناسبة. حالياً، تستخدم التقنيات متعددة الموجات الحاملة على نطاق واسع في أنظمة الإرسال نظراً لقوتها وتنفيذها الفعال باستخدام FFT. على الرغم من أن تقنية OFDM هي التقنية متعددة الموجات الحاملة الأكثر شيوعاً، إلا أن شكلها النبضي واستخدامها البادئة الدورية (CP) يجعلها غير مناسبة لتطبيقات الجيل الخامس.

وعليه يمكن اللجوء الى الأسلوب الجديد المسمى بتعديل FBMC/OQAM على أساس بنوك التصفية، بدلاً من تعديل OFDM، والذي يؤدي الى تحسين أداء النظام في مواقف معينة. التوضع الجيد لمرشح النموذج الأول في الوقت والتردد، معدل البث العالي، الكفاءة الطيفية، كلها مميزات تجعل FBMC مرشحاً رئيسياً لشبكة 5G وما بعدها.

في هذا العمل، تم معالجة أربعة أجزاء. أولاً، نقدم الجيل الخامس وخصائصه وهندسته المعمارية. ثانياً: مبدأ ومزايا تعديل OFDM وحدوده في الجيل الخامس. ثالثاً: مبدأ وهيكل تشكيل FBMC / OQAM ومقارنته مع OFDM. أخيراً، قمنا بإجراء عمليات محاكاة مختلفة باستخدام أدوات MATLAB للتحقق من المفاهيم النظرية التي تمت مناقشتها في هذه الأطروحة.

SOMMAIRE

RESUME

LISTE DES FIGURES.....I

LISTE DES ABREVIATIONS..... VII

INTRODUCTION GENERALE.....01

Chapitre I : Introduction sur La 5ième Génération

I.1 Introduction.....03

I.2 Définition.....03

I.3 L'architecture de la 5G.....03

I.3.1 Le service innovant04

I.3.2 La plate-forme de validation (Architecture réseau)04

I.3.3 La radio Hyper-Connecté.....04

I.3.3.1 MIMO massif05

I.4 Les Objectifs techniques de la 5G.....06

I.5 Les principales Caractéristiques du 5G08

I.6 Les Applications visées pour le réseau 5G09

I.7 Nouvelle radio (5G)10

I.7.1 Numérologies11

I.8 Les Avantages12

I.9 Les conséquences de la 5G pour les opérateurs mobiles13

I.10 Conclusion.....14

Chapitre II : Les Modulations Multi-porteuses (OFDM /SC-FDMA)

II.1 Introduction	15
II.2 Généralité sur la technologie LTE (4G)	15
II.2.1 Architecture générale	16
II.2.1.1 Réseau d'accès LTE	16
II.2.1.2 Le réseaux de cœur EPC (Evolved Packet Core)	16
II.2.2 Les Caractéristiques	17
II.3 Le système OFDM	18
II.3.1 Chaîne de transmission OFDM	19
II.3.2 Principe et fonctionnement de l'OFDM	20
II.3.2.1 La modulation	20
II.3.2.2 La démodulation	22
II.3.3 Notions d'orthogonalité	22
II.3.3.1 L'orthogonalité fréquentielle	23
II.3.4 IDFT et DFT	24
II.3.5 L'intervalle de garde	24
II.3.5.1 Préfixe cyclique	25
II.3.6 Avantages de l'OFDM et ses limitations dans les applications 5G	26
II.4 LE SC-FDMA	27
II.4.1 Principe de fonctionnement du système SC-OFDM	27
II.4.2 L'émetteur SC-FDMA	28

II.4.2.1 Filtre de mise en forme	29
II.4.2.2 La Bande passante du canal de transmission	30
II.4.3 Le récepteur SC-FDMA	31
II.5 Allocation des ressources radio dans le système SC-FDM	31
II.5.1 Allocation de ressource en mode distribué	31
II.5.2 Allocation de ressource en mode localisé	32
II.6 Le facteur PAPR	33
II.6.1 Le CCDF de PAPR	34
II.6.2 Le PAPR élevé de l'OFDMA	34
II.7 La différence entre les deux accès SC-FDMA et OFDMA	34
II.8 Conclusion	35
 CHAPITRE III : La Modulation multi-porteuse à base de banc de filtres (FBMC/OQAM)	
III.1 Introduction	36
III.2 La Modulation FBMC/OQAM	36
III.3 Principe de FBMC/OQAM	37
III.4 La structure générale de la technique FBMC/OQAM	38
III.4.1 La Modulation OQAM	39
III.4.2 Bancs de filtres (Analyse et synthèse)	39
III.5 Structure Polyphasée des bancs de filtres	40

III.6 Filtre Prototype utilisé dans FBMC/OQAM	44
III.6.1 Le filtre PHYDYAS	45
III.7 Comparaisons entre l'OFDM et FBMC	47
III.8 Conclusion	47
Chapitre IV : Simulation et Résultats	
IV.1 Introduction	48
IV.2 Le PAPR des systèmes OFDM	48
IV.2.1 Approximation de la distribution	48
IV.2.2 Techniques de réduction du PAPR	49
IV.2.3 Description des performances	50
IV.2.4 Les Performances PAPR de la technique d'étalement DFT pour IFDMA, LFDMA et OFDMA	51
IV.3 Comparaison des techniques de transmission OFDM et FBMC/OQAM	54
IV.3.1 Influence du paramètre K sur la conception du filtre	54
IV.3.2 Comparaison du filtre OFDM avec le filtre prototype FBMC	55
IV.3.3 Densité spectrale de puissance	59
IV.5 Conclusion	60
Conclusion générale	61
Références bibliographique	62

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I.1: Architecture de 5G utilisateur.....	04
Figure I.2 : Système Massive MIMO avec N antennes pour desservir K	06
Figure I.3 : Comparaisons entre les exigences de la 4G et celles de la 5G	07
Figure I.4 : Les caractéristiques pour la 5 G.....	08
Figure I.5: les Applications de la 5G.....	10
Figure I.6 : Une allocation des blocs de ressource radio plus flexible en 5G.....	12

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Architecture de 4G.....	17
Figure II.2 : Gain en efficacité spectrale de l'OFDM par rapport à FDM.....	18
Figure II.3 : Chaîne de transmission du system OFDM.....	19
Figure II.4 : Schéma du principe de la modulation OFDM.....	21
Figure I.5: Application de la 5G.....	22
Figure II.6 : (a) Spectre d'une sous-porteuses et (b) Spectre d'un signal OFDM.....	23
Figure II.7 : Préfixe cyclique.....	25
Figure II.8 : Schéma bloc d'émetteur SC-FDMA.....	28
Figure II.9 : Filtre de mise en forme en Cosinus sur-élevé	30
Figure II.10: Schéma bloc du récepteur SC-FDMA.....	31
Figure II.11: Le Mapping I-FDMA.....	32
Figure II.12: Le Mapping L-FDMA.....	33
Figure II.13: spectre du signal SC-FDMA au niveau récepteur.....	33

CHAPITRE III :

Figure III.1: Modulation multi-porteuses des OFDM et FBMC.....	36
Figure III.2: Réponses en fréquence de l'OFDM et de la FBMC/OQAM.....	37

Figure III.3 : Structure chevauchante de FBMC OQAM.....	38
Figure III.4 : Structure générale de la technique FBMC/OQAM.....	39
Figure III.5: La mise en œuvre polyphasée du filtre $F(z)$	41
Figure III.6: Banc de N filtres basé sur le décalage du filtre prototype.....	41
Figure III.7 : Configuration polyphasée du SFB.....	43
Figure III.8: Configuration polyphasée simplifiée de l'AFB.....	44
Figure III.9: Réponses fréquentielles des filtres PHYDYAS (FBMC) et rectangulaire (OFDM).....	46
Figure III.10 : Réponse fréquentielle du filtre prototype PHYDYAS.....	46
CHAPITRE IV :	
Figure IV.1: CCDF de signaux OFDM avec différents nombres de sous-porteuses (N).....	49
Figure IV.2: Performance PAPR d'un système 32-QAM/OFDM avec technique PTS lorsque le nombre de sous-blocs varie.....	50
Figure IV.3: Performances PAPR de la technique d'étalement DFT pour IFDMA, LFDMA et OFDMA.....	51
Figure IV.4: Performances PAPR de la technique d'étalement DFT avec mise en forme d'impulsion... ..	52
Figure IV.5: Performances PAPR de la technique d'étalement DFT	53
Figure IV.6: Réponse fréquentielle du filtre prototype PHYDYAS en variation de K.....	54
Figure IV.7: Comparaison la réponse fréquentielle OFDM/FBMC.....	55
Figure IV.8: Réponses d'amplitude de filtre de la FBMC et OFDM.....	56
Figure IV.9-12 : Quatre sous-porteuses OFDM et FBMC en variation de K.....	57
Figure IV.13: Densité spectrale de puissance (DSP) pour OFDM et FBMC.....	59
Figure IV.14: Espacement et bande passante de FBMC et OFDM pour DSP.....	60

LISTE DES TABLAUX

Tableau I.1 : Numérogie de transmission prises en charge.

Liste Des Abréviations

- 3GPP 3rd Generation Partnership Project
- IOT Internet Of Things- internet des objets
- 1G Première Génération
- 2G Deuxième Génération
- 3G Troisième Génération
- 4G Quatrième Génération
- MIMO Multiple Input Multiple Output
- LTE Long Term Evolution
- LTE-A Long Term Evolution-Advanced
- OFDM Orthogonal Frequency Division Multiple
- SC-FDMA Signal Carrier- Frequency Division Multiple Access
- FFT Fast Fourier Transform
- IFFT Inverse Fast Fourier Transform
- DFT Discrete Fourier Transform
- IDFT Inverse Discrete Fourier Transform
- CP Cyclic Prefix
- ICI Inter Channel Interférence
- CAN Convertisseur Analogique /Numérique
- S/P Série to parallel
- NR New radio
- PAPR Peak to Average Power Ratio.
- CCDF Complementary Cumulative Distribution Function
- MME Mobility Manager Entity
- SGW Serving Gateway
- DAB Digital Audio Broadcasting
- WIFI Wireless Fidelity IEEE
- WiMAX Worldwide interoperability for microwave Access IEEE
- PSK Phase-Shift Keying

- QPSK Quadrature Phase-Shift Keying
- QAM Quadrature Amplitude Modulation
- L-FDMA Localized Frequency Division Multiple Access
- I-FDMA Interleaved Frequency Division Multiple Access.
- OoB Out of band
- SFB Synthesis Filtre Bank
- AFB Analysis Filtre Bank
- PPN Poly Phase Network
- BC Bande de cohérence
- UWB Ultra Wide Band
- IP Internet Protocol
- FBMC Filter Bank Multi Carrier
- PHYDAS Physical layer for Dynamic Access
- OQAM Offset Quadrature Amplitude Modulation
- ADSL Asymmetric Digital Subscriber Line
- UMTS Universal Mobile Telecommunication System
- EPC Equipement de Protection Collective
- SNR Signal to noise ratio
- DSP Digital Signal Processor

Introduction Générale

De nos jours, dans un monde de très grande mobilité, la vitesse et la capacité des Systèmes de transmissions sont des éléments essentiels afin de pouvoir maintenir les gens du monde entier en communication. Les premiers systèmes des communications numériques étaient basés sur la modulation mono-porteuse. En général, lorsque l'on veut augmenter le débit d'une transmission, on doit diminuer la durée des symboles. Cependant, la présence d'un canal multi-trajet a comme effet d'introduire de l'interférence inter-symboles (ISI), ce qui nécessite à la réception une égalisation relativement complexe [1].

Des anciens systèmes mobiles font généralement référence à un changement de nature du système, de vitesse, de technologie, de fréquence, de capacité de donnée, de latence...etc. La première génération (1 G) était analogique et utilise uniquement pour les appels vocaux, la deuxième génération (2G) est une technologie numérique et prend en charge la messagerie texte. La technologie mobile de troisième génération (3G) a fourni un taux de transmission de données plus élevé, une capacité accrue et un support multimédia. La quatrième génération (4G) intègre la 3G avec internet fixe pour soutenir internet mobile sans fil qui est une évolution vers la technologie mobile et surmonter les limitations de 3G. Cela augmente également la bande passante et réduit le cout des ressources [2]. En fait, ces dernières années, l'industrie du sans-fil a lancé une feuille de route pour la transition de la 4G à la 5G. Le passage à la 5G est perçu comme l'intégration des services Internet avec des normes de réseaux mobiles, ce qui permet « Internet mobile » sur des réseaux hétérogènes avec des vitesses de connexion très élevées. Contrairement aux normes précédentes (3G et 4G) qui étaient principalement pour but d'améliorer les débits offerts en mobilité, la 5G est une norme horizontale conçue pour résoudre divers problèmes de connexion. [3].

La modulation multi- porteuses a été proposée comme solution alternative pour lutter contre les effets des canaux multi-trajets. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est la modulation multi-porteuses la plus largement utilisée dans de nombreux systèmes de communication sans fil, tels que Wifi IEEE 802.11, WiMax IEEE 802.16 et LTE. La popularité de la modulation OFDM est principalement due à sa haute efficacité spectrale apportée par l'espacement étroit entre les sous-porteuses orthogonales, sa robustesse aux effets de trajets multiples, et sa capacité à éviter les interférences inter-symboles et inter-porteuses dues à l'ajout de préfixe (CP). Malgré ces avantages, l'OFDM présente certains inconvénients (l'ajout d'un préfixe cyclique entraînera une perte d'efficacité, et l'utilisation de filtres rectangulaires

produira des lobes secondaires plus grands), ce qui a incité les chercheurs à développer d'autres solutions [4].

Afin de surmonter les limitations et les inconvénients de l'OFDM, de nombreux travaux de recherche se sont concentrés sur le développement de nouvelles formes d'onde basées sur des bancs de filtres, Filter Bank based Multi-Carrier (FBMC) en anglais, ont été proposés en tant qu'une approche alternative à la modulation OFDM, qui, en plus de fournir des débits binaires élevés, ont également une meilleure efficacité spectrale qu'OFDM. En d'autres termes, l'utilisation de FBMC réduit les interférences entre canaux adjacents, et FBMC est plus adapté à la coexistence entre utilisateurs asynchrones dans des bandes de fréquences adjacentes. Cela a incité les chercheurs à proposer FBMC/OQAM comme norme 5G pour les communications radio mobiles. [5].

Le principal objectif de ce mémoire est étudié les deux systèmes des modulations multi-porteuses OFDM et FMBC/OQAM afin de pouvoir faire une étude comparative. Par conséquent, le plan de ce mémoire est le suivant :

- Dans le premier chapitre, nous allons définir la 5G ensuite nous allons décrire une présentation sur l'architecture de la 5G.
- Le chapitre II est consacré à la présentation de système OFDM, définition et principe de cette technique.
- Dans le chapitre III, nous allons décrire la Modulation FBMC/OQAM, leur définition, leur architecture, ainsi une comparaison entre l'OFDM et FBMC.
- Le quatrième chapitre présente quelques simulations pour confirmer notre étude théorique faite dans les précédents chapitres sur le facteur de crête (PAPR) pour le système OFDM et une autre et Pour la comparaison entre OFDM et FBMC. En utilisant comme logiciel de simulation Matlab version 2016 [6].

Chapitre I : introduction sur la 5^e génération

I.1 Introduction :

La 5G est une nouvelle génération des standards de la téléphonie mobile qui va succéder à la 4G LTE, cette évolution va être dépensée à chaque objet physique dans le monde. La 5G ne représente pas une évolution des réseaux précédents mais elle correspond à une nouvelle fondation technologique développée pour but de soutenir les demandes croissantes des clients, elle répond aussi aux différents besoins comme l'augmentation des débits pour les usages courants de la mobilité et une latence de 1 ms ou moins.

I.2 Définition :

Le réseau 5G contient un ensemble de technologies correspondant à la cinquième génération du standard pour la téléphonie mobile, il est validé par L'ITU. Cette nouvelle technologie a pour but d'améliorer la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Avec la 5G, la transmission des données sur connexions haut débit sans fil pourrait atteindre selon certaines estimations une vitesse de 20Gbit/s. Le réseau 5G réduira considérablement les temps de latence à 1 ms contrairement aux 30- 40 ms observées dans la 4G. Ce nouveau réseau ouvre des nouvelles perspectives, L'objectif sera d'élargir considérablement la gamme des usages, la diversité des utilisateurs et de pouvoir contrôler les objets à distance.

I.3 L'architecture de la 5G :

L'architecture réseau de la technologie mobile 5G s'améliore considérablement par rapport aux architectures antérieures. Les grands réseaux denses en cellules permettent d'énormes progrès en termes de performances. De plus, l'architecture des réseaux 5G offre une meilleure sécurité par rapport aux réseaux 4G LTE actuels. L'architecture 5G est principalement composée de trois couches horizontales, à savoir « l'activation de service innovante », « la plateforme d'activation » et « la radio hyper -connectée » [7].



Figure I.1: L'Architecture de la 5G [2].

I.3.1 Le service innovant :

La couche supérieure inclut des services 5G innovants basé sur des capacités d'infrastructure 5G différenciées, les services 5G seront en mesure d'offrir une expérience utilisateur hautement fiable et immersive. En particulier, le streaming vidéo en ultrahaute définition finira par devenir des services dominants offrant des expériences utilisateur virtuelles telles que le streaming vidéo multi-view et même les hologrammes. De plus, la bande passante suffisante et la grande fiabilité offerte par la 5G faciliteront l'émergence de services de contrôle de robots à distance et de services d'Internet des objets (IoT) essentiels à la mission.

I.3.2 La plate-forme de validation (Architecture réseau) :

La couche intermédiaire crée des valeurs significatives et centrées sur le service pour prendre en charge la couche supérieure de « service innovant » en transformant correctement les éléments mécaniques et disjoints. Il est utilisé via deux activateurs clés. L'un est la virtualisation des fonctions réseau NFV (Network Function Virtualisation) et le réseau SDN (Software Defined Networking), qui virtualisent l'infrastructure et les services pour offrir plus de flexibilité et d'intelligence au niveau du réseau).

I.3.3 La radio Hyper-Connecté :

La couche inférieure peut fournir une quantité massive de données à la couche "plate-forme d'activation" d'une manière efficace et transparente. En raison de l'énorme quantité de données de transmission et des exigences de latence strictes [2].

I.3.3.1 MIMO massif :

Les réseaux MIMO (Multiple Input Multiple Output) massifs connus sous le nom de Massive MIMO. Cette technologie émergente se présente comme l'une des méthodes les plus prometteuses pour les systèmes révolutionnaires de la cinquième génération des réseaux mobiles (5G) et de l'internet des objets. La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) est une technologie sans fil qui utilise plusieurs émetteurs et récepteurs pour transférer plus de données en même temps, d'autre part la technologie MIMO tire parti d'un phénomène d'ondes radioélectriques appelé trajets multiples, où les informations transmises rebondissent sur les murs, les plafonds et d'autres objets, atteignant l'antenne de réception plusieurs fois sous différents angles et à des moments légèrement différents. Elle exploite le comportement par trajets multiples en utilisant plusieurs émetteurs et récepteurs « intelligents » avec une dimension « spatiale » supplémentaire pour augmenter considérablement les performances et la portée. MIMO permet à plusieurs antennes d'envoyer et de recevoir plusieurs flux spatiaux en même temps. Grâce à MIMO, les antennes fonctionnent plus intelligemment en leur permettant de combiner des flux de données provenant de différents chemins et à différents moments pour augmenter efficacement la puissance de capture du signal du récepteur. Les antennes intelligentes utilisent la technologie de la diversité spatiale, qui permet de tirer la meilleure partie des antennes excédentaires. S'il y a plus d'antennes que de flux spatiaux, la portée -MIMO peut être résumé selon un principe : le multiplexage spatial MIMO utiliser simultanément les mêmes fréquences radioélectriques pour transmettre des signaux différents. Cela signifie que plusieurs antennes d'émission d'une station de base peuvent émettre des signaux différents et que plusieurs antennes de réception d'un appareil peuvent les recevoir et les diviser simultanément. Les réseaux MIMO standard utilisent généralement deux ou quatre antennes pour transmettre les données et le même nombre pour les recevoir. Massive MIMO, en revanche, est un système MIMO avec un nombre d'antennes particulièrement élevé. Massive MIMO augmente le nombre d'antennes d'émission (des dizaines ou plus de 100 éléments) sur une station de base (Figure I.2).

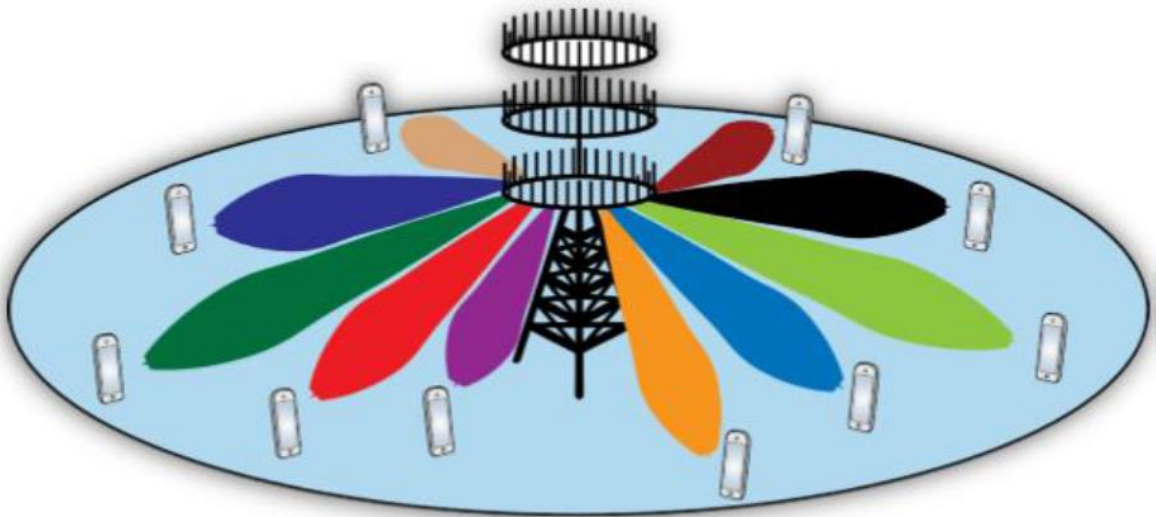


Figure I.2: Système Massive MIMO [8].

Cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « Intelligentes » sur un seul équipement (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre Augmentera avec l'utilisation de fréquences à 6Ghz). L'utilisation du massive MIMO permet :

- D'augmenter les débits grâce au multiplexage spatio-temporel.
- De focaliser l'énergie sur un terminal pour améliorer son bilan de liaison [8].

I.4 Les Objectifs techniques de la 5G :

L'objectif principal est de développer un réseau 5G pour répondre à divers besoins supplémentaires : augmenter la vitesse d'utilisation actuelle de téléphonie mobile, supporter une faible consommation d'énergie et la communication à distance des objets connectés, et enfin la communication de proximité. En parallèle il vise des usages très spécifiques, comme le réseautage et les véhicules autonomes, la santé et les objets connectés. 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 :

Voici les objectifs à atteindre selon les recommandations dans IMT-2020 définis sur 8KPI (Indicateurs de performances Clés) :

- Une bande passante d'au moins 100MHz.

- Des bande passantes allant jusqu'à 1GHz sont requises pour les hautes fréquences (>6GHz).
- Une densité de connectivité de 1million d'appareils/ Km².
- Un débit théorique de 20Gbit/s en liaison descendante, et 10Gbit/s en liaison montante.
- Un débit reçu par l'utilisateur de 100Mbit/s en liaison descendante, et 50Mbit/s en liaison montante.
- Une latence inférieure à 1ms.
- Une mobilité de 500km/h.
- Une disponibilité de 99.999% ainsi que 100% de couverture réseau.
- Une réduction de la consommation d'énergie à 90%.

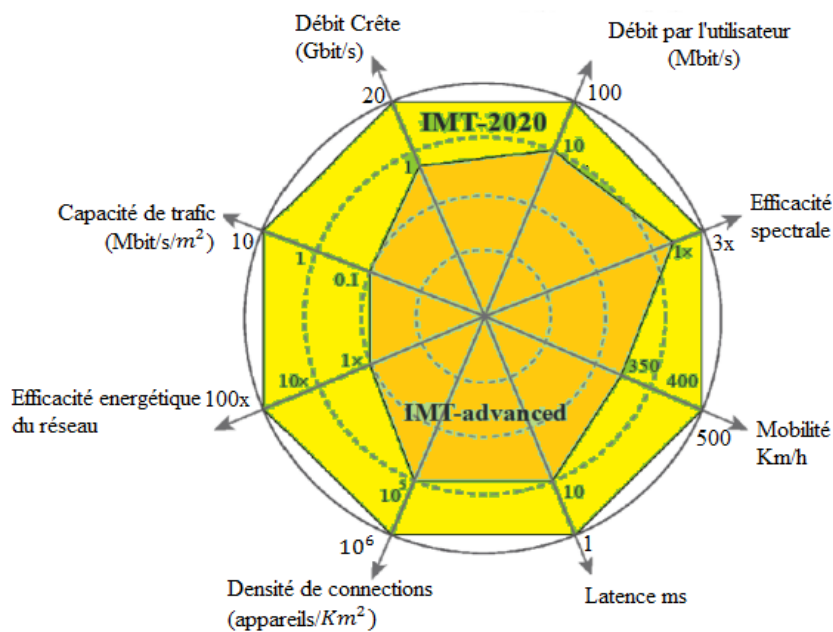


Figure I.3 : Comparaisons entre les exigences de la 4G et celles de la 5G [9].

Selon ces objectifs, la 5G doit être en mesure de fournir un débit utilisateur et un débit maximal, ils sont respectivement 10 fois et 20 fois plus élevés que ceux actuellement disponibles. La densité maximale le nombre de connexions sera multiplié par 10 et le délai divisé par au moins 10 (délai point à point) le point cible est de 1milliseconde, contre 30 à 40 millisecondes jusqu'à présente). Dans un premier temps, la 5G veut apporter des vitesses de Gigabits par seconde, le 100Mbit/s moyen perçu par chaque utilisateur est théoriquement aussi élevé que 20Gbit/s, mais son la vitesse brute n'est pas une priorité ? elle veut surtout réduire la latence transmission de

données. Aujourd'hui, le temps de réponse du réseau mobile peut être jusqu'à une demi-seconde, voire plus lorsque le réseau est surchargé. Une demi-seconde, ça cela peut sembler peu, mais pour par exemple, les voitures autonomes, c'est trop (laissez la voiture éviter l'accident, ou laissez le robot effectuer l'opération distance de fonctionnement précise). La 5G fournit un temps de retard de 1ms. Le problème principal est de résoudre la surcharge du réseau causée par la forte concentration du réseau terminal utilisateurs dans les zones urbaines.

La solution doit être du côté de la petite station de base. Ceux-ci permettront aux utilisateurs de distribuer efficacement sur plus d'antennes fournissent le haut débit en fonction de leur emplacement, plutôt que de les entasser dans une station de base. Enfin, l'objectif de la 5G est de réduire de 90% la consommation d'énergie, concrètement : 3 jours sans charger l'équipement de Communication, la durée de vie de la batterie est de 10 à 15 ans annuellement utilisé pour les objets de connexion à faible consommation [9]

I.5 Les principales Caractéristiques du 5G :

Le réseau mobile de 5^e génération ou simplement 5G est une révolution à venir de la technologie mobile. Avec son ultra-haut débit, il est suffisamment potentiel pour changer le sens de l'utilisabilité d'un téléphone portable.

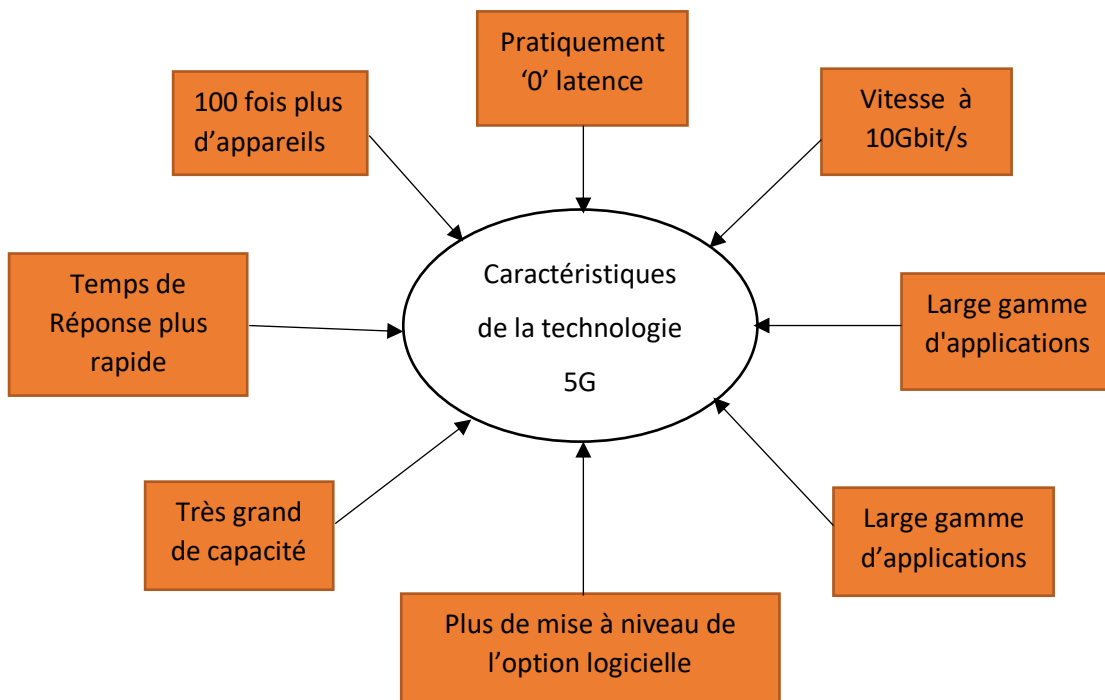


Figure I.4 : Les caractéristiques de la 5G [10].

Avec une vaste gamme de fonctionnalités innovantes, votre téléphone intelligent serait désormais parallèle à l'ordinateur portable. Vous pouvez utiliser une connexion Internet haut débit ; d'autres caractéristiques importantes qui fascinent les gens sont davantage d'options de jeu, des options multimédias plus larges, une connectivité partout, une latence nulle, un temps de réponse plus rapide et un son de haute qualité et une vidéo HD pouvant être transférés sur un autre téléphone portable sans compromettre la qualité de l'audio et de la vidéo. Et autres défis en termes d'efficacité :

- Efficacité spectrale supérieure 5-15 fois.
- Moindre cout par bit (supérieure 100temps de réduction).
- Meilleurs efficacité énergétique (supérieure 100 fois).
- Autres défis : Gestion du trafic, gestion des services et applications, la sécurité et le respect de vie de la normalisation (aspect radio et réseau) pour atteindre les objectifs de la 5G et relever les défis correspondants [10].

I.6 Les Applications visées pour le réseau 5G :

La 5G imprègne chaque élément construire en écosystème d'information multidimensionnel centré sur la société future sur l'utilisateur. Il brise les limites du temps et de l'espace et laissera une expérience utilisateur immersive et interactive. La 5G a réduit également la distance et nous permet de concrétiser notre vision. L'internet mobile et l'internet des objets (IOT) sont les deux principaux moteurs dans le futur développement du marché de la communication mobile, ils déclencheront un large éventail de cas d'utilisation [9].

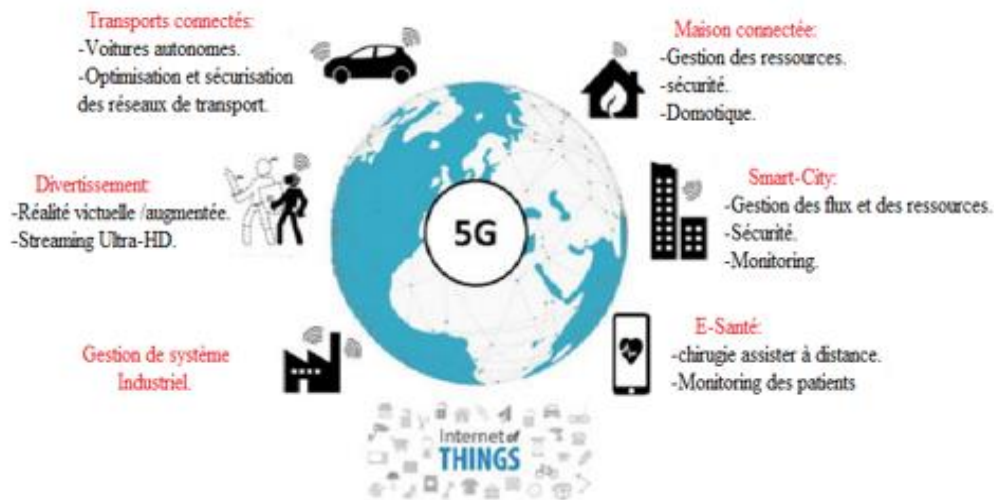


Figure I.5: les Applications de la 5G [11].

I.7 Nouvelle radio (5G) :

La nouvelle radio 5G (NR) est une partie très importante de la 5G. la nouvelle radio 5G (NR) utiliser de nombreuses technologies clés pour atteindre de nouveaux niveaux performances et efficacité. Les combinaisons de ces dernières étendront l'importance des communications mobiles et leurs permettront de jouer un rôle central dans un monde de cas d'utilisation changeants. Parmi les innovations potentielles dans la couche physique 5G, on peut citer :

- Communications dans la plage des ondes millimétriques.
- Communications massives MIMO.
- Accès multiple non orthogonal (NOMA).
- Communications sans fil full-duplex.
- Agrégation de porteuse et modulations Multi carrier
- Plus grand spectre.
- Communication de liaison latérale.
- Nouvelle forme d'onde et numérolgie (OFDM) hétérogène [11].

I.7.1 Numérolgies :

Dans les documents de 3GPP [12], le terme numérolgie fait référence à la configuration des paramètres de forme d'onde, et différentes numérolgies sont considérées comme des sous trames basées sur OFDM ayant différents paramètres tels que l'espacement des sous-porteuses, la durée du symbole, la taille du préfixe cyclique CP...Autrement dit une numérolgie est définie par l'espacement des sous-porteuses et l'entête du CP. Plusieurs espacements de sous-porteuses peuvent être calculés en mettant à l'échelle un espacement de base des sous-porteuses par un entier N .

La numérolgie utilisée peut être Sélectionnée indépendamment de la bande de fréquence, mais il est supposé que cet espacement soit très faible pour des fréquences des porteuses très élevées [10]. Le scénario ci-dessus révèle le déploiement hétérogène de NR différentes zones de couverture. Tenir compte de la mobilité des équipements utilisateurs (UE) jusqu'à 500 km/h, plusieurs longueurs de préfixe cyclique (CP) sont nécessaires adopté en NR. En fait, la fréquence porteuse et la bande passante de sous-porteuses affecteront également la longueur du CP utilisé. Par conséquent, il peut exister plusieurs combinaisons de paramètres de transmission physiques dans NR, par exemple, l'intervalle des sous-porteuses, la durée de chaque symbole de multiplexage distribution orthogonale de fréquence (OFDM), longueur CP.

Dans ce cas, l'espacement de la sous-porteuses étendu (supérieur à 15 KHz, tel qu'utilisé en LTE/ LTE-A, et il peut atteindre 960KHz) de plus, la fréquence porteuse élevée est-il est également facilement affecté par l'effet doppler, et un espacement important des sous-porteuses peut favoriser l'atténuation des interférences inter-porteuses. D'autre part NR devrait prend également en charge un faible espacement de sous-porteuses, tel que 3,75KHz, là où l'internet des objets à bande étroite (NB-IoT) permet, des bandes de fréquences inférieures sont plus économes en énergies. Enfin, l'espacement des sous-porteuses dans NR peut être étendu à une sou-porteuse dans NR peut être étendu à une sou-porteuse ou sur ensemble 15KHz. L'espacement possible des sous-porteuses peut être à partir de $15\text{KHz} \times 2\mu$, ou μ peut-être un entier positif/négatif ou zéro. Pour chaque valeur espacement des sous-porteuses, plusieurs longueurs de Cp peuvent être insérées s'adapter à différents niveaux d'interférences inter-code à différentes fréquences porteur et mobilité, les types de numérolgie NR sont résumés dans le tableau et le schéma ce qui suit [11].

μ	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15 [KHz]$	Préfix cyclique (CP)
0	15	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Elargie
3	90	Normal
4	120	Normal

Tableau I.1 : Numérogie de transmission prises en charge [11].

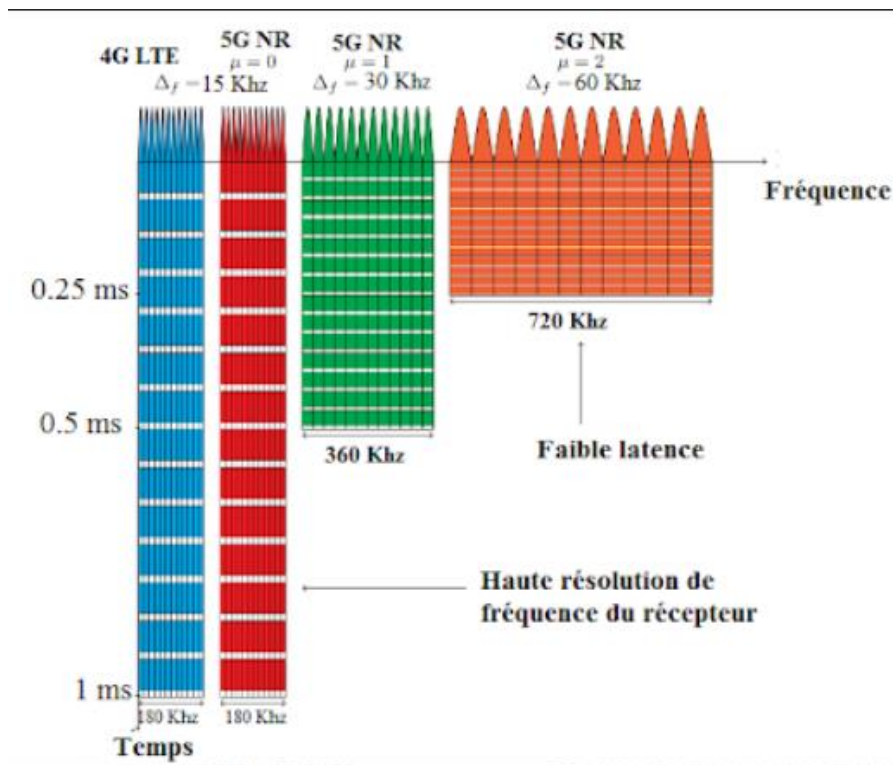


Figure I.6 : Une allocation des blocs de ressource radio plus flexible en 5G [13].

I.8 Les Avantages :

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. À termes, la 5G sera à la 4G la fibre optique est à l'ADSL. Le débit de la 5G sera jusqu'à 10 fois 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.9 Les 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 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.10 Conclusion :

5G devrait avoir d'innombrables cas d'utilisation, dont beaucoup ne sont pas imaginés aujourd'hui. Il est en effet positionné pour répondre aux demandes et aux contextes d'affaires de 2020 et au-delà. Il est nécessaire de fournir, un débit beaucoup plus élevé, une latence beaucoup plus faible, une fiabilité ultra-élevée, une Densité de connectivité beaucoup plus élevée et une plage de mobilité plus élevée. Cela permettrait de fournir beaucoup plus de services que la voix et les données.

Les exigences 5G couvrent les considérations de bout en bout, y compris les exigences relatives aux utilisateurs, aux systèmes, aux services améliorés, à la gestion et à l'exploitation, aux dispositifs et aux modèles commerciaux. Il est particulièrement important de maintenir les améliorations dans les domaines suivants capacité de réseau, Une expérience client cohérente, La flexibilité, Efficacité, des services Innovants.

Chapitre II : Les modulations Multi-porteuses (OFDM/SC-FDMA)

II.1 Introduction :

Les technologies des téléphones cellulaires sont en progression foudroyante, due à l'évolution de la technologie d'accès radio mobile. L'organisme de normalisation la 3GPP [12] a standardisé une nouvelle génération du réseau cellulaire appelé LTE, pour accroître le débit afin de satisfaire la demande des usagers mobiles. Par rapport aux normes précédentes, le LTE est une véritable évolution de l'accès radio mobile. L'originalité du LTE réside dans le processus de multiplexage et de codage des données dans les deux sens de la liaison sans fil. OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) est utilisé dans la liaison descendante (Down Link), et SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) est utilisé dans la liaison montante (up Link). Afin de supporter ces technologies, des réseaux mobiles à très haut débit ont été développés, qui peuvent offrir aux utilisateurs des vitesses de téléchargement plus élevées et une qualité de service Internet mobile, que ce soit en mode stationnaire ou en mobilité [15].

II.2 Généralité sur la technologie LTE (4G) :

La technologie 4G\LTE (Long Term Evolution) désigne la quatrième génération du réseau de téléphonie mobile actuellement déployée dans de nombreux pays représente une évolution majeure dans le domaine des réseaux mobiles. LTE est une extension du GSM (2G) et de l'UMTS (3G). Au milieu des années 2000, une nouvelle technologie mobile plus performante que la 3G et son évolution est née dans le groupe 3GPP (l'organisme de normalisation des systèmes mobiles 3G UMTS). Le but de cette technologie est de permettre théoriquement la transmission de données à des débits très élevés, jusqu'à 150 Mbit/s. avec une portée plus importante, et plus de capacité, plus de vitesse et un temps de latence plus faible (temps de réponse) [16]. Par rapport au réseau cellulaire précédent, la particularité de la 4G est le passage à une structure tout IP (Internet Protocol) pour le transport des communications vocales et les transmissions de données.

II.2.1 Architecture générale :

II.2.1.1 Réseau d'accès LTE :

Le réseau d'accès est constitué de stations de base appelées eNodeB ou eNB (Evolved Node B, le terme Node B étant repris de l'UMTS). Pour offrir des débits Élevés le LTE emploie la technologie OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) dans le sens descendant, et le SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) dans le sens montant [17]. LTE est responsable des fonctions liées à l'interface radio, telles que :

- La gestion des ressources radio.
- La compression de l'en-tête : qui optimise l'utilisation de l'interface radio en réduisant la taille de l'en-tête de paquets IP.
- La sécurité : La fonction de sécurité s'effectue à travers la protection de l'intégrité et le chiffrement des données transitant sur l'interface radio.
- La connectivité vers l'EPC : Elle se fait via le support du plan de contrôle vers le MME et du plan usager vers la S-GW [15].

MME (Mobility Manager Entity) : Il est responsable de savoir à tout moment où se trouve un utilisateur et de connaître son état (au repos, connecté ...). Il est aussi responsable de l'authentification des utilisateurs.

SGW (Serving Gateway) : Il est responsable du transfert d'un relais à un autre. Il est capable d'effectuer ce transfert vers un réseau 2G ou 3G.

II.2.1.2 Le réseaux de cœur EPC (Evolved Packet Core) :

Le Protocole TCP/IP (Internet pour la signalisation) représente la base de l'architecture de réseau cœur, Pour le transport de la voix et les données. Ce cœur de réseau permet l'interconnexion via des routeurs avec les eNodeB distants, les réseaux des autres opérateurs mobiles, les réseaux de téléphonie fixe et le réseau Internet. L'EPC d'un opérateur LTE est principalement constitué de passerelles de services, Serving Gateway (SGW) qui transportent le trafic de données (plan utilisateur) et concentrent le trafic de plusieurs eNodeB, de MME qui Gèrent la signalisation (plan de contrôle) et donnent l'accès aux bases de données (HSS / HLR) Contenant les identifiants et les droits des abonnés. Un (ou plusieurs) PGW servent de

Passerelles vers le réseau Internet ; le PGW a aussi pour rôle d'attribuer les adresses IP aux terminaux LTE [16].

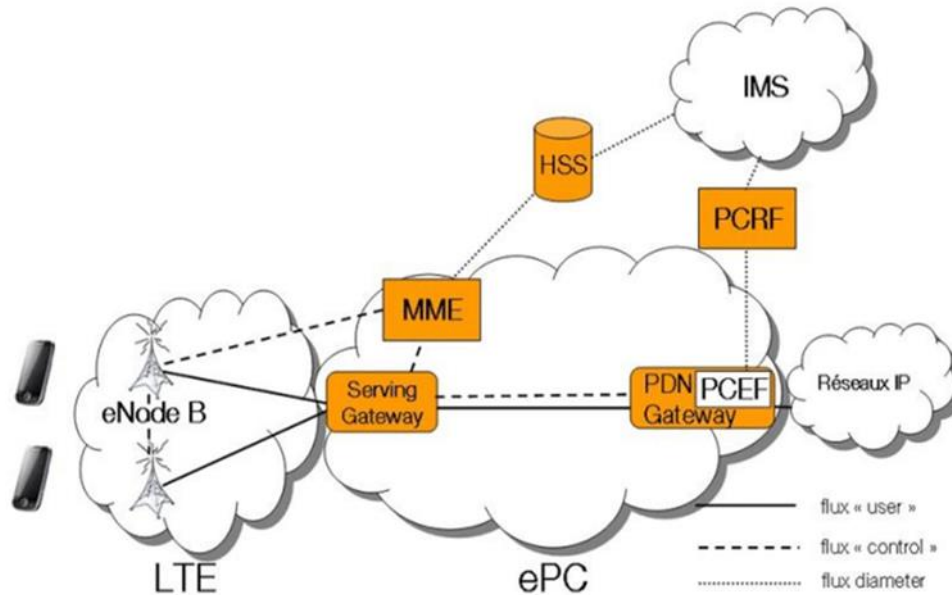


Figure II.1 : L'Architecture de 4G [14].

II.2.2 Les Caractéristiques :

- Bande de fréquence : Les bandes de fréquences hertziennes prévues par les normes 3GPP pour le LTE et le LTE Advanced sont très nombreuses (plus de 30) et s'étalent de 450 MHz à 3,8 GHz.
- Capacité : plus de 200 terminaux actifs simultanément dans chaque cellule.
- Débit de l'interface radio et délai de transmission de données : L'interface radio de l'E-UTRAN doit fournir un débit théorique de 100Mbits/s en sens descendant grâce à l'OFDMA, et 50 Mbits/s en sens montant en utilisant le SC-FDMA ; soit respectivement une efficacité spectrale de 5bits/s/Hz et 2.5 bits/s/Hz.

Le délai de transmission est de moins de 5ms entre l'UE et l'Access Gateway dans le cas où il n'y a qu'un seul terminal ACTIF (connecté) sur l'interface radio (situation de non-charge).

La valeur moyenne du délai devrait avoisiner les 25 ms en situation de charge moyenne de l'interface radio. Ceci permet de supporter les services temps réel IP, comme la voix sur IP et le streaming sur IP [18].

II.3 Le système OFDM :

L'OFDM est une technologie de transmission de données analogique spéciale et une solution efficace pour lutter contre les effets de trajets multiples. Du point de vue de la mise en œuvre numérique, le système OFDM transmet les données par blocs : le flux de données de débit R d'origine est multiplexé en N flux de débit R/N parallèles. Il s'agit bien d'un multiplexage fréquentiel, car les données sont transmises sur N canaux différents.

Pour effectuer ce type de transmission, le système OFDM ne transmet pas de données en série comme un système à porteuse unique, mais transmet des données bloc par bloc .sa structure cyclique permet une inversion simple du canal de propagation à l'aide de la transformée de Fourier [2].

L'OFDM utilise des sous-porteuses mutuellement orthogonales et rapprochées. Il peut fournir un spectre considérablement amélioré de 50 % ou plus Par rapport au système FDM traditionnel comme illustré sur la (figure II.2) [19].

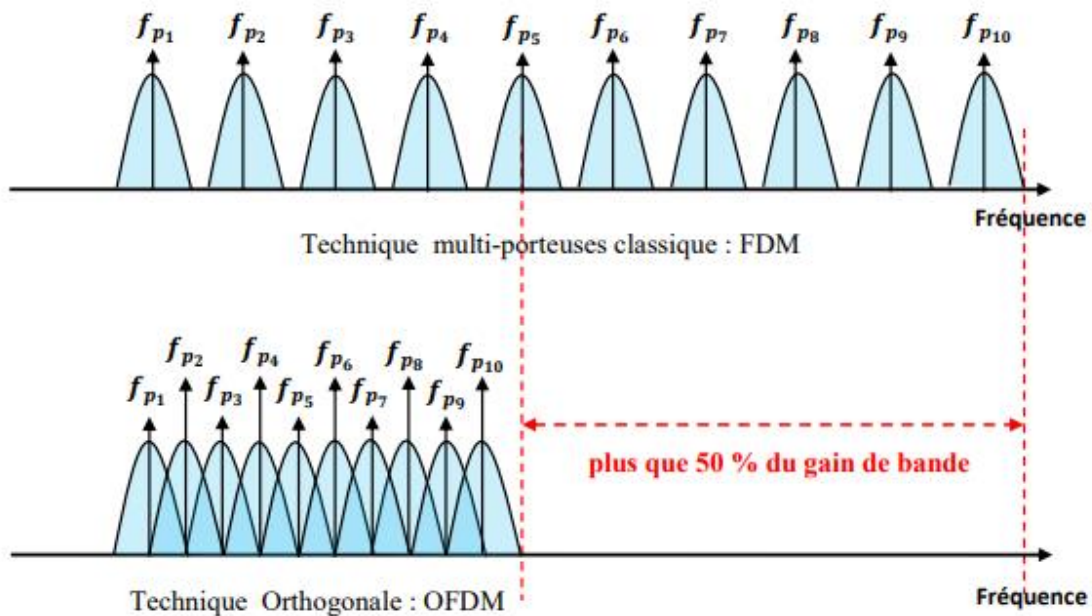


Figure II.2 : Gain en efficacité spectrale de l'OFDM par rapport à FDM [19].

La technique OFDM est maintenant utilisée dans diverses applications à haut débit, que ce soit en bande de base sur paire torsadée (ADSL) ou sur ondes radio pour les transmissions sans fil : télévision numérique terrestre (Digital vidéo Broadcasting DVB-T), radio numérique (Digital Audio Broadcasting DAB), WIFI (Wireless Fidelity IEEE 802.11g) et WiMax (Worldwide interoperability for microwave Access IEEE.16) [20].

II.3.1 Chaîne de transmission OFDM :

La Figure II.3 est un schéma fonctionnel simplifié d'un système OFDM. Sur le côté de l'émetteur, les symboles modulés (QAM/PSK) sont mappés sur N sous-porteuses orthogonales. Ceci est fait en utilisant l'opération de transformée de Fourier discrète inverse (IDFT). Généralement, l'IDFT est effectuée à l'aide d'un algorithme de transformée de Fourier rapide Inverse (IFFT), qui est très efficace du point de vue informatique. Insérez ensuite le CP et effectuez la conversion parallèle-série est effectuée préalablement à la transmission sur l'interface air.

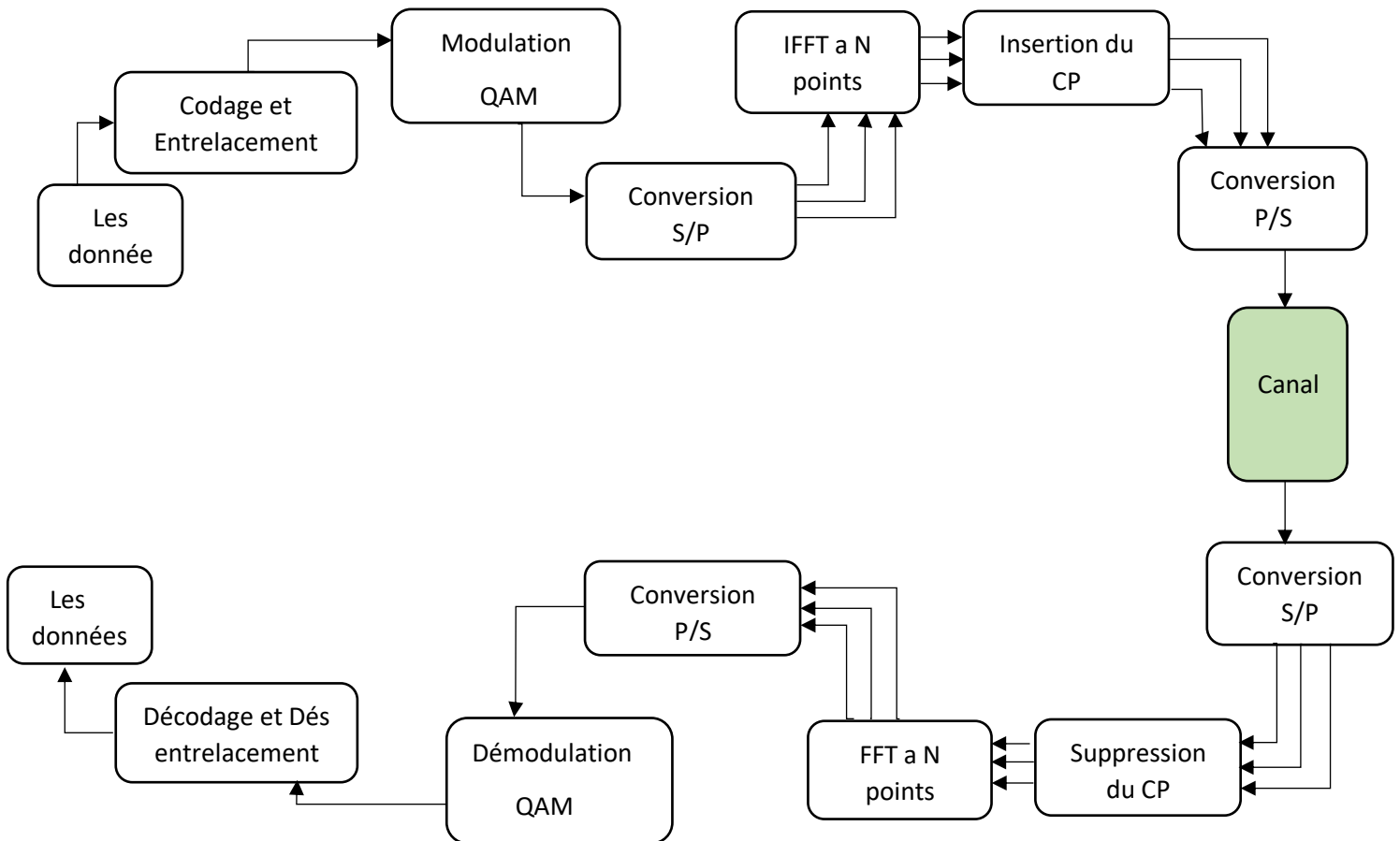


Figure II.3 : Chaîne de transmission du system OFDM [21].

Au niveau du récepteur, l'opération inverse est effectuée. Une fois que le signal atteint le récepteur, le CP, qui aurait subi des interférences de la part des symboles OFDM précédents sera supprimé. Ensuite, une opération de transformation de Fourier rapide (FFT) amène les données dans le domaine fréquentiel. De cette manière, l'estimation et l'égalisation de canal sont simplifiées [21].

II.3.2 Principe et fonctionnement de l'OFDM :

Soit $\{f_k\}$ l'ensemble des fréquences porteuses considérées avec :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} = f_0 + k \cdot \Delta f, 0 \leq k \leq N - 1 \quad (2.1)$$

f_0 : est la fréquence porteuse origine.

T_s : représente la durée allouée à un symbole.

Δf : Représente l'écart entre deux sous-porteuses consécutives.

N : Le nombre des sous-porteuses.

Le principe du multiplexage en fréquence est Après un codage bit/symboles des données à transmettre, on groupe les symboles C_k par paquets de N (conversion série/parallèle), Les C_k sont des nombres complexes définis à partir des éléments binaires par une constellation souvent de modulation QAM.

La fonction de mise en forme dont l'orthogonalité est vérifiée si $\Delta f = \frac{1}{T_s}$. Le signal modulé du train k s'écrit sous forme complexe :

$$C_k e^{j2\pi f_k t}. \quad (2.2)$$

II.3.2.1 La modulation :

Le signal résultant $s(t)$ correspondant à l'ensemble des N sous porteuses réassemblés en un symbole OFDM :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi f_k t}, 0 \leq k \leq N - 1 \quad (2.3)$$

Le schéma de principe de modulation OFDM est donné par :

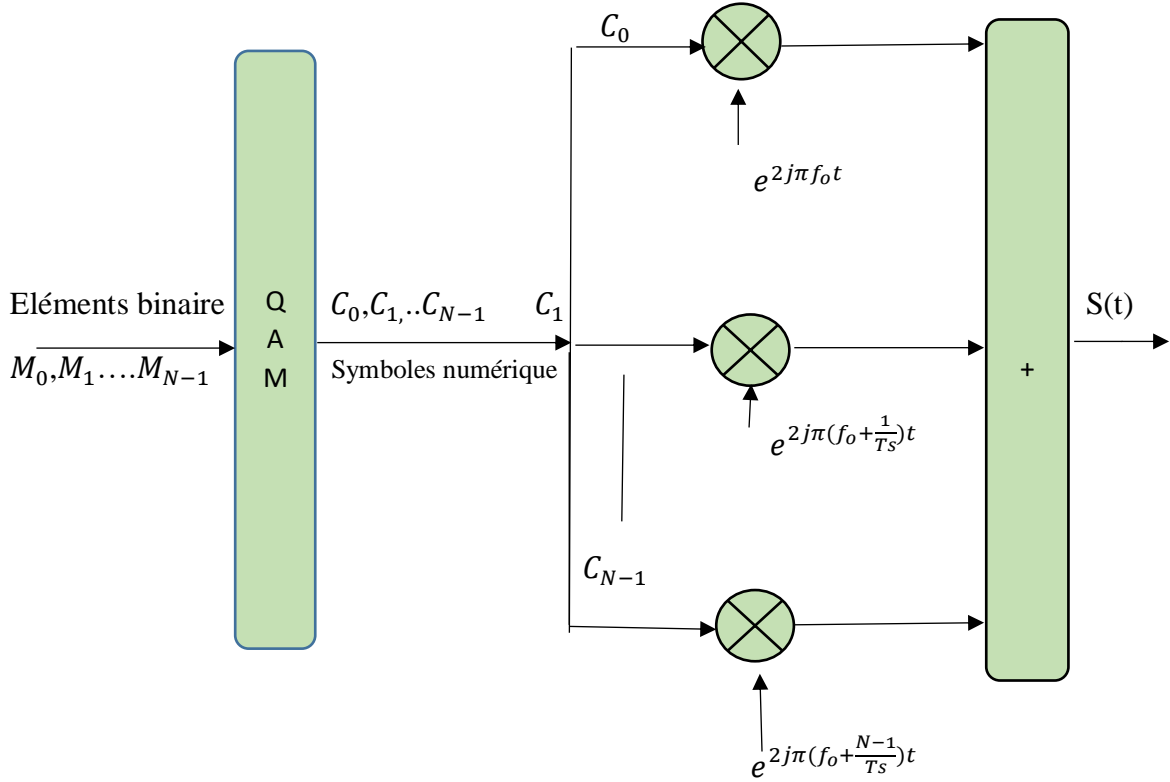


Figure II.4 : Schéma du principe de la modulation OFDM [14].

Plus précisément les données numériques C_k sont des nombres complexes définis à partir d'éléments binaires par une constellation (mapping) de modulation d'amplitude en quadrature QAM à plusieurs états (4, 16, 64, de façon générale à $2q$ états). Ces données sont des symboles numériques. Il ne faut pas les confondre avec le symbole OFDM qui est un regroupement de N symboles numériques sur N porteuses de l'équation [14].

$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}} \quad (2.4)$$

On peut déduire l'expression réelle du signal si : $C_k = a_k + jb_k$

$$s(t) = \text{Re} \left(S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} (a_k + jb_k) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t} \right) \quad (2.5)$$

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cos(2\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t) - b_k \sin(2\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t) \quad (2.6)$$

II.3.2.2 La démodulation :

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

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_S})t} \quad (2.7)$$

$H_k(t)$ Est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence f_k et au temps t , Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période T_S .

La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous-porteuses suivant le schéma classique montré par la figure II.5 [22] :

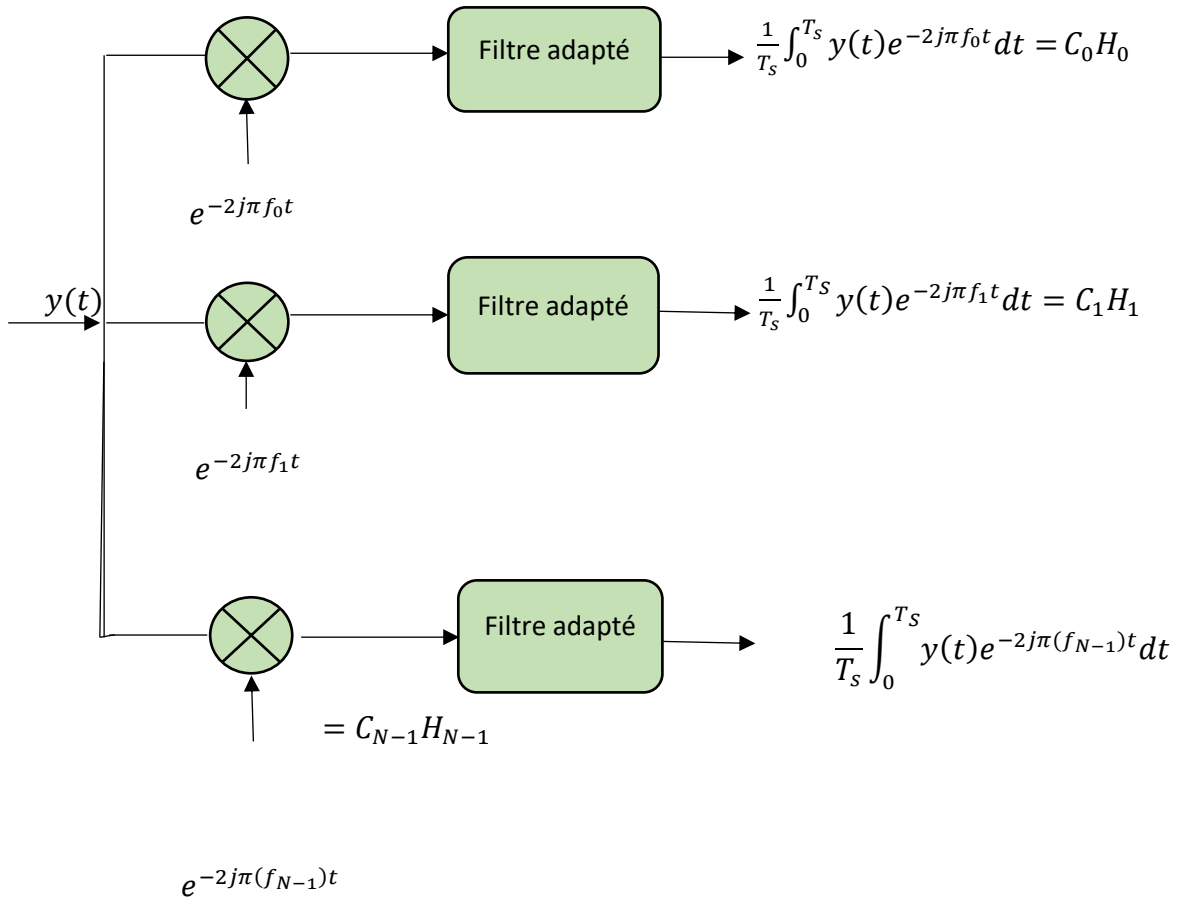


Figure II.5 : Schéma du principe de la démodulation [14].

II.3.3 Notions d'orthogonalité :

La différence fondamentale entre la technologie de modulation multi-porteuse traditionnelle et l'OFDM est que cette dernière permet un fort recouvrement spectral entre les sous-porteuses, ce qui permet d'augmenter sensiblement leur nombre ou de réduire l'encombrement spectral.

Cependant, pour que ce chevauchement n'ait pas d'effets néfastes, les sous-porteuses doivent respecter des contraintes d'orthogonalité [23].

Deux signaux limités dans le temps ($0 \leq t \leq T_u$) sont orthogonaux s'ils satisfont les conditions de l'équation (9). Si l'on spécifie un espacement rigoureusement régulier de $f_u = \frac{1}{T_u}$ entre les porteuses, où T_u est la période du symbole pendant laquelle le récepteur intègre le signal démodulé, les porteuses forment alors un ensemble orthogonal [24]. En considérant d'abord le signal OFDM comme un simple multiplexage en fréquence. La $k^{ième}$ porteuse (en bande de base) peut s'écrire sous la forme :

$$S_k(t) = e^{j2\pi kt/T_u} \quad (2.8)$$

Les porteuses doivent satisfaire la condition d'orthogonalité :

$$\int_t^{t+T_u} S_k(t) S_i^*(t) dt = \begin{cases} T_u, & k = i \\ 0, & k \neq i \end{cases} \quad (2.9)$$

II.3.3.1 L'orthogonalité fréquentielle :

On peut percevoir la notion d'orthogonalité des signaux OFDM dans le domaine fréquentiel. Chaque sous-porteuse OFDM a une réponse en fréquence sinusoïdale de base, $\text{sinc}(x) / x$. La forme sinusale principale a un lobe principal étroit avec de nombreux lobes latéraux.

Etant donné que la valeur maximale de chaque sous-porteuses correspond au "zéro" des autres sous-porteuses, l'orthogonalité dans le domaine fréquentiel est obtenue. Cette condition permet donc d'avoir une occupation idéale du spectre et d'éviter les interférences entre sous-porteuses.

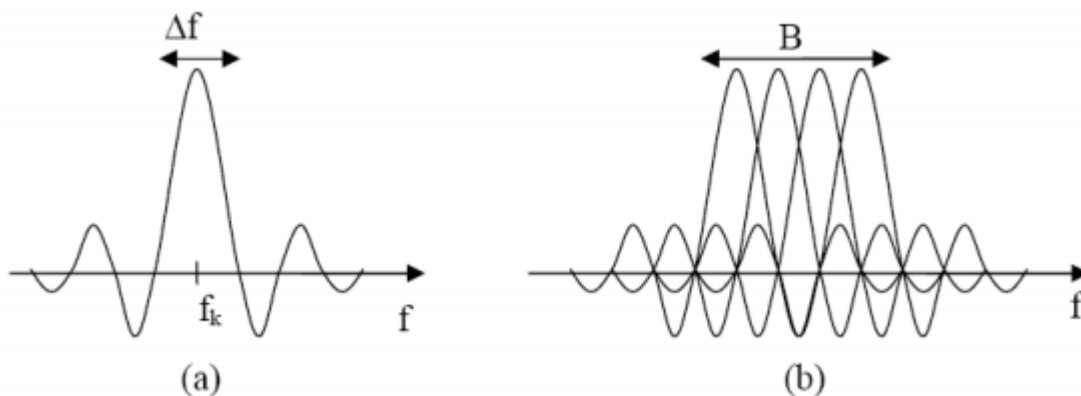


Figure II.6 : (a) Spectre d'une sous-porteuses et (b) Spectre d'un signal OFDM [22].

Le spectre (a) est une sous-porteuse k de bande $\Delta f = \frac{1}{T_u}$, et le spectre (b) celui du signal OFDM à $N = 4$ sous-porteuses et, qui s'étale sur [22].

$$B = N \cdot \Delta f = \frac{N}{T_u} f_k \quad (2.10)$$

II.3.4 IDFT et DFT :

En travaillant avec OFDM dans le domaine fréquentiel, les symboles de données QPSK modulés sont transmis aux sous-porteuses orthogonales. Mais le transfert de signal sur un canal n'est possible que dans son domaine temporel. Pour lequel nous implémentons IDFT qui convertit le signal OFDM du domaine fréquentiel au domaine temporel.

IDFT étant une transformation linéaire peut être facilement appliquée au système et DFT peut être appliqué à l'extrémité du récepteur pour retrouver les données d'origine dans le domaine fréquentiel à l'extrémité du récepteur. Étant donné que la base de la transformée de Fourier est de nature orthogonale, nous pouvons implémenter pour obtenir l'équivalent dans le domaine temporel du signal OFDM à partir de ses composantes fréquentielles [25].

La transformée de Fourier discrète pour un signal discret $x(n)$ sur une séquence de N échantillons est donnée par la formule suivante :

$$TFD(x(n)) = X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-jn \left[\frac{2\pi k}{N} \right]} \quad (2.11)$$

Elle comprend des fréquences de k cycles sur N échantillons, tel que, $k = [0, N - 1]$.

La TFDI est donnée par [26] :

$$TFDI(X(k)) = x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{jk \left(\frac{2\pi n}{N} \right)} \quad (2.12)$$

II.3.5 L'intervalle de garde :

Les signaux OFDM sont transmis à intervalles égaux et doivent emprunter un certain chemin pour atteindre le récepteur. Dans le cas de canaux à trajets multiples, en raison de trajets de propagation différents, les symboles transmis prend différents retards pour atteindre le récepteur, ce qui entraînera des étalements temporels. L'extension de la durée du symbole entraînera le chevauchement des symboles, ce qui donne naissance à l'interférence entre symboles (IES) [27].

Dans le but d'éviter la présence des interférences, il suffit d'ajouter un intervalle de garde entre deux symboles OFDM transmis successivement.

Plusieurs techniques différentes existent pour l'introduction des intervalles de gardes dans la technique OFDM. Il s'agit soit de remplir l'espace de garde entre deux symboles consécutifs par des zéros (technique utilisée pour certaines transmissions Ultra Wide Band UWB), soit d'introduire une extension cyclique du symbole OFDM. L'extension cyclique peut être introduite de deux façons différentes : l'une est nommée préfixe cyclique et l'autre suffixe cyclique [20].

II.3.5.1 Préfixe cyclique :

Le préfixe cyclique (CP) est une technique qui consiste à insérer une copie du bloc d'information (symbole OFDM) à transmettre en amont de la trame. Plus précisément, il s'agit de restituer une partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début de trame. En utilisant cette technique, nous pouvons maintenir la continuité des symboles. Il peut également convertir la convolution linéaire du signal de transmission en convolution circulaire. Le concept de la faire est lié à la nature de la transformée de Fourier rapide (transformée inverse).

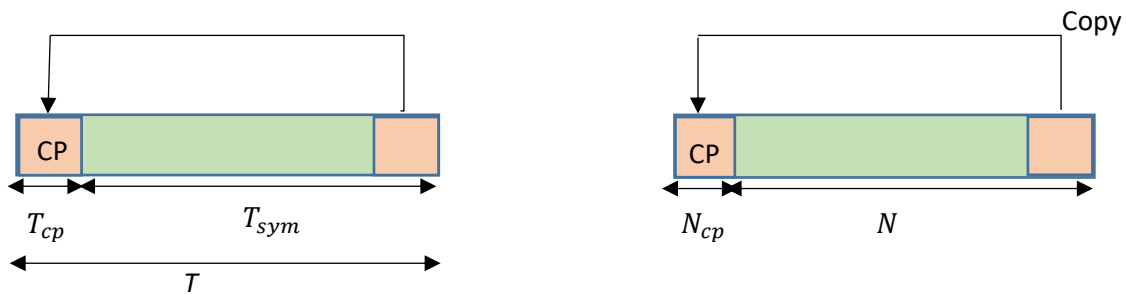


Figure II.7 : Préfixe cyclique [20].

Après l'insertion de préfixe cyclique, l'espacement entre les sous-porteuses reste égale à $\Delta f = 1/T_u$ alors que la durée des symboles OFDM est augmentée à $T = T_{cp} + T_s$.

Le préfixe cyclique est un bon moyen de lutter contre les interférences entre les symboles ISI et entre les porteuses ICI. En raison de cette extension, la période de symbole est plus longue. Veuillez noter que bien que la période soit plus longue, elle n'a aucun effet sur le spectre de fréquence du signal. Tant que le nombre correct d'échantillons est reçu à n'importe quelle

position du symbole d'étalement, l'orthogonalité peut être maintenue et les interférences éliminées [20] [18].

II.3.6 Avantages de l'OFDM et ses limitations dans les applications 5G :

L'utilisation de la technique OFDM pour les systèmes de communications sans fil représente certains avantages et inconvénients. La décision d'utiliser une telle technique est toujours basée sur l'évaluation du rapport coût/performances. Dans certains scénarios tels les communications mobiles d'intérieur, la réalisation de la technique OFDM s'avère obligatoire sinon la communication n'est pas fiable. Les avantages de l'OFDM sont les suivants:

-Combattre l'IES et réduction de l'IEP

L'utilisation du préfixe cyclique permet un double avantage :

-L'élimination de l'IES, due à l'occupation de l'intervalle de garde entre deux symboles OFDM.

-Robustesse : Les systèmes OFDM sont plus robustes que les systèmes monoporteuses dans les environnements sélectifs en fréquence.

-Débit : Dans les canaux variant lentement dans le temps, il est possible d'augmenter la capacité d'un système OFDM en adaptant le débit par sous porteuses selon le SNR de cette sous porteuse particulière.

-Inégration : Les systèmes OFDM peuvent intégrer les bénéfices des systèmes MIMO, des antennes intelligentes et des modulations adaptatives [28]. En dépit de la multitude et de l'importance de ses avantages, OFDM présente plusieurs limitations envers les futures applications 5G, notamment les points suivants :

-Le signal OFDM souffre d'un facteur PAPR élevé qui mesure les fluctuations de son enveloppe. Un PAPR élevé cause de fortes distorsions au signal et nécessite un système capable de prendre en charge une puissance de signal instantanée bien supérieure à la puissance moyenne du signal, ce qui nécessite une faible efficacité énergétique.

-La perte en efficacité spectrale suite à l'utilisation du préfixe cyclique qui est, en fait, une redondance d'information non utile.

-Son filtre de mise en forme rectangulaire qui a un spectre à lobes secondaires extrêmement élevés et donc un débordement hors bande important, nécessitant de larges bandes de garde. Ceci représente une autre perte d'efficacité spectrale.

-Exigence d'une synchronisation rigoureuse, et sensibilité au décalage temporel qui génère des interférences entre les sous canaux et dégrade les performances du système.

-Sensibilité aux décalages fréquentiels (CFO) pouvant affecter l'orthogonalité entre sousporteuses et donc causer des interférences entre canaux (ICI) [19].

II.4 LE SC-FDMA :

Le SC-FDMA est un système de transmission à accès multiple utilisant une modulation à porteuse unique. Ce système d'accès appartient à la série OFDM, a été adopté par la norme 3GPP [12] « Long Term Evolution ». En raison du bon rapport de la puissance maximale du signal et la puissance moyenne, elle a été choisie comme technologie d'accès en liaison montante.

Ce PAPR, relativement faible en comparaison avec le système OFDMA (adoptée pour la liaison descendante), il est donc très approprié pour la transmission en liaison montante, où L'efficacité de puissance de transmission est critique. Le système fournit également un accès multiple pour différents utilisateurs en attribuant différentes sous-porteuses sans chevauchantes à différents utilisateurs. Dans la section suivante, nous introduisons d'abord l'évolution d'un système à porteuse unique vers un système à porteuse multiples, puis nous nous concentrons sur le système OFDM SC-FDMA et étudions la différence entre OFDMA et le SC-FDMA, nous présentons dans la prochaine section au premier lieu, l'évolution des systèmes mono porteuse vers les systèmes multi porteuses, puis nous introduisons les systèmes OFDM en mettant l'accent sur le SC-FDMA et nous étudions la différence entre l'OFDMA et le SCFDMA. Ensuite nous introduisons le PAPR et enfin nous avons introduit la différence entre les égaliseurs de ces deux techniques d'accès.

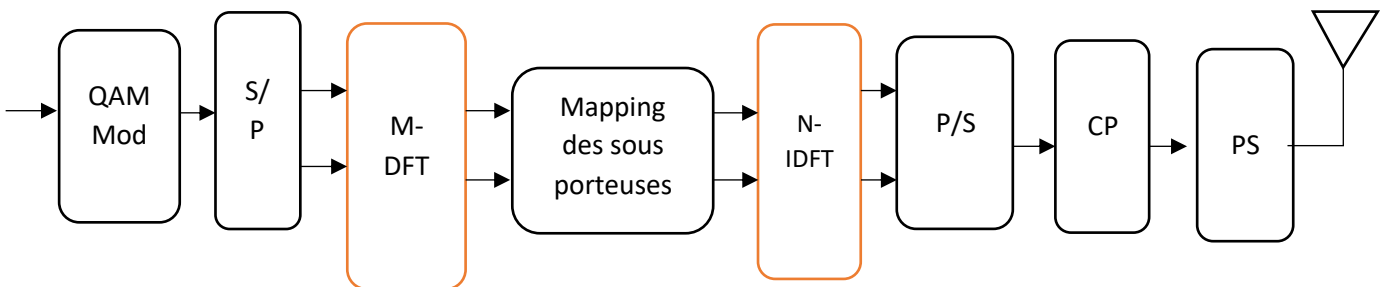
II.4.1 Principe de fonctionnement du système SC-OFDM :

Le SC-FDMA « Single Carrier Frequency Division Multiple Accès », est un système de transmission à accès multiple adoptant une modulation avec une unique porteuse. Ce système d'accès qui appartient à la famille OFDM, il permettant le partage des ressources radio dans un système de communication radio mobile par répartition de fréquence et d'accès multiple à répartition dans les temps (multiplexage fréquentiel et temporel). Dans cette technique le

symboles de données de domaine temporel sont transformés en domaine fréquentiel par DFT avant de passer par la modulation OFDMA. L'orthogonalité des utilisateurs provient du fait que chaque utilisateur occupe différentes sous-porteuses dans le domaine fréquentiel, similaire au cas de l'OFDMA. Par ce que le signal de transmission global est un signal porteur unique. Son principal avantage est son faible PAPR « Peak Power Ratio » très bénéfique à la réduction de la consommation énergétique des mobiles qui a d'ailleurs Value son adoption pour la voix montante de la norme 3GPP [12] LTE de 2008 à la place de l'OFDMA [29].

II.4.2 L'émetteur SC-FDMA :

SC-FDMA utilise une modulation simple, cette technique consiste à répartir sur un grand nombre des porteuses, non pas directement les symboles source comme en OFDMA, mais leur représentation fréquentielle après les avoir réparties sur la bande du système selon un certain mode que nous présenterons dans l'émetteur SC-FDMA. D'après ce que nous venons de voir avec SC-FDMA un étage supplémentaire 'M point DFT' est donc ajouté à l'émetteur et un étage N-point IDFT au récepteur. À L'entrée de l'émetteur on aura des symboles modulés [29].



S / P : série à parallèle.

P / S : parallèle à série.

CP : préfixe cyclique.

Figure II.8: Schéma bloc d'émetteur SC-FDMA [29].

En SC-FDMA les données sont organisées en constellation de signal suivant les différentes modulations QPSK, 16-QAM et 64-QAM. Elles sont attribuées aux canaux avec des conditions similaires à l'OFDMA. Alors au lieu les symboles précédemment modulés en (QPSK ou QAM) directement vers les sous-porteuses comme dans l'OFDMA, les symboles sont passés après la conversion série- parallèle au la 2^{ème} module de l'émetteur SC-FDMA est la transformer de Fourier numérique DFT.

La DFT assure la conversion du domaine temporel vers le domaine fréquentiel. Les raisons du choix d'utiliser la DFT sont les suivantes. La détection après IDFT donne le SNR "le rapport signal sur bruit" réparti proportionnellement sur toute la bande de fréquence. Dans le cas de la détection OFDMA, le canal bruité aura un faible SNR et n'est que proportionnel au canal, contrairement au SC-FDMA qui détecte sur la bande de fréquence du signal (donnée dans le domaine temporel) et réduit le PAPR. A sa sortie, ces symboles seront modulés en sous – porteuse par un bloc "sous-porteuses Mapping" pour transformation (N >M) sous-porteuses orthogonales. Après cette allocation, les sous-porteuses modulées dans le domaine fréquentiel seront converties dans le domaine temporel par le bloc IDFT (transformation Fourier inverse) pour donner des symboles de sortie.

Enfin nous avons le convertisseur parallèle/série et le bloc importante ajout le préfixe cyclique, elle consiste à insérer à l'entrée de chaque bloc à émetteur, la copie de la fin du bloc émis introduite. Par le multi-trajet du canal, mais également de rendre circulaire la convolution. la transformation en série des données avec l'unique porteuse rend le PAPR faible. Ainsi que le convertisseur analogique numérique pour assurer l'envoi du signal SC-FDMA vers le canal de propagation. L'étalement spectral du signal a pour but d'augmenter la largeur de bande du système afin de réaliser un multiplexage fréquentiel. Si le facteur d'étalement spectral est Q , alors le Nombre total de sous canaux du système serait $N = Q \cdot k$, Q étant la portion de sous-porteuses allouée à chaque utilisateur. Ainsi, le système peut supporter au maximum Q Utilisateurs orthogonaux, chacun occupe M sous-porteuses distinctes [29].

II.4.2.1 Filtre de mise en forme :

Pour prévenir l'interférence entre symboles introduit par le canal, on prend le soin d'appliquer des filtres linéaires de mise en forme particulier afin de réduire l'énergie du signal en dehors de la bande passante autorisée. Les filtres en cosinus sur-élevé sont les plus utilisés dont les équations temporelle et fréquentielle sont données en (2.13) et (2.14) ou α représente le facteur de Roll-off du filtre.

$$p(t) = \frac{\sin\left(\frac{\pi t}{T}\right)}{\frac{\pi t}{T}} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi \alpha t}{T}\right)}{1 - \frac{4\alpha^2 t^2}{T^2}} \quad (2.13)$$

$$p(f) = \begin{cases} T & , si \ 0 \leq |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T} \\ \frac{T}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi T}{\alpha} \left(|f| - \frac{1-\alpha}{2T} \right) \right] \right\} & , si \ \frac{1-\alpha}{2T} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T} \\ 0 & , si \ |f| \geq \frac{1+\alpha}{2T} \end{cases} \quad (2.14)$$

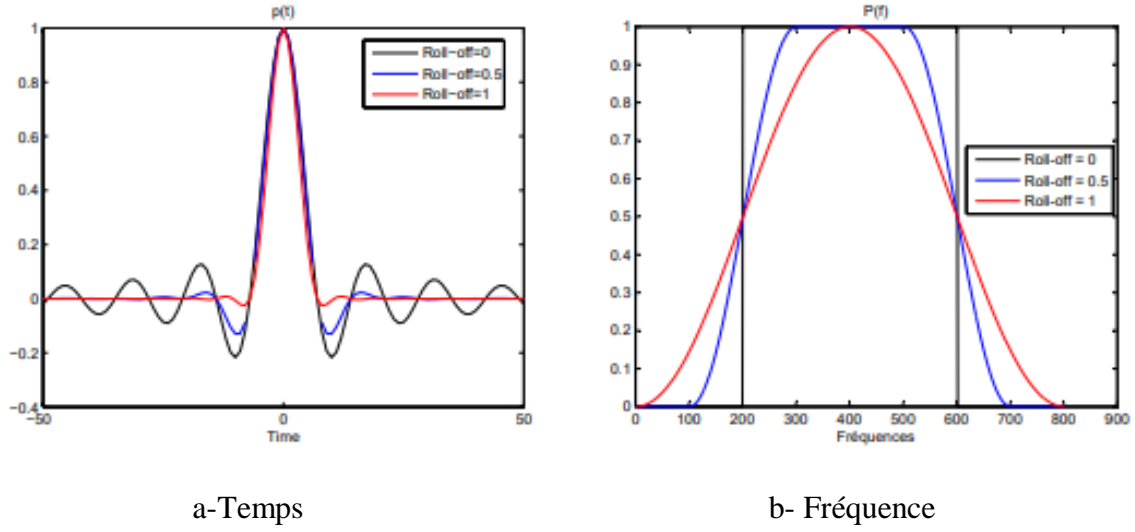


Figure II.9 : Filtre de mise en forme en Cosinus sur-élevé [29].

La Figure 2.9 représente la réponse impulsionnelle Figure 2.9(a) et la réponse fréquentielle Figure 2.9 (b) du filtre pour quelques valeurs du facteur de Roll-off.

Le filtre de mise en forme utilisé par $p(t)$, le signal $s_k(t)$ de l'utilisateur k en sortie du système sera donné par l'expression suivantes [29]:

$$S^K(t) = \sum U_n^k p(t - nTs) e^{2\pi f_n t} \quad (2.15)$$

II.4.2.2 La Bande passante du canal de transmission :

$$w_{canal} = N \cdot \Delta f \quad (2.16)$$

Ainsi que le débit de transmission sont donnés :

$$R_{canal} = \frac{N}{M} \cdot R_{source} (\text{symbole/seconde}) \quad (2.17)$$

Où $\Delta f = \frac{1}{Ts}$ est l'espacement entre les sous-canaux, avec Ts la durée d'un symbole et R_{source}

Le débit source de chaque utilisateur.

Soit f_n l'ensemble des fréquences porteuses orthogonales du système, et f_s la fréquence

Centrale du signal transmis dans le canal. On a la relation suivante :

$$f_n = f_c + n \cdot \Delta f \text{ avec } 0 \leq n \leq N - 1. \quad (2.18)$$

II.4.3 Le récepteur SC-FDMA :

Le principe de la démodulation du système SC-FDMA consiste à démoduler le signal sur chacune des sous-porteuses du système. Dans la réception est très similaire à OFDMA, mais avec des blocs supplémentaires de "demapping de sous-porteuses". A la fin de l'IDFT, nous obtenons le signal SC-FDMA riches en informations, ces signaux ne font pas partie du système de modulation SC-FDMA. Le démodulateur DFT permet d'obtenir les symboles modulant chaque porteuse f_n . La figure II.10 illustre ce principe de démodulation [29].

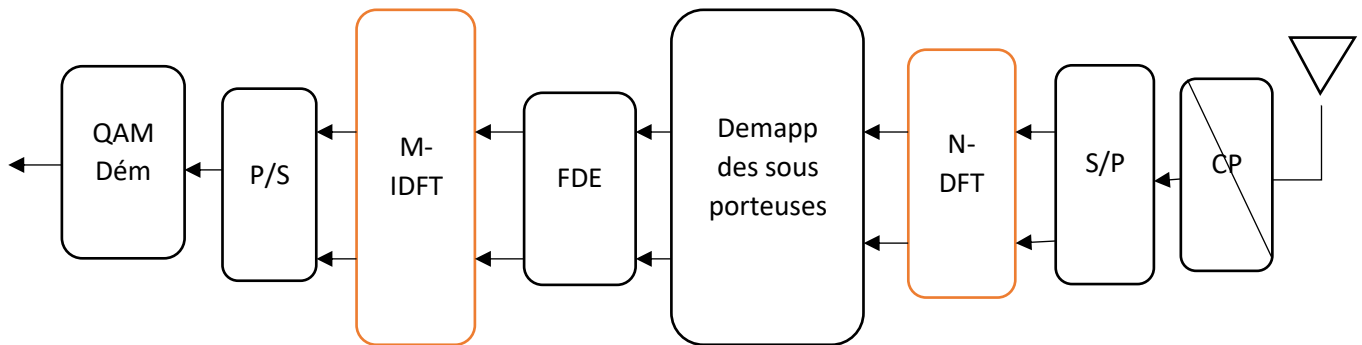


Figure II.10: Schéma bloc du récepteur SC-FDMA [29].

II.5 Allocation des ressources radio dans le système SC-FDM :

Dans la modulation SC-FDMA, Afin de prendre en charge un grand nombre d'utilisateurs simultanés, le système utilise la technologie d'étalement du spectre pour augmenter les ressources de spectre partagées. Cette façon, chaque utilisateur se voit allouer une partie de la bande passante totale du système pour éviter toute interférence avec un autre utilisateur, car dans modulation SC-FDMA, le multiplexage des utilisateurs du système est effectué dans le domaine fréquentiel. Les N symboles du domaine fréquentiel correspondant à un utilisateur sont mappés sur M sous-porteuses, ou M est le nombre total de sous-porteuse allouée à tous les utilisateurs dans le système SC-FDMA. Il existe deux modes d'allocation de ressources pour cette modulation : le mode distribué et le mode localisé [29].

II.5.1 Allocation de ressource en mode distribué :

La modulation SC-FDMA utilisant ce mode d'allocation est appelée I-FDMA ou (Interleaved-FDMA). En mode distribué, M symbole de fréquence correspondant à la modulation DFT de l'émetteur module le multiplexage de M sous-porteuses répartis uniformément sur toute la largeur de la bande passante du système comme le montre la figure.

N-M sous-porteuses non modulées sont allouées à signal zéro. La modulation SC-FDMA utilisant cette méthode d'allocation est appelée IFDMA, I-FDMA présente plusieurs avantages. D'une part, il peut assurer l'orthogonalité entre les différents utilisateurs du système, Mais il y a aussi un grand Diversité de fréquence due à la distribution porteuse modulée sur toute la bande passante. Cette technique est aussi très intéressante point de vue de la mise en œuvre. Le signal peut être généré dans le domaine temporel sans l'utilisation de modulateurs DFT et IDFT un signal source transmis avec un déphasage propre à chaque utilisateur. D'autre part le système I-FDMA est très sensible à la déviation de fréquence, qui est généralement causée par mauvaise synchronisation ou mobilité élevée, entraînant une perte d'orthogonalité [29].

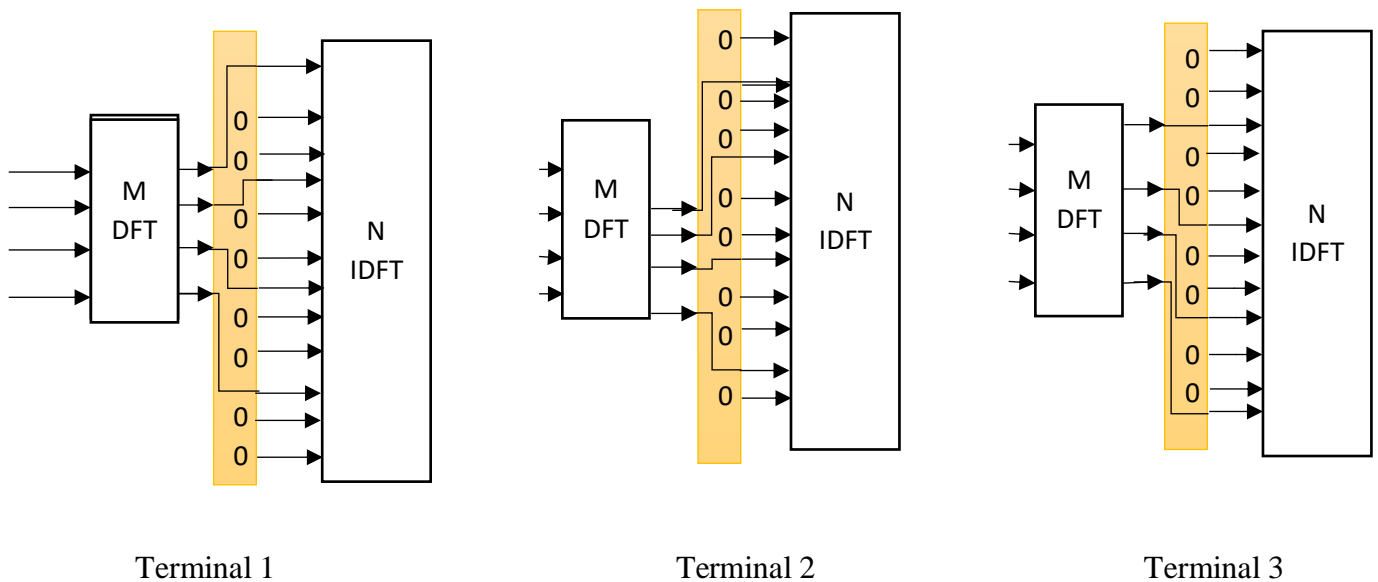


Figure II.11 : Le Mapping I-FDMA [29].

II.5.2 Allocation de ressource en mode localisé :

La modulation SC-FDMA utilise un autre mode d'allocation de ressources appelé L-FDMA ou (Localized FDMA), Il est plus robuste et a été adopté par la norme LTE. C'est le mode de localisation, qui porte le nom du système L-FDMA ou (FDMA localisé) Ce temps M correspond au symbole de fréquence délivré par le modulateur DFT, Moduler le multiplexage de M sous-porteuses consécutives ; N-M autres descendantes La porteuse non modulée est affectée au signal zéro, comme le montre la figure Étant donné que les sous-porteuses ne sont plus réparties sur toute la bande de fréquence du système, nous perdons de la diversité souvent. En revanche, le système est plus robuste tout en assurant un décalage de fréquence dans ce cas

l'orthogonalité des signaux des différents utilisateurs [32].

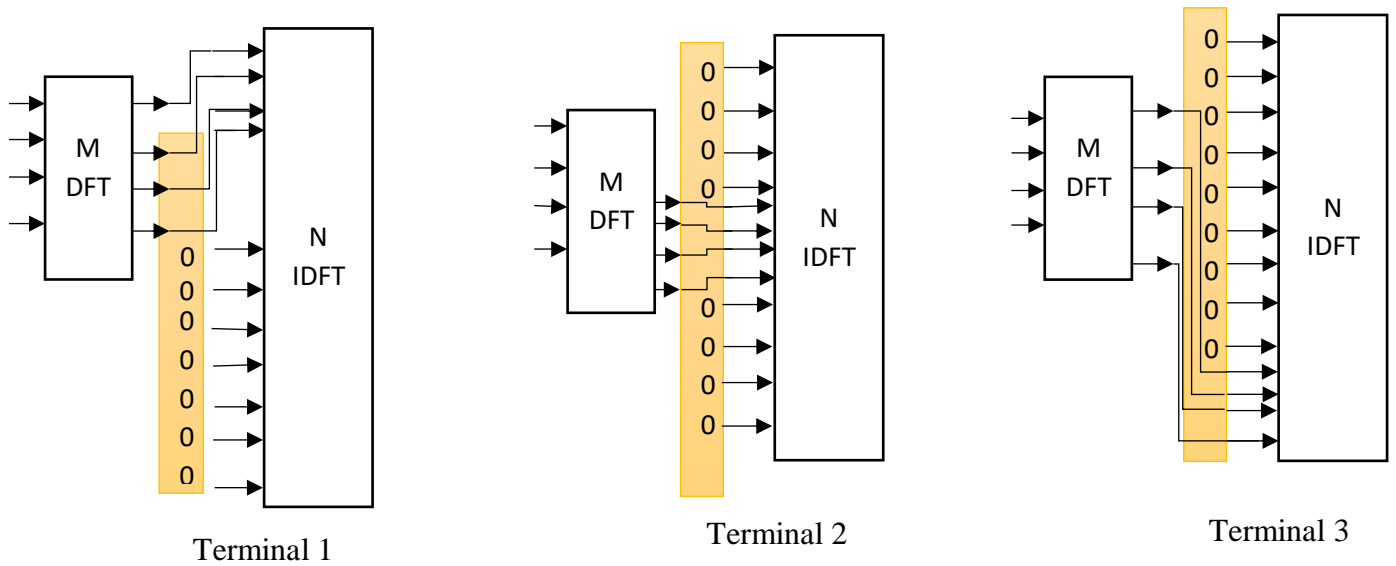


Figure II.12: Le Mapping L-FDMA [29].

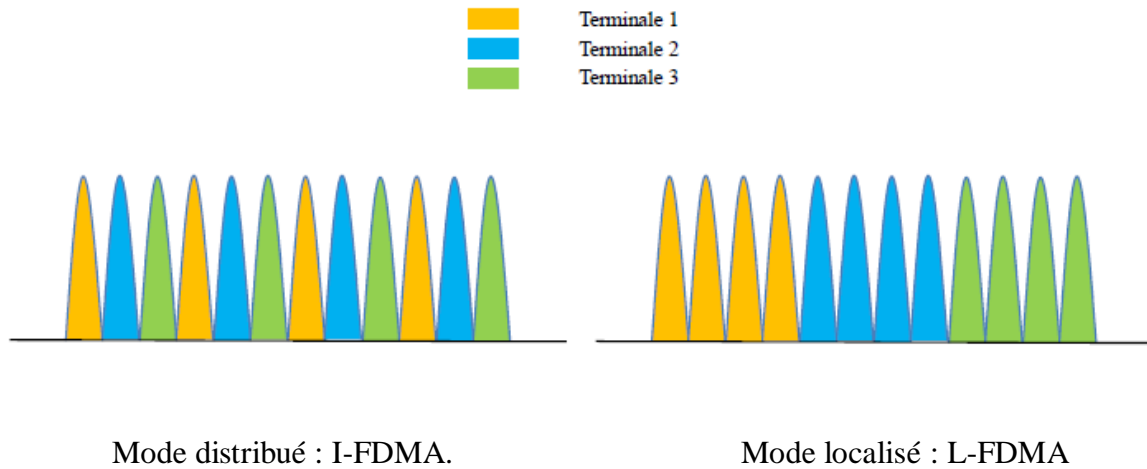


Figure II.13: spectre du signal SC-FDMA au niveau récepteur [29].

II.6 Le facteur PAPR :

SC-FDMA est une technologie d'accès multiple qui a établi sa position dans la nouvelle norme 3GPP [12] LTE, principalement en raison de son PAPR inférieur par rapport aux technologies existantes. Le concept de PAPR est très important dans le système de communication. Elle est directement liée à la consommation d'énergie de l'amplificateur de puissance. Le PAPR ou « Peak-to-Average Power Ratio » Appelé aussi facteur de crête une mesure sans dimension qui caractérise un signal. L'expression du PAPR pour un signal $s(t)$ est

donnée par $x = \{x[n]\}$ Est défini comme le rapport entre la puissance maximal et sa puissance moyenne :

$$X = PAPR\{x\} = \frac{\max(|x|^2)}{E\{|x|^2\}} \quad (2.18)$$

Le SC-FDMA présente un faible PAPR est plus adéquat à une transmission par un terminal portable alimenté sur batterie. Nous avons démontré dans la section précédente que le SC-FDMA n'est qu'une variante de l'OFDM, il vient de rajouter uniquement une transformation supplémentaire avant l'émetteur et après le récepteur [29].

II.6.1 Le CCDF de PAPR :

Nous évaluerons le CCDF de SC-FDMA et OFDMA PAPR pour différentes valeurs de facteur de coupure du filtre de mise en forme et différents formats de modulation. La façon la plus courante d'évaluer le PAPR est de déterminer la probabilité que ce PAPR dépasse un certain seuil X_o . Ceci est représenté par la fonction de répartition cumulative complémentaire (CCDF), qui est une variable aléatoire, comme suite :

$$CCDF(X) = prob(X^l \leq X_o) = 1 - (1 - e^{-X_o})^N \quad (2.19)$$

II.6.2 Le PAPR élevé de l'OFDM :

Le principal inconvénient de l'OFDMA est son PAPR élevé. En effet, au sein d'un même symbole OFDMA, la puissance instantanée transmise peut varier fortement. Considérant que le symbole OFDMA est une combinaison de toutes les sous-porteuses, la valeur de tension de chaque sous-porteuses peut être additionnée dans le même symbole pour obtenir une valeur de puissance instantanée très élevée par rapport à la puissance moyenne. Le PAPR élevé entraîne les exigences de plage dynamique des convertisseurs analogique-numérique N/A. il existe également un PAPR élevé, ce qui réduit considérablement l'efficacité de l'amplificateur de puissance de l'émetteur. En résumé, la norme LTE-A choisit une autre technologie pour la Liaison descendante, qui appartient à la famille OFDMA et présente un PAPR plus faible, à savoir la technologie SC-FDMA [29].

II.7 La différence entre les deux accès SC-FDMA et OFDMA :

La norme 3GPP [12] LTE et LTE-A ont choisi deux techniques d'accès multiples qui appartiennent à la même famille OFDM. L'OFDMA a été choisi uniquement pour la liaison descendante et le SC-FDMA pour la liaison montante. Nous avons vu dans les paragraphes

précédents qu'une seule composante a été ajoutée à l'OFDMA pour obtenir le SC-FDMA, il s'agit d'un bloc de recodage DFT. Aussi nous avons signalé que le SC-FDMA est une technique de transmission des données d'une manière mono porteuse alors que le FDMA est une technique multi porteuses. Ceci constitue la grande différence entre ces deux techniques qui ont plusieurs caractéristiques communes telle que :

1. L'envoi de l'information sous forme de bloc de données.
2. L'utilisation de porteuses orthogonales assurant ainsi un multiplexage fréquentiel des données.
3. L'insertion de l'intervalle de garde comme solution pour remédier aux interférences entre symboles
4. Une égalisation fréquentielle [29].

II.8 Conclusion :

Le réseau LTE apporte une amélioration du débit et une bonne qualité de transmission de la voix et des données, grâce à l'utilisation de la technique OFDM, qui permet d'un côté de d'améliorer l'efficacité spectrale et la capacité du système. Ce chapitre concerne la technologie OFDM utilisée dans la liaison descendante et la technologie SC-FDMA utilisée dans la liaison montante du réseau LTE.

Chapitre III : La Modulation multi-porteuse à base de banc de filtre (FBMC)

II.1 Introduction :

Les lacunes de l'OFDM ont incité les chercheurs à développer des solutions alternatives pour surmonter les problèmes de l'OFDM, faisant du traitement par banc de filtres (FB) une alternative très intéressante. Dans ce chapitre, nous présenterons la nouvelle technologie de transmission multi-porteuses, candidate potentielle principale pour les communications sans fil 5G en remplacement de l'OFDM, à savoir la modulation multi-porteuses à banc de filtre ou filtre Bank multi-carrier (FBMC) en anglais. Pour assurer une communication sans interférence, OFDM utilise un préfixe cyclique (CP) et présente un niveau élevé de lobes secondaires, ce qui entraîne une fuite de puissance entre les différentes sous-porteuses (en dehors de bande, OoB out of band). OFDM utilise filtre à impulsion rectangulaire, tandis que FBMC utilise différent schéma de modulation et filtre prototype. En effet, la technologie FBMC conserve les avantages de l'OFDM et améliore ses faiblesses [2].

III.2 La Modulation FBMC/OQAM :

FBMC est une technique de transmission multi-porteuses qui associée à la modulation d'amplitude en quadrature décalée (OQAM) permet d'obtenir des interférences inter-symboles et inter-porteuses inférieures à celles de l'OFDM. L'FBMC introduit un banc de filtres pour permettre d'appliquer sur chaque sous-porteuses individuelle un filtre commun, appelé le filtre prototype PF [30]. En utilisant une conception de filtre prototype, le CP peut être supprimé et les sous-porteuses peuvent être mieux positionnées dans le temps et la fréquence. C'est le principal concurrent des communications 5G [31].

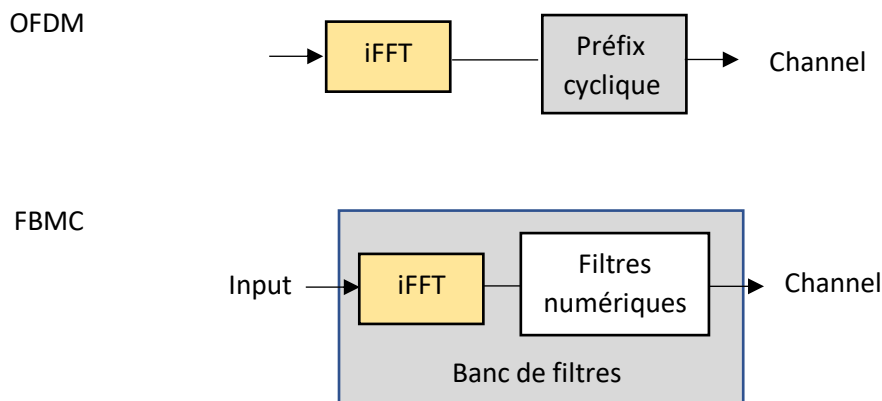


Figure III.1: Modulation multi-porteuses des OFDM et FBMC [32].

En utilisant FBMC, les sous-porteuses sont capables de supprimer les lobes latéraux excessifs en induisant un banc de filtres qui à son tour améliore l'efficacité spectrale du système, La figure III.2 représente une comparaison entre OFDM et FBMC/OQAM, La principale différence entre les modulations se trouve dans la propriété des fuites spectrales.

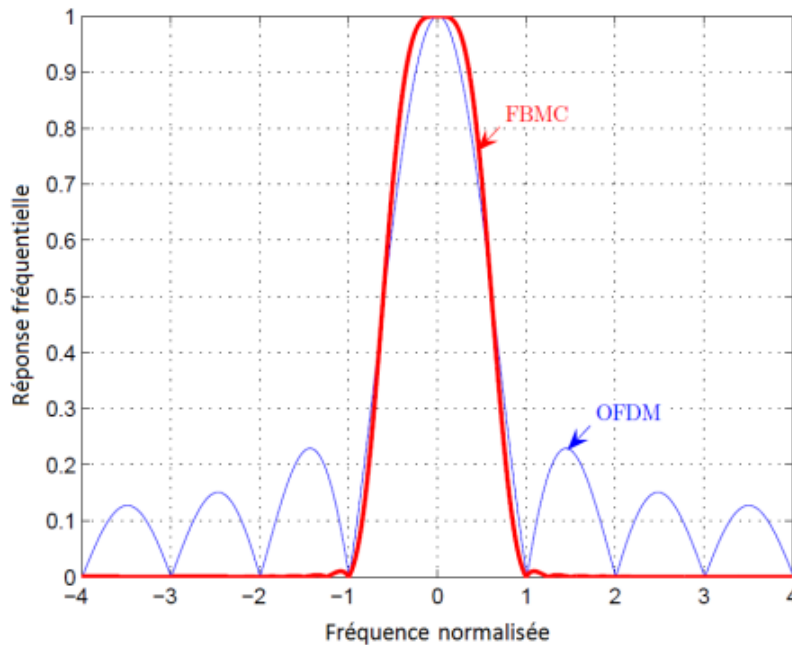


Figure III.2: Réponses en fréquence de l'OFDM et de la FBMC/OQAM [19].

D'après la figure (III.2), la modulation OFDM présente des lobes latéraux importants tandis que la modulation FBMC présente des lobes latéraux négligeables dans le domaine fréquentiel. Les schémas de modulation OFDM/QAM et FBC/OQAM garantissent théoriquement une orthogonalité et une efficacité spectrale maximale et identique De plus, en pratique, ils peuvent être mis en œuvre grâce à la transformée de Fourier discrète (DFT) [33].

III.3 Principe de FBMC/OQAM :

De la même manière que dans OFDM, FBMC divise le flux de données à haut débit en N flux de données parallèles à faible débit, qui seront ensuite transmis sur N sous-porteuses très proches les unes des autres, avec un espacement de fréquence régulier $\Delta f = \frac{1}{T}$ (T :la période du symbole). La première spécificité d'un système FBMC/OQAM est de transmettre des symboles offset QAM (OQAM) au lieu des symboles QAM (Quadrature Amplitude Modulation) conventionnels où un décalage d'une demi-période symbole $T/2$ est introduit entre la partie réelle et la partie imaginaire d'un symbole QAM donné, Ce qui permet d'éliminer les

interférences entre symboles. Si la partie imaginaire est retardée de $T/2$ sur une sous-porteuse, c'est la partie réelle qui sera retardée sur les sous-porteuses suivante. La seconde spécificité est que le filtre d'émission utilisé est différent de la fonction porte de l'OFDM et s'étale sur plusieurs symboles multi-porteuses. Plusieurs formes d'onde ont été proposées dans la littérature dont la plus avantageuse est celle proposée par Bellanger [34] et qui est utilisée dans le projet européen PHYDYAS [19] [35].

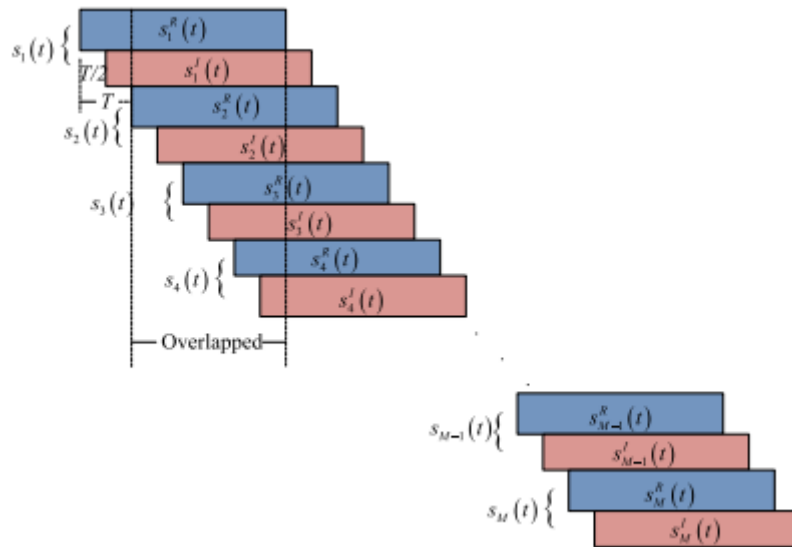


Figure III.3 : Structure chevauchante de FBMC-OQAM [36].

III.4 La structure générale de la technique FBMC/OQAM :

La mise en place d'un système FBMC reposait sur une étape de synthèse et une étape d'analyse. Dans l'émetteur, les filtres décomposent le signal en différentes composantes pour chaque sous-porteuses, tandis que dans le récepteur, des filtres sont utilisés pour reconstruire le signal d'origine à partir des composantes reçues de chaque sous-porteuse. Par conséquent, en transmission, le banc de filtres est appelé synthèse, tandis qu'en réception, il est appelé banc de filtres d'analyse.

Dans la figure nous avons présenté la structure globale De la technique FBMC/OQAM (émetteur/récepteur). Les principaux blocs de traitement dans cette représentation sont : le prétraitement OQAM, le banc de filtres de synthèse, le banc de filtres d'analyse et le post-traitement OQAM. Les bancs de filtres de synthèse et d'analyse sont naturellement les composants clés dans cette configuration [19].

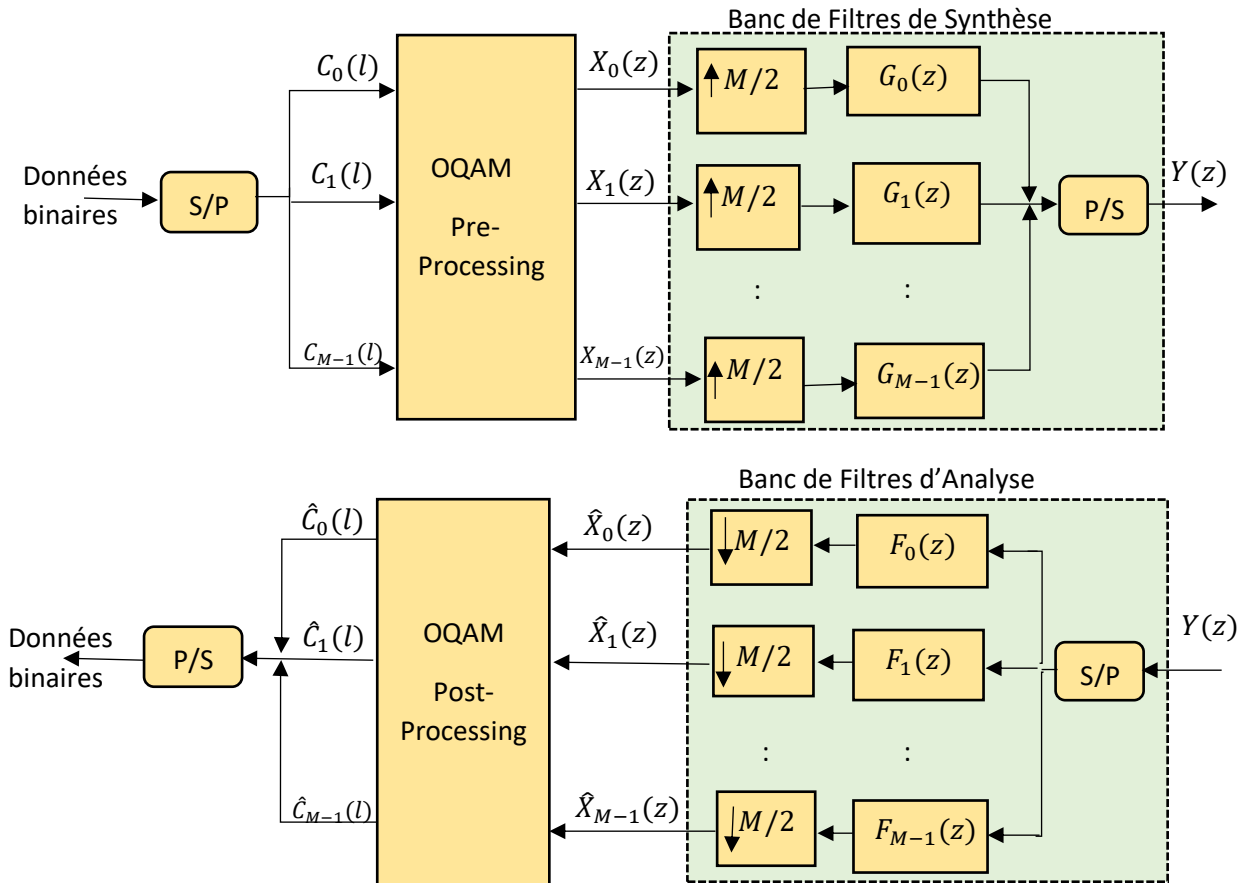


Figure III.4 : Structure générale de la technique FBMC/OQAM [19][32].

III.4.1 La Modulation OQAM :

Pour obtenir l'efficacité spectrale la plus élevée possible dans FBMC, la modulation OQAM (Offset QAM) est utilisée. Cette modulation fonctionne comme suit : La première opération est une conversion complexe/réelle. Le bloc de prétraitement consiste en la création d'un décalage $T/2$ entre la partie réel et l'imaginaire du symbole complexe pour former deux nouveaux symboles. Afin d'obtenir ce décalage temporel. L'ordre de ces nouveaux symboles dépend du numéro de sous-porteuses, c'est-à-dire que la conversion est différente pour les sous-porteuses paires et impaires. Les signaux d'entrée, après le prétraitement OQAM, seront purement réels ou imaginaires. Du côté du récepteur, Le bloc de post-traitement effectue une conversion inverse pour restaurer les symboles complexes d'origine à partir des symboles réels [19] [35].

III.4.2 Bancs de filtres (Analyse et synthèse) :

Le banc de filtres de synthèse (SFB), placé en émission, comprend tous les filtres de transmission parallèles, tandis que le banc de filtres d'analyse (AFB), placé en réception, comprend les filtres adaptés de réception, afin de récupérer les données transmises. Ainsi, SFB

et AFB implémentent respectivement le modulateur et le démodulateur du système FBMC/OQAM.

Un banc de filtre est un ensemble de M filtres qui traite M signaux d'entrée pour produire M signaux de sorties, Ainsi, les signaux d'entrée, $X_K(z)$ sont d'abord sur-échantillonnés par un facteur de $M/2$, puis filtrés avec les filtres $G_k(z)$ de synthèse. Le signal de sortie du SFB $Y(z)$ est formé lorsque tous les sous-signaux sont sommés. De même, un AFB sous forme directe est construit à l'aide de ' M ' filtres d'analyse et de ' M ' sous échantillonneurs. Le signal d'entrée $Y(z)$ est d'abord filtré par les filtres $F_k(z)$ d'analyse, qui sont identiques à ceux de synthèse, et les signaux résultants seront sous-échantillonnés par un facteur de $M/2$, pour former les signaux de sortie estimés $\hat{X}_k(z)$. 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.

-Si les signaux $X(n)$ et $\hat{X}(n)$ sont égaux (éventuellement aux erreurs numériques et à un délai près) on dit que le système est à reconstruction parfaite. Cette propriété peut être vérifiée par un couple de bancs des filtres d'analyse/synthèse [2] [19].

III.5 Structure Polyphasée des bancs de filtres :

Les systèmes basés sur des bancs de filtres multi- porteuses (FBMC) sont mis en œuvre à l'aide d'une technique efficace appelée mise en œuvre polyphasée. La représentation polyphasée a été inventée par Bellanger il y a plus de 35 ans et est un outil clé dans le traitement du signal numérique multi-débit. Cette forme offre une grande simplification de l'analyse théorique et des implémentations efficaces du point de vue informatique pour plusieurs applications de filtrage. Considérons un filtre $F(z)$ de réponse impulsionnelle finie (RIF) et de nombre de coefficients $L = KN$ [37].

L : la longueur du filtre prototype.

N : étant le nombre de sous-porteuses.

K : le facteur de recouvrement.

$$F(z) = \sum_{l=0}^{L-1} f(l)z^{-l} \quad (3.1)$$

On peut décomposer ce filtre en N filtres élémentaires comme suit :

$$F(z) = \sum_{l=0}^{L-1} f(l)z^{-l} = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-1} f[kN + n]z^{-(kN+n)} \quad (3.2)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{k=0}^{K-1} f[kN + n]z^{-kN} \right) z^{-n} \quad (3.3)$$

D'où, la structure du réseau polyphasé PPN (Poly Phase Network) du filtre $F(z)$ est donnée par l'expression suivante :

$$F(z) = \sum_{n=0}^{N-1} E_n[z^N]z^{-n} \quad (3.4)$$

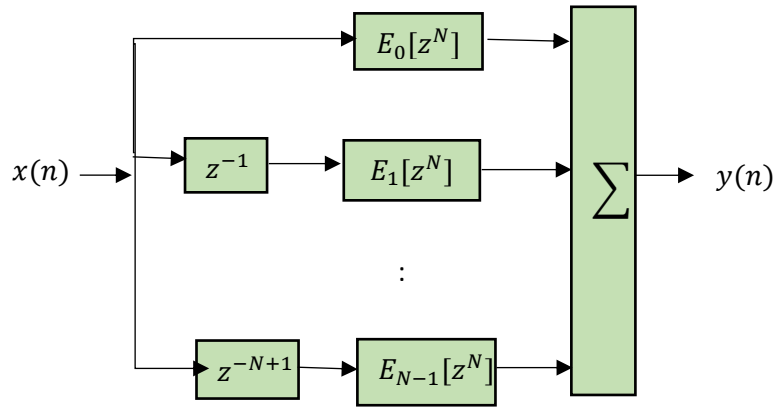


Figure III.5: La mise en œuvre polyphasée du filtre $F(z)$ [37].

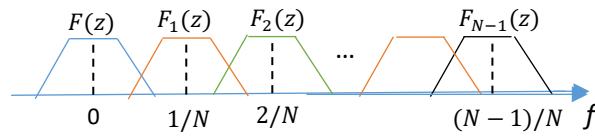


Figure III.6: Banc de N filtres basé sur le décalage du filtre prototype [37].

Où $E_n[z^N] = \sum_{k=0}^{K-1} f[kN + n]z^{-kN}$ sont les composants polyphasés.

Considérons $F_i(z)$ la version décalée dans le domaine fréquentiel par i/N du filtre $F(z)$, soit :

$$F_i(z) = \sum_{l=0}^{L-1} f(l) e^{j\frac{2\pi}{N}il} z^{-l} \quad (3.5)$$

En utilisant l'expression du PPN, $F_i(z)$ devient :

$$F_i(z) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{k-1} f[kN + n] e^{j\frac{2\pi}{N}i(kN+n)} z^{-(kN+n)} \quad (3.6)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}ni} E_n[z^N] z^{-n} \quad (3.7)$$

En prenant tous les décalages multiples de $1/N$, nous pouvons exprimer sous forme matricielle le banc de N filtres comme suit [37] :

$$\begin{bmatrix} F_0(z) \\ F_1(z) \\ \vdots \\ F_{N-1}(z) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & w^{-1} & \dots & w^{-(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & w^{-(N-1)} & \dots & w^{-(N-1)^2} \end{bmatrix}}_{\widehat{IDFT}_N} \underbrace{\begin{bmatrix} E_0[z^N] \\ z^{-1}E_1[z^N] \\ \vdots \\ z^{-(N-1)}E_{N-1}[z^N] \end{bmatrix}}_{\widehat{PPN}}$$

Où, $w = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ et la matrice carrée représente la matrice de transformée de Fourier discrète inverse d'ordre N . Pour éviter d'effectuer des opérations de filtrage à un taux d'échantillonnage élevé, nous utiliserons les égalités à plusieurs niveaux, également appelées "état noble" expliquées dans la référence [37], ce qui rend la configuration plus efficace et moins complexe. En combinant ces identités avec l'équation [matrice], nous pouvons enfin obtenir la structure comme le montre la figure (III.7). Les signaux d'entrée $X_k(n)$ passent par une IDFT d'ordre N avant d'être filtrés par les composants polyphasés $E_k(n)$, sur-échantillonnés par un facteur de N , puis passent par une chaîne de retards. Les figures montrent les configurations polyphasées du SFB et de l'AFB, respectivement [32].

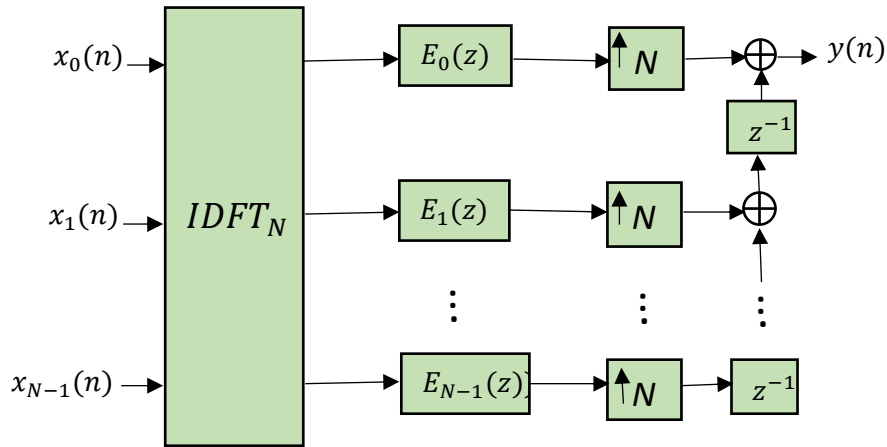


Figure III.7 : Configuration polyphasée du SFB [37].

De même, l'implémentation polyphasée de l'AFB qui représente une structure duale du banc de filtres de synthèse précédemment vue, et est donc exprimé de manière similaire par :

$$\begin{bmatrix} F_0(z) \\ F_{-1}(z) \\ \vdots \\ F_{-(N-1)}(z) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & w & \dots & w^{(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & w^{(N-1)} & \dots & w^{(N-1)^2} \end{bmatrix}}_{\widehat{DFT}_N} \underbrace{\begin{bmatrix} E_0[z^N] \\ z^{-1}E_1[z^N] \\ \vdots \\ z^{-(N-1)}E_N[z^N] \end{bmatrix}}_{\widehat{PPN}}$$

Où, $w = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ et la matrice carrée représente la matrice de transformée de Fourier discrète d'ordre N . La figure illustre la structure polyphasée du banc de filtres d'analyse (AFB). Le signal d'entrée $[n]$ passe par une chaîne de retard, puis sous-échantillonné par un facteur de N , ensuite il sera filtré par les composants $E_n(z^N)$ polyphasés. Cette opération de filtrage est suivie, cette fois-ci, par une DFT d'ordre N .

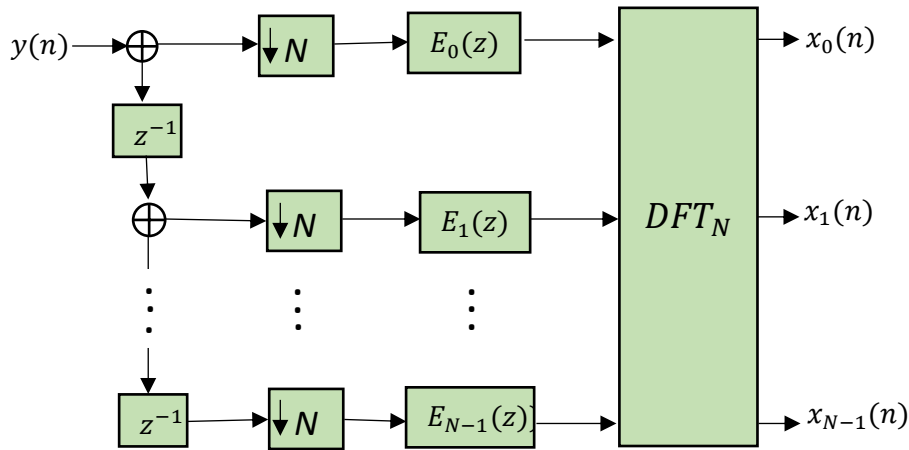


Figure III.8: Configuration polyphasée simplifiée de l'AFB [37].

III.6 Filtre Prototype utilisé dans FBMC/OQAM :

Contrairement à OFDM, la technologie FBMC/OQAM ne nécessite aucun intervalle de garde. Il offre également la possibilité d'utiliser différents filtres prototypes bien positionnés en temps et en fréquence, permettant un meilleur contrôle des émissions hors bande [19]. De plus, le filtre prototype est une conception de filtre électronique qui est utilisée comme modèle pour générer une conception de filtre modifiée pour une application spécifique. 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 [31].

III.6.1 Le filtre PHYDYAS (Physical layer for Dynamic Spectrum Access and cognitive radio) :

Ce filtre a été proposé suite au projet européen PHYDYAS et conçu par Bellanger [34]. Le filtre prototype est conçu à l'aide de la technologie d'échantillonnage de fréquence. Le filtre est conçu de telle manière que seuls les filtres des sous-porteuses immédiatement adjacentes se chevauchent de manière significative dans le domaine fréquentiel [38].

Est un élément clé dans les bancs de filtres modulés complexes car tous les filtres de synthèse et d'analyse sont des versions décalées en fréquence de la réponse en fréquence du filtre prototype passe-bas correspondant. En ce sens, la qualité du système de banc de filtres dépend principalement des propriétés du filtre prototype. Les coefficients de réponse impulsionnelle du filtre prototype peuvent être exprimés à l'aide de la représentation fermée suivante [39] :

$$p[m] = \bar{P}[0] + 2 \sum_{k=1}^{K-1} (-1)^k \bar{P}[k] \cos\left(\frac{2\pi k}{KM} (m + 1)\right) \quad (3.8)$$

$$m = 0, 1 \dots \dots \dots, KM - 2$$

$$K = 4$$

$$\bar{P}[0] = 1$$

$$\bar{P}[1] = 0,97195983$$

$$\bar{P}[2] = 1/\sqrt{2}$$

$$\bar{P}[3] = \sqrt{1 - \bar{P}[1]} = 0,23514695$$

Ces $\bar{P}[k]$ coefficients ne dépendent pas de la longueur du filtre, cette approche est donc évolutive [39]. La figure (9) (10) donne la réponse fréquentielle d'un filtre prototype utilisé dans un système FBMC/OQAM avec différentes valeurs k, on constate que la valeur optimale du facteur de chevauchement en termes de suppression de bande latérale est k=4 [2].

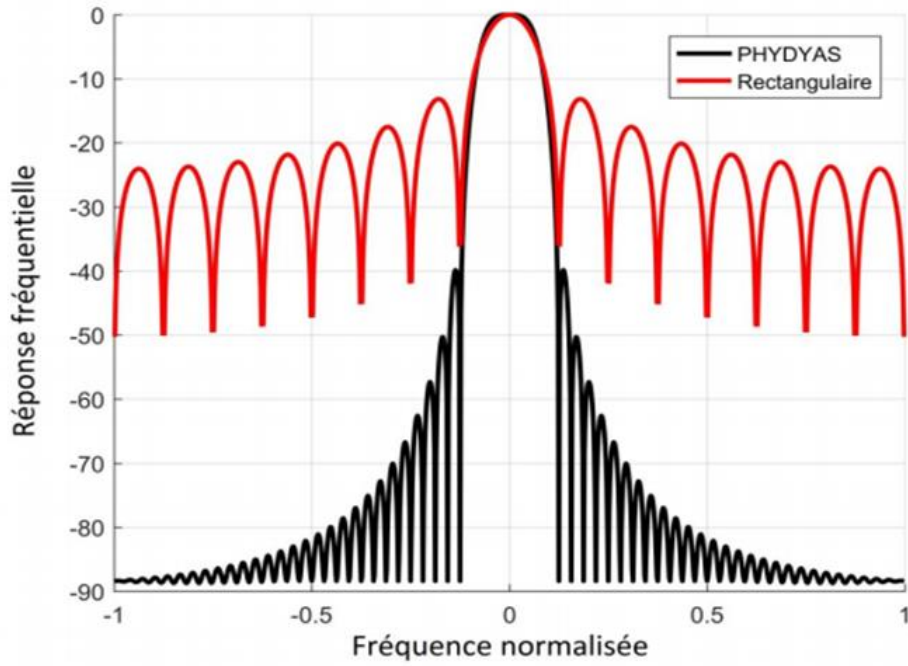


Figure III.9: Réponses fréquentielles des filtres PHYDYAS (FBMC) et rectangulaire [19]

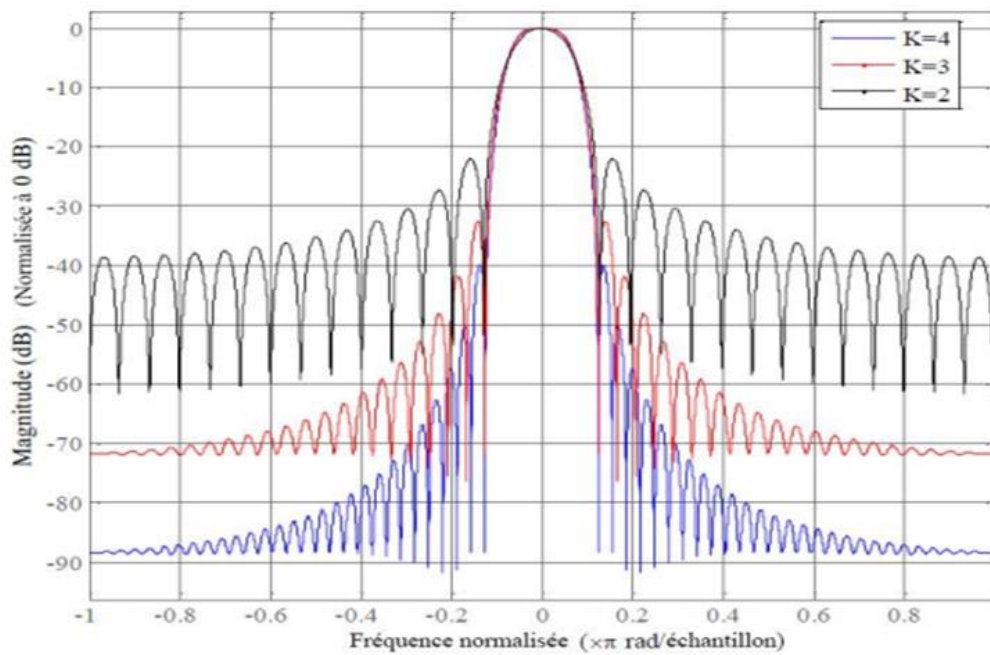


Figure III.10 : Réponse fréquentielle du filtre prototype PHYDYAS [2].

III.7 Comparaisons entre l'OFDM et FBMC :

L'OFDM est largement utilisé dans les réseaux sans fil, mais présente des limites en termes d'efficacité. Contrairement à l'OFDM, la technologie FBMC ne nécessite pas de préfixe cyclique et une petite bande de garde est suffisante pour supprimer les interférences entre les porteuses. Il utilise toute la période du symbole et a des lobes secondaires faibles. Par rapport à la technologie OFDM, sa sensibilité au décalage temporel est beaucoup plus faible. De plus, la technologie FBMC/OQAM est moins sensible au décalage de fréquence résiduel et est plus robuste à l'effet Doppler. La complexité est considérée comme un inconvénient du système FBMC/OQAM, mais cette complexité est réduite par l'utilisation de la structure polyphasée (PPN) [38].

III.8 Conclusion :

Dans la recherche de ce chapitre, nous avons présenté le principe du traitement OQAM et examiné la mise en œuvre polyphasée à l'aide de la transformée de Fourier (IFFT / FFT) des émetteurs-récepteurs de banc de filtres, et nous avons fait une définition d'un filtre prototype qui est utilisé dans la modulation FBMC/OQAM, puis nous avons comparé les deux technologies OFDM et FBMC/OQAM.

Enfin, nous concluons que la technologie FBMC/OQAM est plus adaptée à la 5^{ème} génération, elle conserve les caractéristiques de l'OFDM et améliore ses faiblesses.

Chapitre IV : Résultats et Simulations

IV.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré aux résultats obtenus lors des simulations. Deux parties des résultats sont présentées. La première partie concerne le facteur de crête (PAPR) dans le système OFDM et la seconde partie est de montrer les performances de la modulation FBMC/OQAM. Nous allons la comparer avec la modulation OFDM classique selon deux paramètres de comparaison. Le premier est le filtre d'OFDM et FBMC, et le second critère est l'efficacité spectrale.

IV.3 Le PAPR des systèmes OFDM :

IV.3.1 Approximation de la distribution :

La distribution du PAPR fournit des informations probabilistes sur le système OFDM. Il est généralement modélisé par la fonction de distribution cumulative complémentaire (CCDF). De nombreux travaux ont eu lieu sur le sujet, et une approximation de la distribution PAPR a été proposée sur la base de différentes théories et hypothèses.

Sa connaissance est essentielle pour l'application de techniques de réduction en amont des blocs non-linéaires de la chaîne de transmission. Sa modélisation grâce à une fonction de répartition complémentaire permet d'évaluer les performances des techniques de réduction du PAPR par

L'évaluation de la probabilité que le PAPR dépasse un seuil $PAPR_0$ donné :

$\text{Prob}(PAPR > PAPR_0)$.

De nombreux travaux ont permis de déterminer soit de façon empirique ou soit de façon analytique la fonction de répartition du PAPR. La référence [40] montre que la CCDF du PAPR de $x = [x_0, \dots, x_{N-1}]$ peut être donnée par la relation suivante :

$$P_r[PAPR\{x\} > \gamma] \approx 1 - (1 - e^{-\gamma})^N \quad (4.1)$$

La figure (IV.1) permet de comprendre la probabilité d'un niveau élevé de PAPR pour un signal OFDM en temps discret et en bande de base sachant le nombre de sous-porteuses constituantes. L'équation théorique est confrontée aux résultats obtenus par simulation afin de confirmer sa bonne interprétation du phénomène.

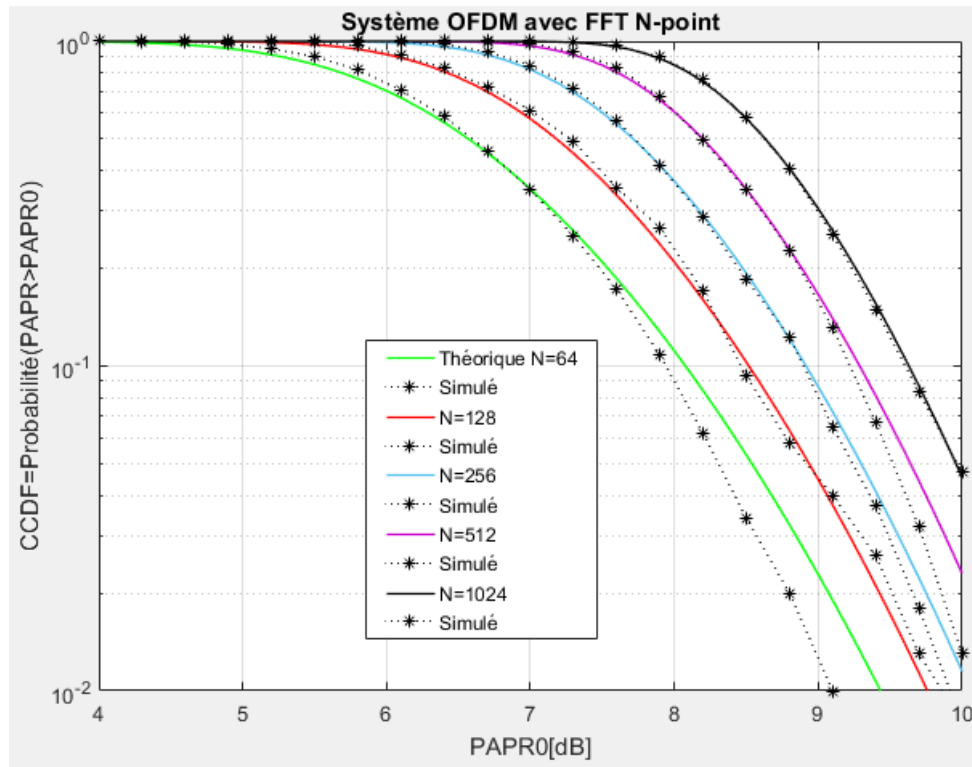


Figure IV.1: CCDF de signaux OFDM avec différents nombres des sous-porteuses (N).

Comme le laisse présager le résultat théorique, la probabilité de forts niveaux de PAPR augmente rapidement avec le nombre de sous-porteuses utilisées. Plus le nombre de sous-porteuses est élevé et plus le PAPR est élevé.

Dans note simulation le nombre des sous-porteuses se varie entre 64, 128, 256, 512 et 1024, on voit clairement que le PAPR augmente avec l'augmentation des sous-porteuses. Comme il est montré dans la figure suivante, pour 64 sous-porteuses le PAPR est de 9,4 dB, pour les 128 il est de 9,8 dB et pour 256, 512, 1024 sous-porteuses la valeur du PAPR dépasse 10db.

IV.3.2 Techniques de réduction du PAPR :

Dans la littérature, le problème de la réduction du PAPR de signaux multi-porteuses a été longuement étudié et de nombreux travaux à ce sujet sont disponibles exploitant des techniques variées comme l'écrêtage, la réservation de porteuses, les transformées non-linéaires ou le codage SLM et PTS partial transmit séquence.

Parmi l'ensemble de ces techniques disponibles, le choix s'est porté sur la technique PTS "Partial Transmit Séquence", cette méthode appartient au groupe des techniques probabilistes qui sont des méthodes ou techniques de réduction du PAPR à représentations multiples du signal (répartition du signal en plusieurs sous-blocs). La technique PTS : Partial Transmit Séquences a été proposée par Müller et Huber en 1997, lors de cette méthode, le bloc d'entrée X à N sous-porteuses est partitionné en M sous-blocs disjoints X_m où : $m = \{1, \dots, M\}$. Chacun est pondéré par un facteur de phase qui minimise le PAPR.

$$X = \sum_{m=1}^M X_m \quad (4.2)$$

L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle nécessite la transmission d'informations secondaires (SI) avec chaque symbole OFDM, ce qui entraîne une faible efficacité de bande passante. Il est difficile de récupérer les informations secondaires du signal OFDM reçu au niveau du récepteur [41].

IV.3.3 Description des performances :

La figure (IV.2) montre le CCDF de PAPR pour un système 32-QAM/OFDM utilisant la technique PTS lorsque le nombre de sous-blocs varie. On voit que les performances du PAPR s'améliorent à mesure que le nombre de sous-blocs augmente avec $V = [1, 2, 4, 8 \text{ et } 16]$.

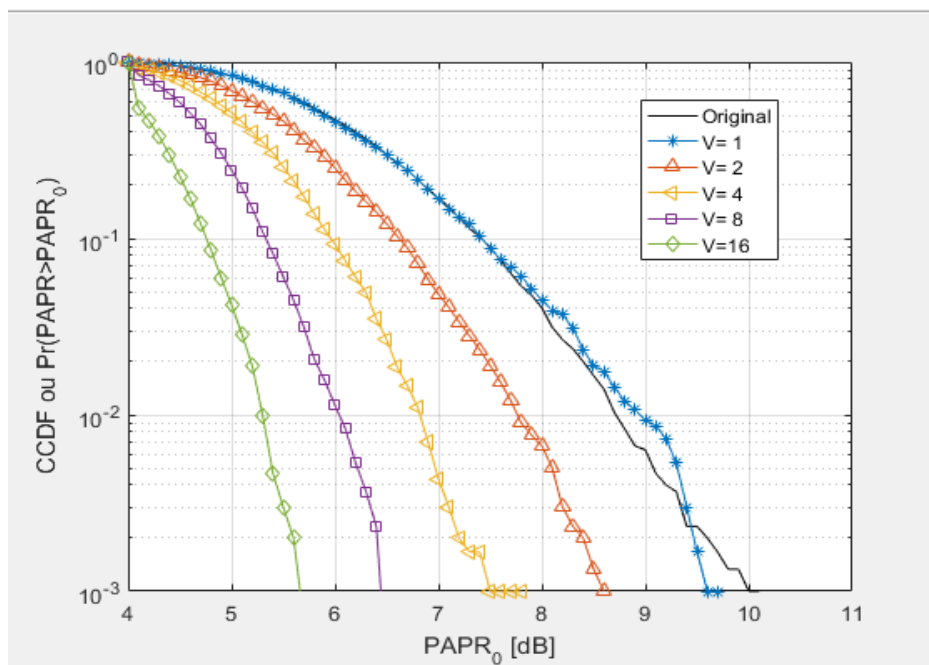


Figure IV.2: Performance PAPR d'un système 32-QAM/OFDM avec technique PTS lorsque le nombre de sous-blocs varie.

Les performances de réduction du PAPR dépendent du nombre de sous-blocs, Plus le nombre de sous-blocs augmente plus la complexité augmente mais les performances du PAPR s'améliorent. Pour divers sous-blocs et le meilleur PAPR se trouve pour le sous-bloc $V=16$.

IV.3.4 Les Performances PAPR de la technique d'étalement DFT pour IFDMA, LFDMA et OFDMA :

La figure (IV.3) montre une comparaison des performances PAPR lorsque la technique d'étalement DFT est appliquée à l'IFDMA, LFDMA et OFDMA. Ici, 4-QAM, 16-QAM et 64-QAM sont utilisés pour un système SC-FDMA avec $N = 256$, $N_d = 64$ et $S = 4$.

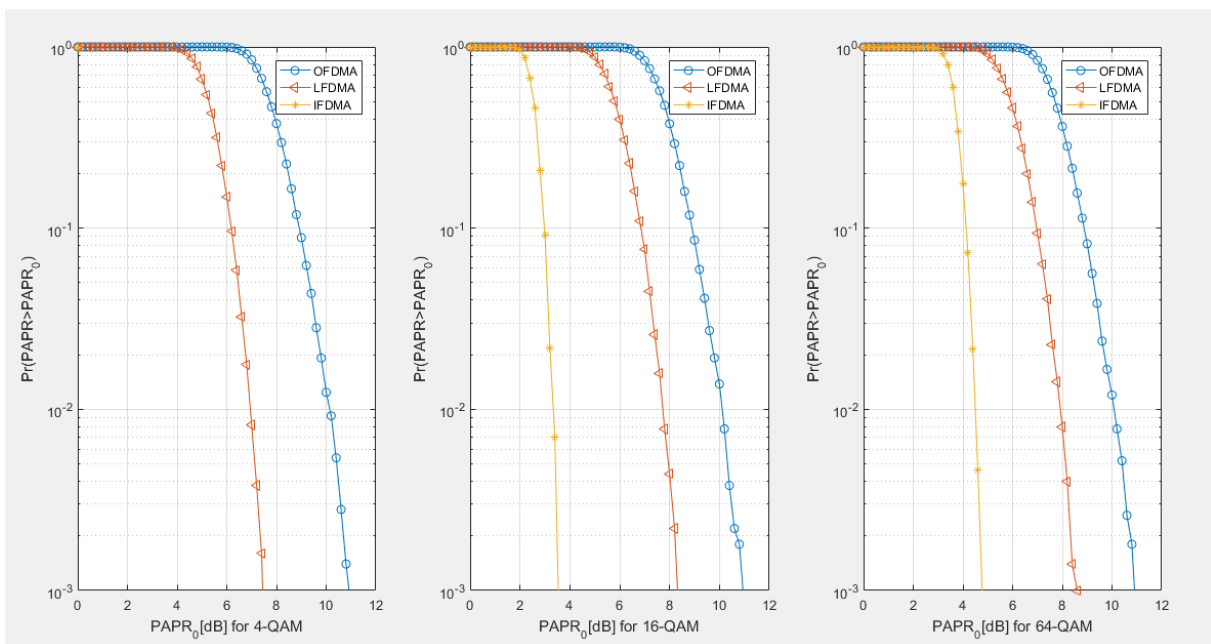


Figure IV.3: Performances PAPR de la technique d'étalement DFT pour IFDMA, LFDMA et OFDMA.

Dans le cas de 16-QAM, les valeurs des PAPR avec IFDMA, LFDMA et OFDMA sont respectivement de 3,4 dB, 7,85 dB et 10,24 dB. Cela implique que les PAPR de l'IFDMA et de la LFDMA sont respectivement inférieurs de 6,8 dB et 2,3 dB à ceux de l'OFDMA sans étalement DFT.

Considérons maintenant l'effet de la mise en forme d'impulsions sur les performances PAPR de la technique d'étalement DFT. La figure (IV.4) montre les performances PAPR de la technique d'étalement DFT avec IFDMA et LFDMA, variant avec le facteur de décroissance α du filtre RC (Raised-Cosine) pour la mise en forme d'impulsion après IFFT.

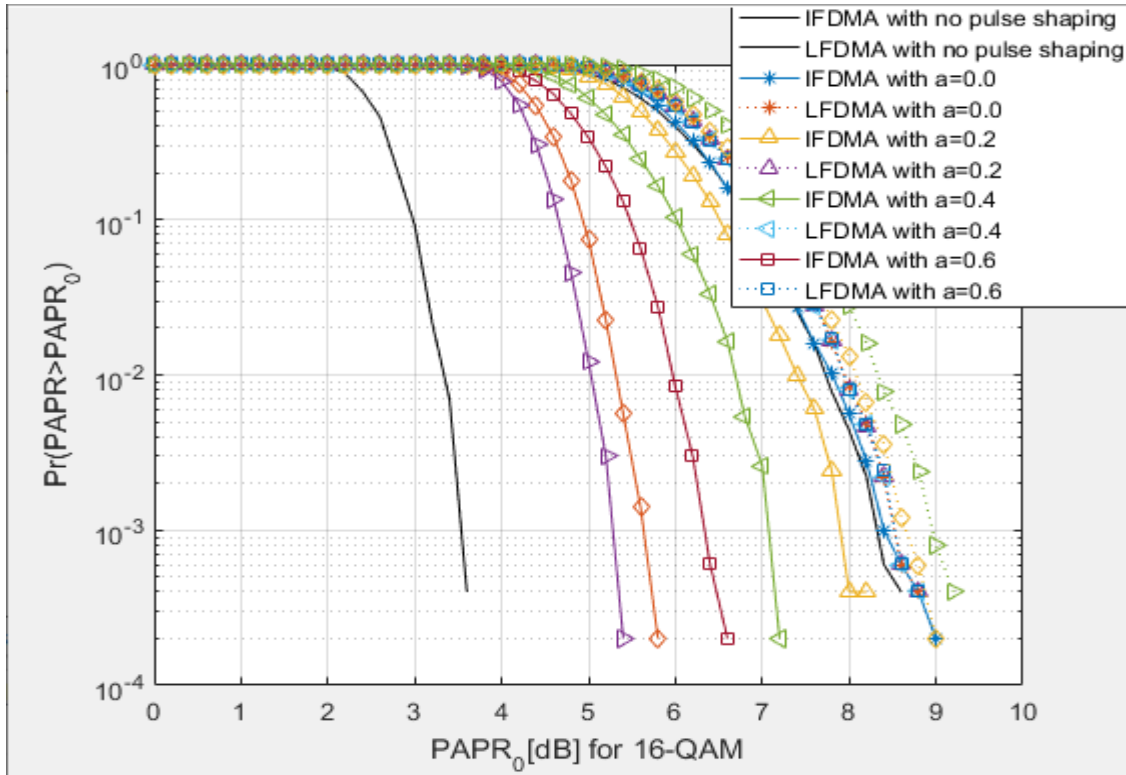
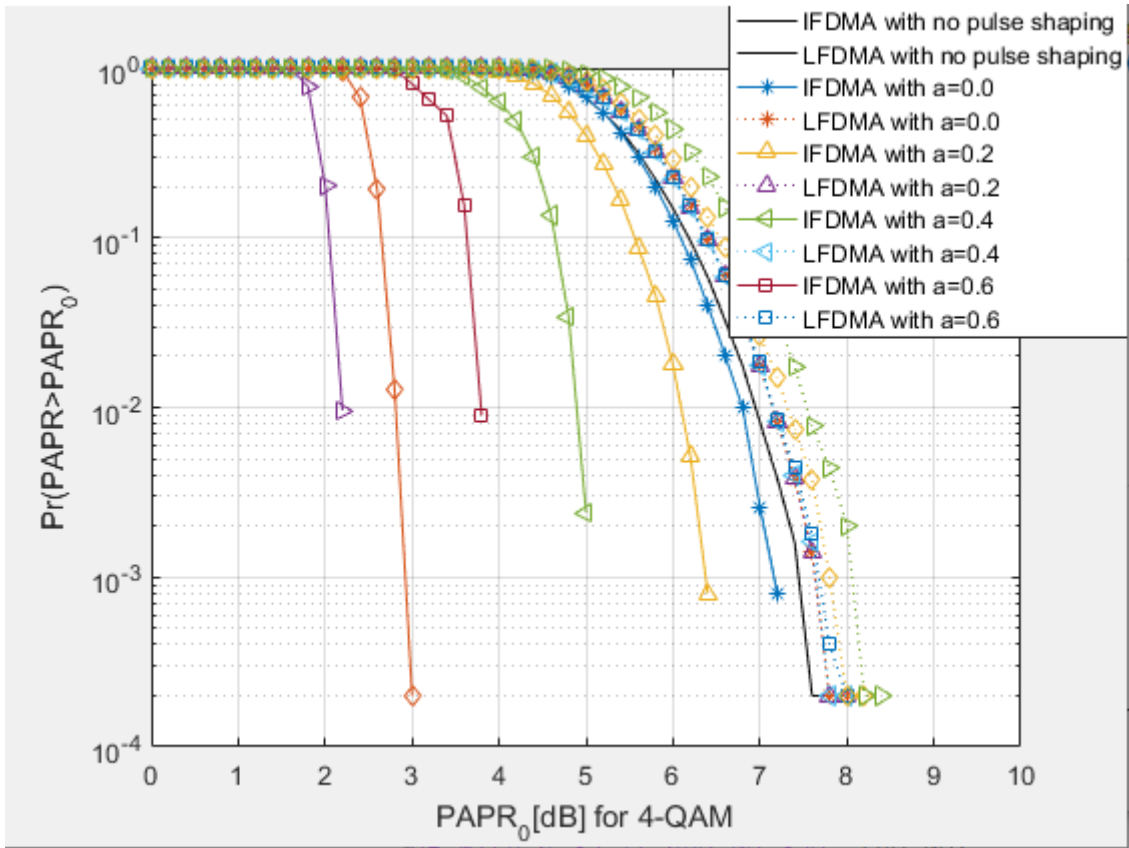


Figure IV.4: Performances PAPR de la technique d'étalement DFT avec mise en forme d'impulsion.

On peut voir sur cette figure (IV.4) que les performances PAPR de l'IFDMA peuvent être considérablement améliorées en augmentant le facteur d'atténuation de $a = 0$ à 1. Ceci contraste avec le LFDMA qui n'est pas tellement affecté par la mise en forme des impulsions. Cela implique que l'IFDMA aura un compromis entre l'excès de bande passante et les performances PAPR, car l'excès de bande passante augmente à mesure que le facteur de réduction devient plus important. Les résultats ici ont été obtenus avec les paramètres de simulation de $N = 256$, $N_d = 64$, $S = 4$ (facteur d'étalement) et $N_{os} = 8$ (facteur de sur échantillonnage pour la mise en forme des impulsions) pour 4-QAM et 16-QAM. Voyons maintenant comment les performances PAPR de la technique d'étalement DFT sont affectées par le nombre de sous-porteuses N_d , qui sont allouées à chaque utilisateur.

La figure (IV .5) montre que les performances PAPR de la technique d'étalement DFT pour LFDMA avec un facteur de décroissance de $a=0,4$ se dégradent à mesure que N_d augmente.

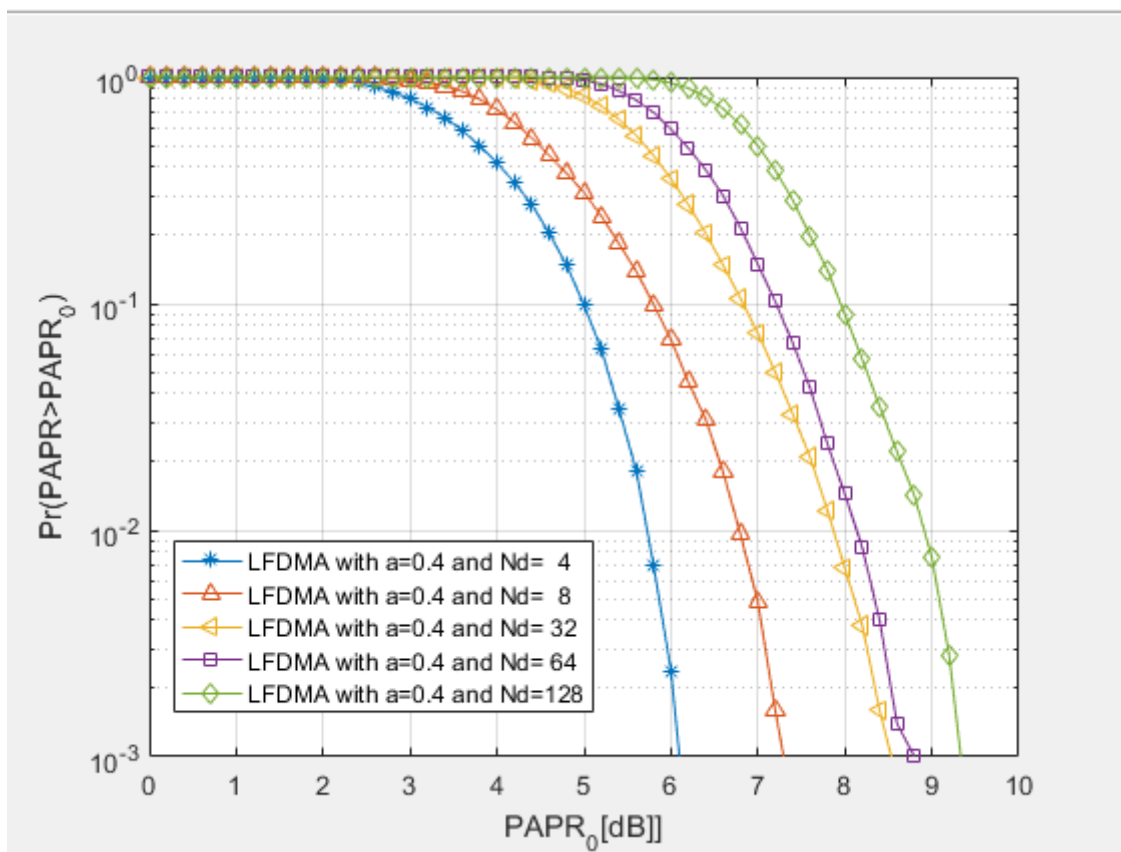


Figure IV.5: Performances PAPR de la technique d'étalement DFT lorsque le nombre de sous-porteuses varie

En conclusion, la consommation de la batterie des téléphones portables est un critère à considérer pour la transmission en liaison montante. Quelle que soit la modulation utilisée, le système SC-FDMA avec IFDMA et LFDMA a de meilleures performances PAPR que le système OFDMA. C'est pourquoi il est utilisé dans les systèmes LTE. Bien que le PAPR de l'IFDMA soit inférieur à celui de la LFDMA, la LFDMA est généralement préférée pour la mise en œuvre. Elle est attribuée au fait que l'allocation de sous-porteuses avec équidistance sur toute la bande (IFDMA) n'est pas facile à mettre en œuvre, car IFDMA nécessite des ressources supplémentaires.

IV.4 Comparaison des techniques de transmission OFDM et FBMC/OQAM :

La principale différence entre les systèmes OFDM et FBMC est le choix du filtre prototype. En effet, le système OFDM utilise un filtre à fenêtre rectangulaire tandis que le système FBMC utilise un filtre conçu avec le principe de mise en forme d'impulsions de Nyquist afin de réduire le problème de fuite spectrale rencontrée dans le système OFDM.

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

Le filtre prototype peut être facilement programmer sur Matlab. Vous devez choisir le nombre de sous-porteuses M et l'application de la formule de réponse impulsionnelle avec les coefficients du filtre, le temps et la fréquence en utilisant l'outil d'analyse d'un filtre de Matlab. Il est important de signaler que les coefficients du filtre prototype PHYDYAS, bien localisées en temps et en fréquence, dépendent uniquement du facteur de chevauchement K, mais ne dépendent pas de la longueur du filtre. Dans notre simulation le nombre des sous-porteuses $M=16$ et le facteur de chevauchement varie : $k=2, 3, 4$.

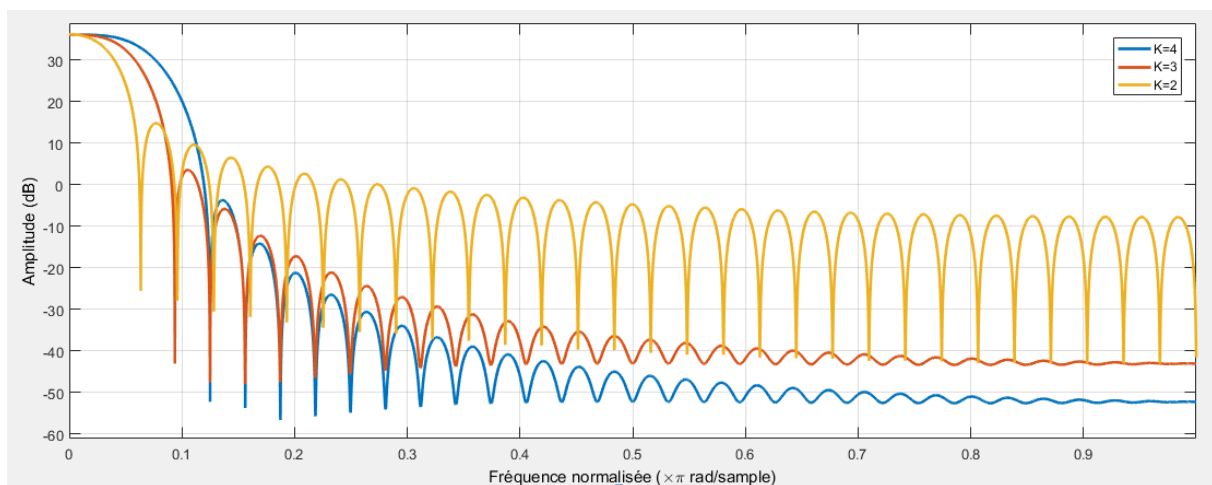


Figure IV.6: Réponse fréquentielle du filtre prototype PHYDYAS en variation de K.

Nous remarquons que le filtre le plus efficace s'atténue pour $k = 4$ dans le domaine fréquentiel, car la forme de la fenêtre du filtre est réduite presque verticalement, et les lobes secondaires au bord s'atténuent de manière limitée.

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

Dans notre simulation, Pour une visualisation claire de la réponse fréquentielle (figure IV.8) 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.

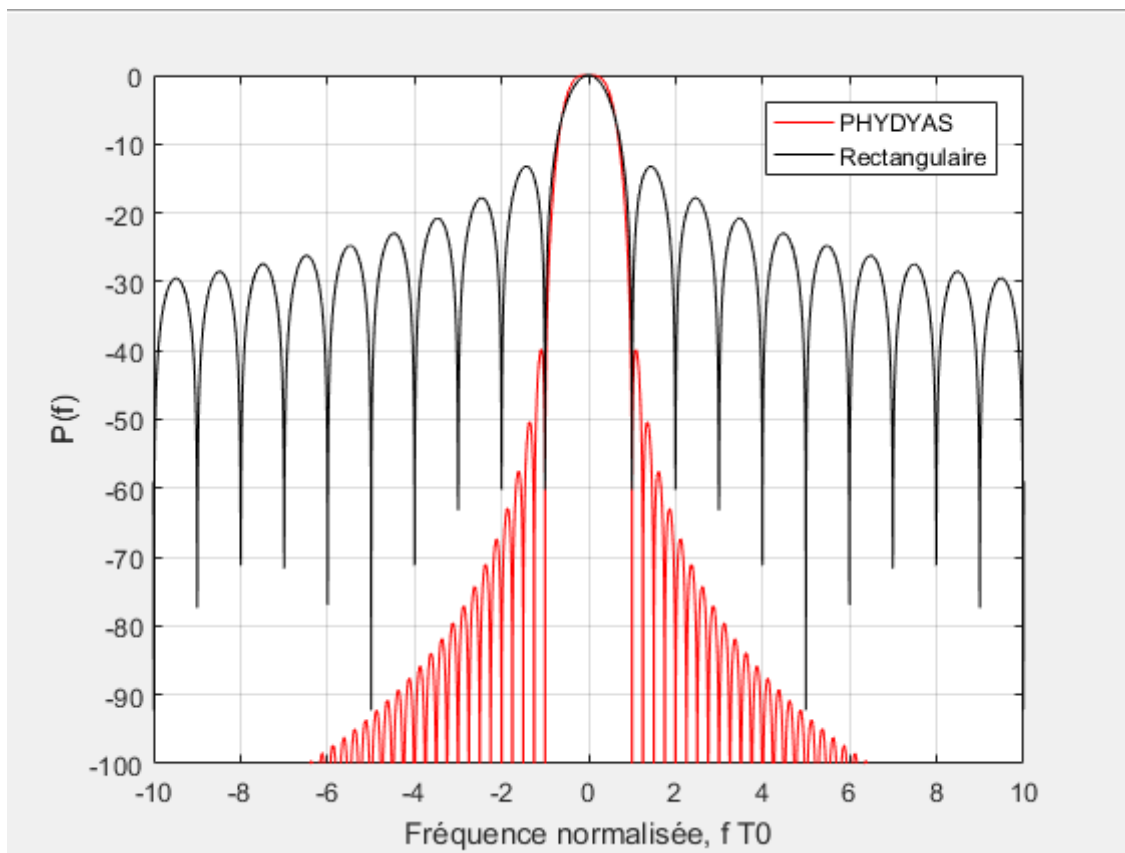


Figure IV.7: Comparaison la réponse fréquentielle OFDM/FBMC.

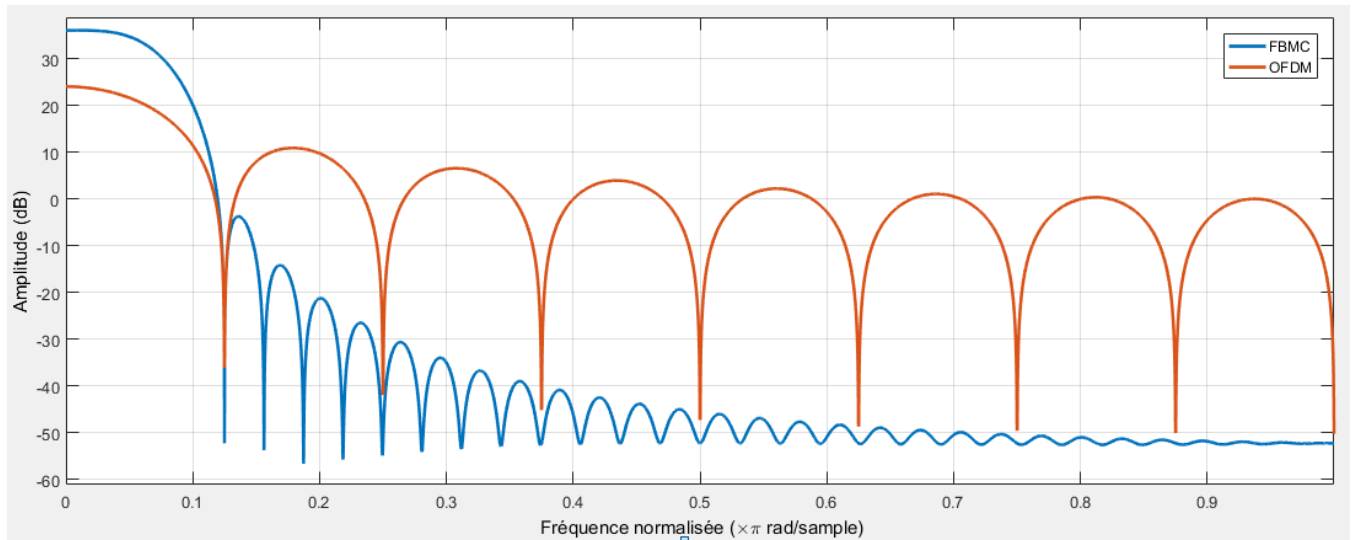


Figure IV.8: Réponses d'amplitude de filtre de la FBMC et OFDM.

La figure 8 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 4 sous-porteuses dans le cas de l'OFDM et du FBMC :

Pour $k=2$:

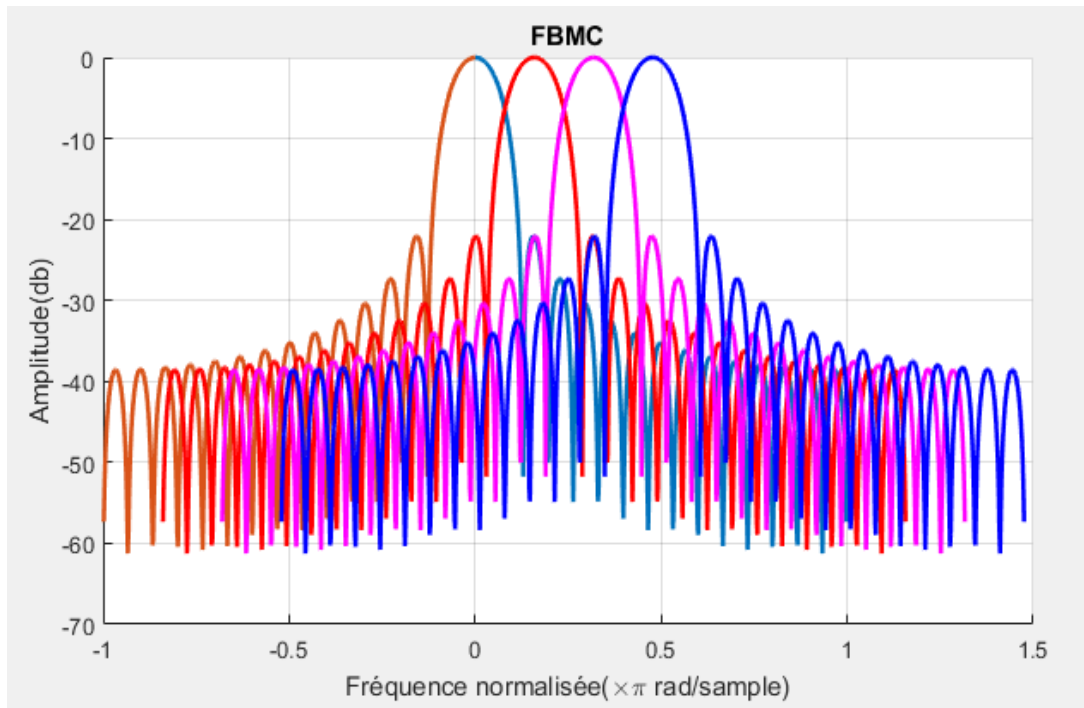


Figure IV.9 : Quatre sous-Porteuses FBMC.

Pour $k=3$:

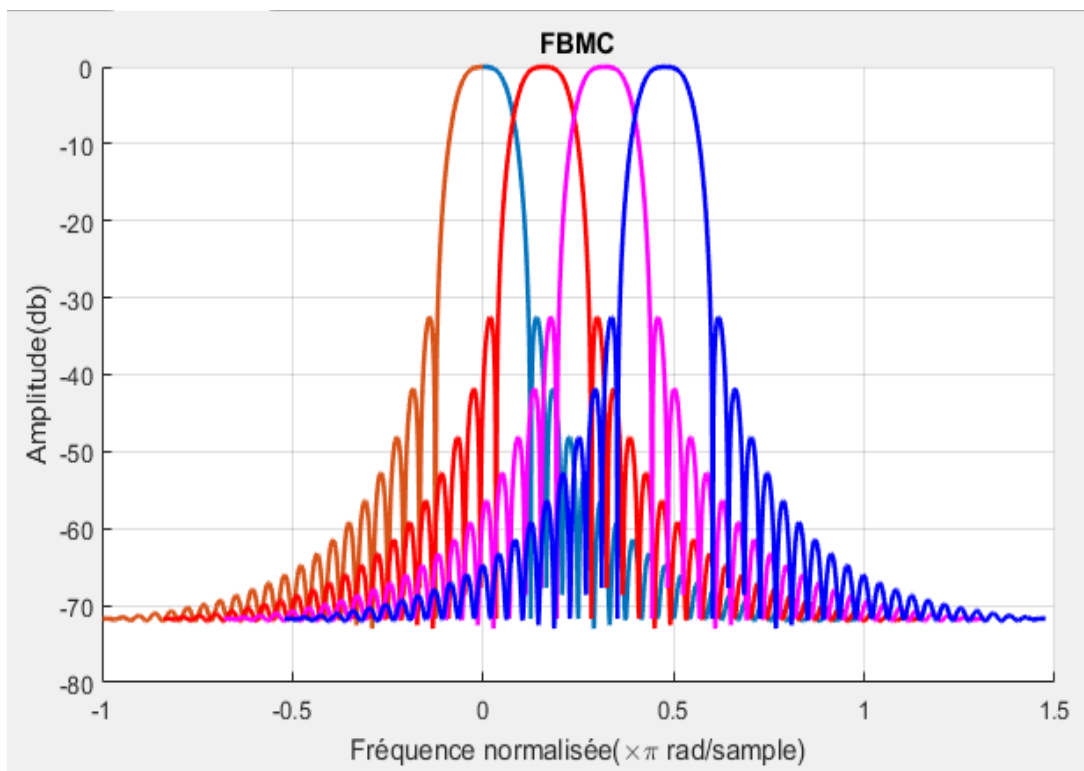


Figure IV.10 : Quatre sous-Porteuses FBMC

Pour $k=4$:

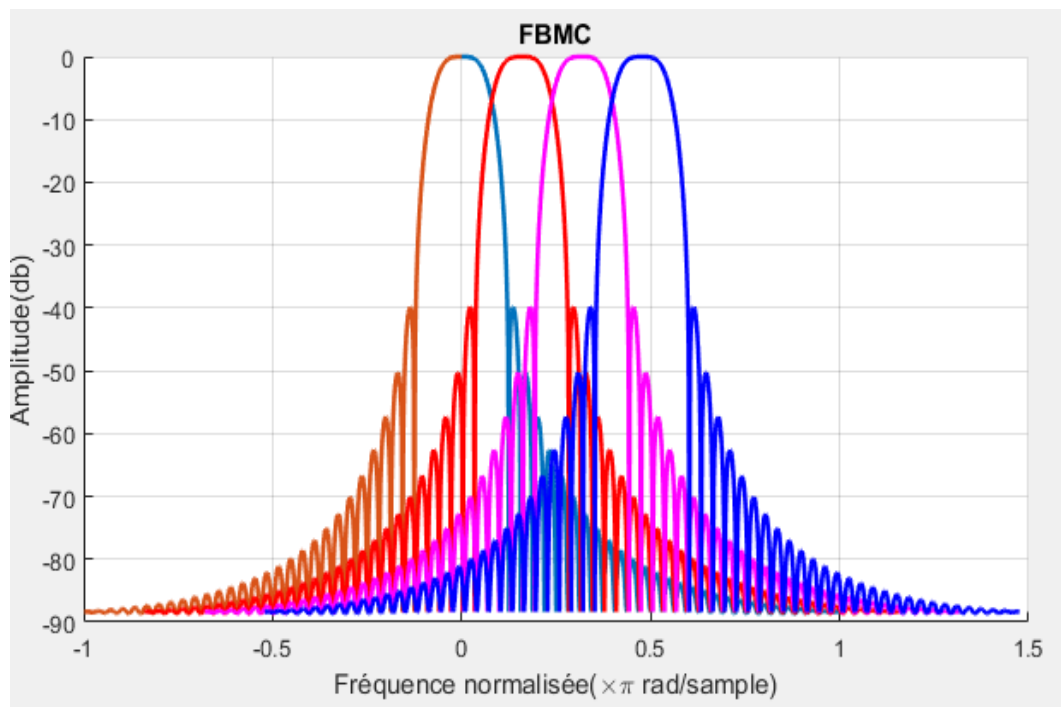


Figure IV.11 : Quatre sous-porteuses FBMC

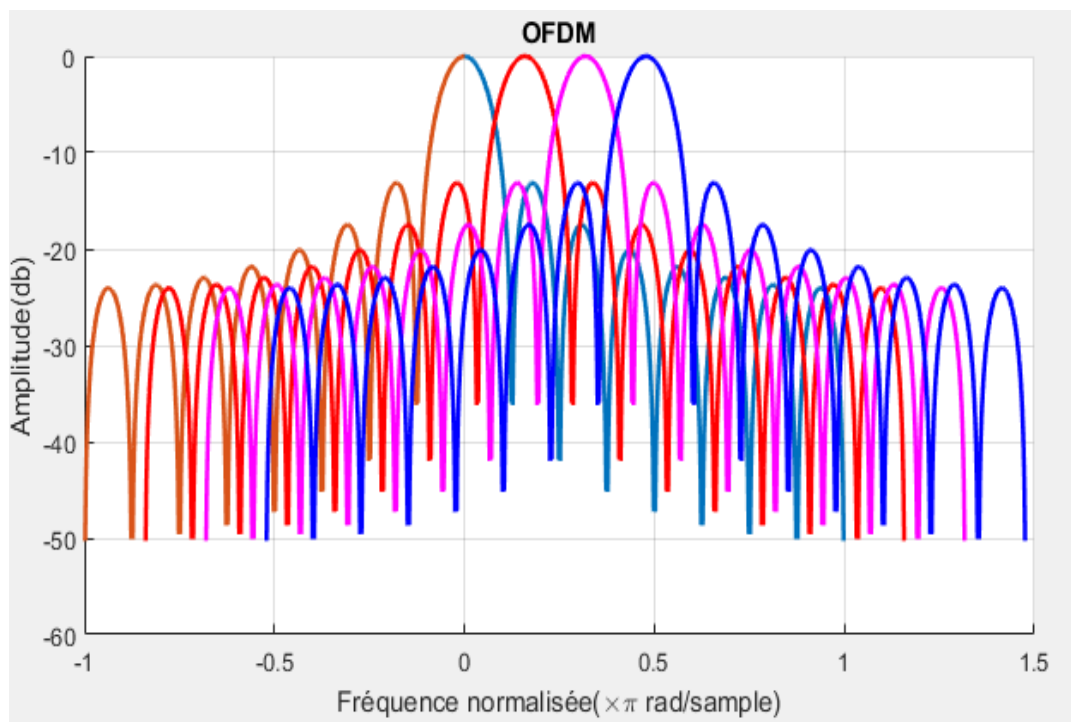


Figure IV.12 : Quatre sous-Porteuses OFDM.

Les figures montrées que L'OFDM souffre d'une mauvaise sélectivité spectrale par rapport au 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. OFDM classique avec celui du projet PHYDYAS.

IV.4.3 Densité spectrale de puissance :

La figure (IV.13) illustre la comparaison entre les DSP des deux formes d'onde OFDM et FBMC. la région om en rouge représente la densité spectrale du OFDM tandis que le noir celle de L'FBMC. Pour cette simulation la modulation utilisée est 4-QAM. Pour la FBMC on utilise un filtre PHYDYAS.

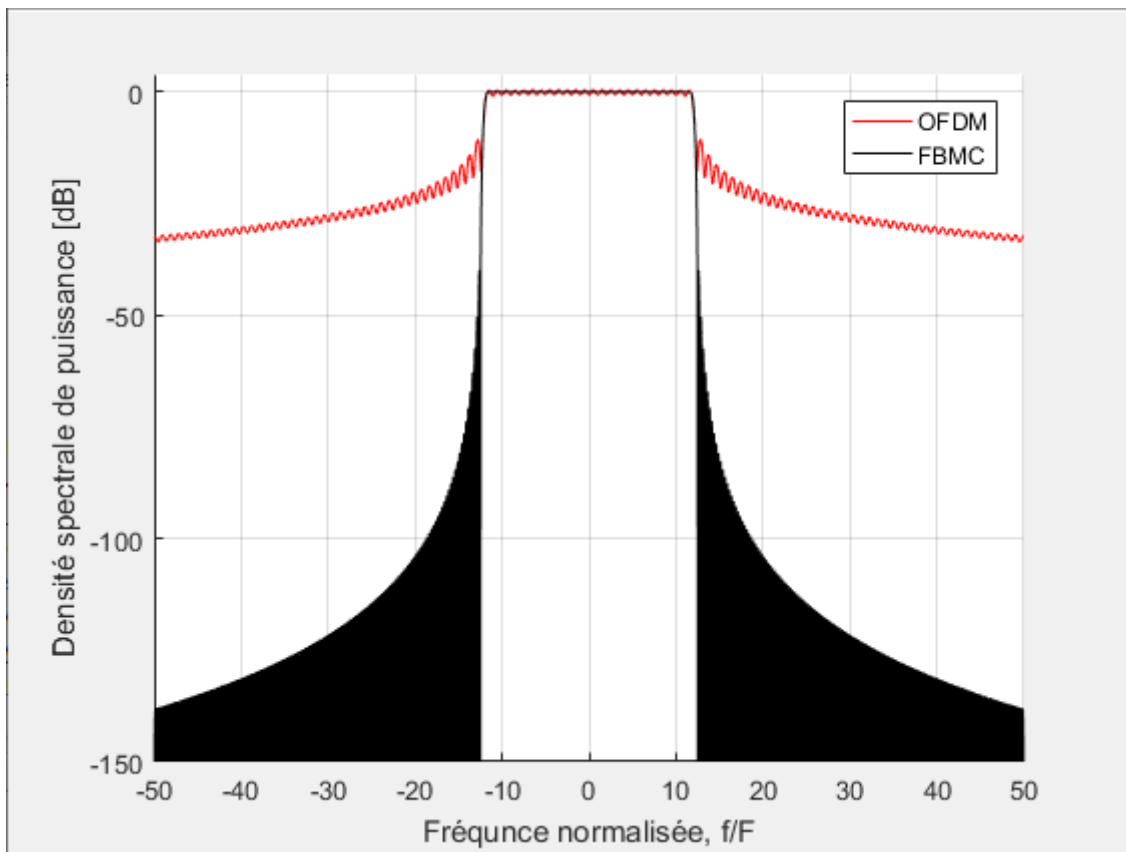


Figure IV.13: DSP (OFDM vs FBMC) ,4-QAM.

```

Command Window
>> PFE_Figure_02_PowerSpectralDensity
=====
              | (complex) TF-Spacing | Bandwidth(LF) |
OFDM (with CP) |           1.07 |    0.36 MHz |
FBMC           |           1.00 |    0.36 MHz |
=====

```

Figure IV.14: Espacement et bande passante de FBMC et OFDM pour DSP.

Dans la figure 14, l'espacement temporel et fréquentiel et bande passante a été réalisée pour FBMC et OFDM pour obtenir la densité spectrale de puissance de FBMC et OFDM.

D'abord nous traçons la DSP du système OFDM, FBMC sur la figure, nous observons que l'OFDM souffre d'une fuite de lobes secondaires pire d'environ -30 dBW/Hz, le FBMC offre les meilleures performances avec une fuite de lobes secondaires inférieur a -150 dBW/Hz. Cela fait cependant du FBMC le meilleur choix pour la communication des multi-porteuses.

IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté dans la première partie l'étude du PAPR dans un système OFDM. Afin de réduire l'effet de PAPR, Nous avons étudié la méthode PTS ordinaire. La seconde partie est de montrer la comparaison des performances de OFDM et de FBMC en tant que critère le plus des prétendants potentiels à la 5G ont été réalisés et simulés par MATLAB en termes de courbes de densité spectrale de puissance OFDM et FBMC, et la comparaison de filtres prototypes de FBMC et OFDM. Toutes les simulations effectuées montrent que la technique FBMC est la plus intéressante pour la forme d'onde de la communication sans fil, spécialement les télécommunications 5G. Les lacunes de la technique OFDM ont été abordées et supprimés par le FBMC.

Conclusion générale :

Les systèmes radio mobiles de 5ème génération attirent de plus en plus l'attention des chercheurs et des opérateurs ces dernières années. La technologie 5G promet une révolution. Une plus grande bande passante et des temps de latence extrêmement faibles permettent de développer de nouveaux services. Le développement et le déploiement, de ces réseaux, présentent de très grands défis. A travers ce travail, nous avons étudié deux types de modulation multi-porteuse : La modulation OFDM et FBMC. Nous avons étudié la modulation OFDM (chapitre deux) qui permet de réduire le phénomène de sélectivité grave à une division de la bande passante Δf pour qu'elle soit petite que la bande de cohérence B_c , de plus OFDM utilise un intervalle de garde qui permet de réduire les interférences entre symboles, mais cette utilisation de PC conduit à une perte dans la bande de transmission car le PC ne comporte aucune information, c'est pour ça que les chercheurs ont pensé à des nouvelles techniques de modulation multi-porteuse qui éliminent les inconvénients de la modulation OFDM, pour cette raison ils ont passé vers la modulation FBMC (Chapitre trois) qui ne nécessite pas l'utilisation de PC et donc a un gain important dans la bande passante. De plus la principale différence entre FBMC et OFDM est qu'au lieu d'utiliser une fenêtre rectangulaire qui contient des lobes secondaires non négligeables devant le lobe principal on utilise un filtre prototype plus avancé, veut dire avoir des lobes secondaires négligeables devant la principale. Cela peut réduire le problème de fuite spectrale de l'OFDM entraînant une ISI et ICI négligeables. De plus, la combinaison de FBMC avec modulation d'amplitude en quadrature décalée (FBMC/OQAM) conduit à un débit de transmission de données plus élevé. Comme nous avons déjà dit le FBMC utilise des filtres prototype bien localisés en temps et en fréquence. Dans ce mémoire on a utilisé le filtre PHYDYAS qui peuvent être cités comme exemple de filtres temporels et fréquentiels bien localisés. L'utilisation de filtre bien localisé en temps et en fréquence, avec une efficacité spectrale maximale pour séparer les sous canaux dans le système OFDM/QAM est impossible, pour utiliser ces filtres nous devons utiliser l'orthogonalité complexe, car les filtres bien localisés n'ont que l'orthogonalité réelle. Pour cela la modulation OQAM qui est utilisée dans FBMC peut séparer les symboles complexes en partie réelle et imaginaire pour la transmission. Les résultats de la simulation (quatrième chapitre) montrent que pour tous les paramètres considérés, le FBMC apporte une amélioration globale des performances par rapport à l'OFDM traditionnel.

Références Bibliographique

- [1] [Marwa Chafii, “Etude d’une nouvelle forme d’onde multi porteuses à PAPR réduit ”. Thèse Doctorat en Télécommunications’, Université de Rennes 1, Novembre 2007]
- [2] [Bendahmane Amira Merieme, Ghermoul Rania, ‘Etude les Méthodes de Beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour systèmes FBMC ’, Université Aboubekr Belkaid-Tlemcen-Faculté de Technologie, 2017-2018]
- [3] [MAHARIMANANA Léonie Elsa, ’ ETUDE DE LA MODULATION GFDM ET DE LA TECHNIQUE D’ACCES NOMA DU RESEAU 5G’, UNIVERSITE D’ANTANANARIVO, ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE, 28 Mars 2017]
- [4] [HACINI Khaled, ABADELIA Anes, ‘ Egaliseur LTE-LMS avec différentes modulations’, Université 8Mai 1945 – Guelma, Juillet 2019]
- [5] [Korichi Khaled et Moussaoui Salah Eddine, ’ Analyse des performances de FBMC dans un système de transmission sans fil’, Université d’EL-Oued, 2018/2019]
- [6] [<https://fr.mathworks.com/>]
- [7] [<https://www.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>]
- [8] [Jean Marc Ribero / Aboubaker chedikh beye, Thèse de doctorat conception de petits réseaux d’antennes reconfigurables ou “small-cells” Pour le standard 5G, Université de Nice, France. 09 Mai 2019]
- [9] [Ratsimbazafy Orimbato Fehizoroniaina, ‘Etude Des Formes D’ondes utilisées en 5 NR’, Maitre de conférences, école supérieur Polytechnique, 2017-2018]
- [10] <https://www.hebergementwebs.com/tutoriel-5g/5g-presentation>
- [11] [DACI Kaoutar, Dou Warda, ’ Etude de massive MIMO pour 5G’, Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2018-2019]
- [12] [<https://www.3gpp.org/>]
- [13] [David Demmer. ‘OFDM Precoding for Filter-Bank based Waveforms’. Signal and Image processing, Conservatoire national des arts et metiers - CNAM, 2019]

- [14] [Hadj Makhnache Khadidja, Reguibi Racha, 'Etude et implémentation des modulations multi-porteuses, pour la 5G', Mémoire de MASTER, Université 08 mai 1945-Guelma, juillet 2019]
- [15] [HACHEMI Mohammed Hicham, 'Etudes et modélisation des performances des réseaux LTE/LTE-A : vers le Handover', Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen UABT ,01 Juillet 2017].
- [16] [François-Xavier Wolff et Yannick Bouguen, LIVRE, 'LTE et les réseaux 4G',2012].
- [17] [M : KHOBZAOUI Abderrahim, M : CHAIBI Boussaad, 'Planification d'un réseau 4G en zone urbaine', Mémoire de MASTER, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2015/2016]
- [18] [M. RAKOTONDRAINA Tahina Ezéchiél, 'ETUDE DES FORMES D'ONDES UTILISEES EN 5G NR', Université El Oued, 05 Août 2019]
- [19] [IKNI Samir, THESE, 'Contribution à l'Etude et au Développement de Techniques Avancées de Modulations Multi porteuses pour les futurs Systèmes de communication sans fil', Université 08 Mai 1945-Guelma, 2018-2019]
- [20] [BAARE DARI HABIBOU, Traore Kaba, 'Nouvelle approche alternative de l'OFDM pour la 5G (FBMC/OQAM) Etude comparative et application ', juin 2017]
- [21] [Hamani Othmane, Bekouche Lotfi, 'Modélisation et simulation des performances de réseaux 4G /LTE'', Université Abderrahmane Mira. Bejaia, 2019-2020]
- [22] [Melle. LARBI Nacéra, 'Détection multi-utilisateurs dans le contexte de communication mobile : Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA', Université science et technologie Oran, 2015]
- [23] [BAOUNI ABDELKHALEK, « Estimation du Canal et Elimination des Interférences ICI dans les Communications Mobiles avec Modulation OFDM », MEMOIRE Présenté pour obtenir le diplôme de Magister, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, Disponible sur : <https://fr.scribd.com/doc/242265896/Baouni-A-pdf>]
- [24] [GALYNA PISKONOVA, 'TRANSMISSION OFDM POUR LA TÉLÉPHONIE CELLULAIRE', Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure,2003]

- [25] [ABHISHEK ARUN DASH, 'OFDM SYSTEMS AND PAPR REDUCTION TECHNIQUES IN OFDM SYSTEMS', DEPARTMENT OF ELECTRONICS AND COMMUNICATION ENGINEERING NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ROURKELA,2006 – 2010]
- [26] [ROGER DIB, 'CONCEPTION ET VALIDATION D'UN SIMULATEUR DE SYSTÈME OFDM POUR LES RÉSEAUX INTÉRIEURS SANS FIL', ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DE QUÉBEC, 28 AVRIL 2003]
- [27] [M. Abdellatif KHELIL, 'ETUDE ET PERFORMANCE D'UN SYSTEME DE COMMUNICATION SANS FIL A BASE D'OFDMA MIMO', Université Ferhat Abbas – Sétif,2017]
- [28] [S. Weinstein and P. Ebert, "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform," IEEE Transactions on Communication Technology, vol. 19, no. 5, pp. 628-634, 1971]
- [29] [Yvon Sosthène Yameogo, 'Etudes de nouvelles techniques d'estimation et d'égalisation de canal adaptées au système SC-FDMA', Université Rennes 1, 2011 Français]
- [30] [Jérémy Nadal, THÈSE / IMT Atlantique sous le sceau de l'Université Bretagne Loire pour obtenir le grade de DOCTEUR D'IMT Atlantique, 'Filtered Multi carrier Waveforms in the Context of 5G : Novel Algorithms and Architecture Optimizations' Université Bretagne Loire, 15 décembre 2017]
- [31] [Korichi Khaled, Moussaoui Salah Eddine, MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER, 'Analyse des performances de FBMC dans un système de transmission sans fil ', Université d'EL-Oued, 2018/2019]
- [32] [Avinash Rai, Surbhi Vyas, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), ' Augmentation of Spectral Efficiency using APSK in FBMC to Assess High Data Rate', July 2019]
- [33] [P. Sihon, C. Siclet and N. Lacaille, 'Analysis and design of OFDM/OQAM systems based on filterbank theory' IEEE Transactions on signal Processing, vol. 50, no.5, pp.1170-1183,2002]

- [34] [Maurice Bellanger, 'TRAITEMENT NUMÉRIQUE DU SIGNAL', 2-ème et 3-ème cycles/Master, Écoles d'ingénieurs (8e édition). Préface de Pierre Aigrain]
- [35] [Madarevues. Art no05 ,2016, 'Etude de la technique de modulation FBMC-OQAM', vol 2 pp 37-44. MADA-ETI, ISSN 2220-0673]
- [36] [HAN WANG, XIANPENG WANG, LINGWEI XU, WENCAI DU, 'Hybrid PAPR Reduction Scheme for FBMC/OQAM Systems Based on Multi Data Block PTS and TR Methods', College of Information Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228, China, Department of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China, Septembre 16, 2016]
- [37] [Yahia Medjahdi, THESE DE DOCTORAT Présentée pour obtenir le Grade de Docteur, 'Modélisation d'Interférence et Analyse des Performances des Systèmes OFDM/FBMC pour les Communications sans fil Asynchrones', École Doctorale Technologique et Professionnelle CEDRIC/LAETITIA, 11 Juillet 2012]
- [38] [BOUNEGAB Abdelhamid, BELKHAIRI Abderrahmane, Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, 'Performances d'un système de communication sans fil à base de la technique FBMC pour la 5G', UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2017 /2018]
- [39] [Ari Viholainen (TUT – WP5 leader), Maurice Bellanger (CNAM), Mathieu Huchard (LETI), 'Prototype filter and structure optimization'. PHYDYAS-D5-1. January 22, 2009]
- [40] [Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang, Livre 'MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB', 25 August 2010]
- [41] [Isli Dounia, Lachouri Sara, Mémoire fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme Master en Télécommunications, Université A. Mira de Béjaïa, 'Réduction du PAPR par PTS lors d'une transmission OFDM', 2019 – 2020]

