الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUEUNIVERSITE DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DU GENIE ELECTRIQUE

Projet de Fin d'étude pour l'obtenir Diplôme Master.

Filière : Télécommunications.

Spécialité : Systèmes de télécommunications.

Thème: Simulation des systèmes de communications multi-porteuses OFDM/FBMC.

Préparé et présenté par

HENTABLI Selma.
ATCHI Nesrine.

Proposé et dirigé par

Dr. ESSAID Billel.

Promotion : 2020/2021

Remerciements

الحمد لله الذي وفقنا لهذا وما توفيقنا الا بالله

*Nous remercions **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné les courages et la volonté de mener à terme ce modeste travail.*

Ce travail a été accompli à l'aide de plusieurs personnes que je tiens à remercier absolument.

*Ce travail a été effectué à **l'université de Yahia Farés de Médéa***

Il est le fruit de tant d'années d'étude. Il nous donne l'occasion de remercier tout l'enseignant de notre département d'électronique et télécommunication ayant participé d'une manière ou d'une autre à notre formation.

*Je remercie en premier lieu mon encadreur **Dr. ESSAID Billel** de m'avoir apporté de valeureux conseils et soutiens durant la réalisation de cette mémoire.*

*Je remercie le Professeur **Mr. Othmanine** et **Mr. Kalache** qui nous a beaucoup aidés et avec leurs précieux conseils*

Je lui transmets l'expression de ma reconnaissance et de ma plus profonde gratitude.

Je n'oublis pas mes parents, et à toute ma grande famille.

A tous ceux que j'aime.

Finalement nous souhaitons exprimer notre gratitude envers les membres du jury.

Merci à tous et à tout.

Dédicaces

D'abord je veux remercier Moi-même.

Merci à Moi pour se réveiller du dormir.

Merci à Moi Pour J'ai marché une longue distance Just pour étudier.

Merci à Moi pour résister au stress psychologique pendant des années.

Je dédie ce modeste travail.

À Mes très ***chers Parents*** *qui m'ont donné tant de sacrifices et d'encouragements. Puisse Dieu, le tout puissant, mes vous préserve et vous accorder santé, longue vie et bonheur.*

À Mes très chers frères : ***Sidali*** *et* ***Mohamed****.*

À Ma partenaire et Ma chère Sœur : ***Nesrine***

L'amie que j'ai prié Dieu de me donner Pour terminer mes études restantes avec elle.

L'amie que j'aime beaucoup.et Derien.

À Mes très chères Amie: ***Rania****,* ***Amira, Moska.***

À Mes très chères cousines et sœurs : ***Nassima, Fadila, Aicha, Halima, Marwa, Hanane, Meriem, Lamia et karima****. À tous les membres de la famille* ***Hentabli et Boukhelkhal****.*

A Mes Anges ***BTS*** *surtout* ***My*** *Base* ***Suga***

HENTABLI SELMA…….

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma très chère mère ***Nadia Hassien-bey*** *Tu représentes pour moi, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur*

Je dédie ce travail à Mon ***père****, Ma* ***sœur****, et Mes* ***frères****, Ma* ***grand-mère yamina***

Tout les familles ***Atchi*** *et* ***Hessein-bey****,*

À Mes très chères Amie: ***Hanane, Imane , Farida****,* ***Moska , Amina Tabel , Insaf , Ahlem***

À Mes très chères cousines et sœurs : ***Aicha , Amel ,Nabila, Imane, Djahida , Meriem ,Marwa***

A Mon binôme ***Selma,*** *tu es toujours dans mon cœur comme une sœur, Jeté remercie pour ta présence à mon côté et pour tes encouragements, que ce travaille te garde pour moi.*

ATCHI NESRINE……..

ملخص

تم اختيار تقنيات التعديل متعدد الموجات لتطوير أنظمة الاتصالات اللاسلكية الحديثة مثل الجيل الخامس ، الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة الأشكال الموجية المختلفة من أجل الحصول على اتصال عالي الجودة مع معدلات إرسال أعلى. لهذا ، قمنا بفحص تعديل FBMC الجديدة التي يمكن أن تحل محل تعديل OFDM. بالإضافة إلى ذلك, يجب إجراء مقارنة بينها وبين OFDM، وسيتم إجراء عمليات المحاكاة المختلفة باستخدام برنامج MATLAB لتأكيد الكفاءة وتقييم أداء كل تقنية.

الكلمات المفتاحية : 5G, OFDM, FBMC

Résumé

Des techniques de modulation multi-porteuse ont été sélectionnées pour le développement des systèmes de communication sans fil modernes tels que la **5**G, Le but de ce projet est d'étudier différentes formes d'onde afin d'obtenir une communication de haute qualité avec des taux de transmission plus élevés. Pour cela, nous avons examiné l'onde FBMC qui peut remplacer l'OFDM. De plus, une comparaison devra être faite entre celui-ci et l'OFDM, et diverses simulations seront effectuées à l'aide du logiciel MATLAB pour confirmer l'efficacité et évaluer les performances de chaque technique.

Mots clés : Modulation, Multi-porteuse, OFDM, FBMC, 5G**.**

Abstract

Multi-carrier modulation techniques have been selected for the development of modern wireless communication systems such as the 5th generation, the objective of this thesis is to study different waveforms in order to achieve high quality communication with higher transmission rates. To do this, we looked at the FBMC wave which can replace OFDM. In addition, a comparison should be made between it and OFDM and various simulations will be performed using MATLAB software to confirm the effectiveness and evaluate the performance of each technique.

Keywords: Modulation, Multi-carrier, OFDM, FBMC, 5G.

Table des matières

Liste des figures.....I

Liste des tableaux.....V

Liste des acronymes.....VI

Introduction générale.....1

Chapitre I : Le principe des modulations multi porteuses.

1. Introduction 3
2. Définition de la communication sans fils….....3
3. Historique sur la communication sans fils 3
4. Le système de communication sans fils.....4
5. Caractéristiques des systèmes sans fil 5G 4
   5.1 Propriété de la cinquième génération 5
   5.2 Architecture de la 5G.....6
6. Les systèmes de transmission numériques.....6
7. La structure d'une chaine de transmission numérique 7
8. Caractéristiques du canal de transmission 9
9. Introduction aux modulations multi-porteuses 9
   9.1 Définition de modulations multi-porteuses 9
   9.2 Principe de modulations multi porteuses.....10
10. Notion d'orthogonalité 12
   10.1 Rappel mathématique 12
   10.2 L'Orthogonalité.....12
11. Technique OFDM 13
   11.1 Principe et fonctionnement.....14
   11.2 Modulation.....15
   11.3 Préfixe cyclique 17
   11.4 Démodulation.....18
   11.5 Implémentation numérique.....18
      11.5.1 Implémentation numérique de la séquence de modulation 18
      11.5.2 Implémentation numérique de la séquence de démodulation 19
   11.6 Avantages et inconvénients de l'OFDM 20
12. Conclusion.....21

Chapitre II : Les nouvelles formes d'onde.

1. Introduction 22

2. Technique FBMC 22
2.1 Modulation multi-porteuse des bancs de filtres 22
2.2 Architecture de la FBMC 23
2.3 Banc de filtre FBMC 24
2.4 Principe de la modulation 24
2.5 Principe de la démodulation 25
2.6 Avantages et inconvénients de l'FBMC 25
2.6.1 Les avantages 25
2.6.2 Les inconvénients 26
2.7 Structure du Système FBMC/OQAM 26
2.7.1 Principe de traitement OQAM 26
Bloc pré/traitement OQAM 27
Bloc Post-traitement OQAM 28
2.8 La modulation FBMC/OQAM 29
2.8.1 Principe de la modulation FBMC/OQAM 29
2.9 Comparaisons entre l'OFDM et FBMC 31
3. Technique UFMC 32
3.1 Principe de modulation UFMC 33
3.2 Schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur UFMC 35
3.2.1 Emetteur UFMC 35
3.2.2 Récepteur UFMC 35
3.3 Comparaison entre UFMC et FBMC 36
3.4 Comparaison entre UFMC et OFDM 36
4. Technique GFDM 37
4.1 Emetteur et récepteur GFDM 37
4.2 Principe et fonctionnement de l'GFDM 38
4.3 Avantages de la modulation GFDM 39
4.4 Performance du système GFDM comparée au système OFDM 40
5. Conclusion 41

Chapitre III : Simulations et Résultats des modulations multi porteuses.

1. Introduction 42
2. Taux d'erreur binaire (BER) 42
3. Réalisation de la chaine de transmission OFDM sous Simulink 42
3.1 La chaine d'émission du système OFDM 43
3.1.1 Configuration des différents blocs La chaine d'émission 44
3.2 La chaine de réception du système OFDM 49

3.2.1 Configuration des différents blocs La chaine réception 49
3.3 Résultats de la simulation OFDM avec modulation QPSK 52
3.4 Les spectres de signal après la modulation 53
3.5 Diagrammes de constellations 55
3.6 Résultat de simulation pour la performance BER 56
4. Réalisation de la chaine de transmission FBMC sous Simulink 58
4.1 Description détaillé sur le programme de la modulation FBMC 58
4.2 Les résultats d'exécution de programme FBMC 59
4.2.1 Les spectres de signal avant et après le canal AWGN 59
4.2.2 Résultats de comparateur des bits émis et des bits reçus 60
4.2.3 Résultats de simulation pour les performances BER du FBMC 60
5. Rappel théorique 61
5.1 Densité spectrale 61
5.2 Efficacité spectrale 61
6. Comparaison de OFDM avec FBMC 61
6.1 Comparaison BER vs SNR (OFDM et FBMC) 61
6.2 Comparaison de la densité spectrale 62
6.3 Comparaison de l'efficacité spectrale 63
7. Conclusion 64

Conclusion général……65

Bibliographique……IX

Annexes ...…….. XIII

Liste des figures

Figure I.1 : Les exigences techniques de la 5G 6

Figure I.2 : L'architecture de la 5G 6

Figure I.3 : Chaine de transmission numérique 7

Figure I.4 : Spectre d'un signal multi-porteuse avec la réponse du canal 10

Figure I.5 : Schéma générale d'une modulation multi-porteuse 11

Figure I.6 : Exemple d'une base orthogonale 12

Figure I.7 : Spectre en sortie du modulateur OFDM 13

Figure I.8 : Principe de l'OFDM. 14

Figure I.9 : Chaine de la transmission OFDM 15

Figure I.10 : Spectre du signal OFDM. 17

Figure I.11 : Symbole OFDM. 17

Figure I.12 : la modulation OFDM numérique 19

Figure I.13 : la démodulation OFDM numérique. 20

Figure II.1 : Architecture de la FBMC 23

Figure II.2 : Banc de filtre à 4 voies. 24

Figure II.3 : La modulation FBMC la partie d'émission 25

Figure II.4 : La modulation FBMC au niveau de réception. 25

Figure II.5 : Structure générale de FBMC/OQAM. 26

Figure II.6 : Schéma générale de pré/traitement OQAM. 27

Figure II.7 : Schéma fonctionnel du post-traitement OQAM 28

Figure II.8 : Structure générale de la technique FBMC/OQAM. 29

Figure II.9 : Partie émission. 30

Figure II.10 : Partie réception 31

Figure II.11 : Comparaison entre DSP d'OFDM et FBMC. 31

Figure II.12 : Formation du signal UFMC dans le domaine fréquentiel. 33

Figure II.13 : Système modèle d'UFMC 34

Figure II.14 : Emetteur UFMC. 35

Figure II.15 : Récepteur UFMC. 36

Figure II.16 : Schéma global d'un émetteur-récepteur GFDM. 37

Figure II.17 : Diagramme de bloc de l'émetteur GFDM. 38

Figure II.18 : Diagramme de bloc de modulateur GFDM détaillé 39

Figure II.19 : Différentes structures de blocs dans OFDM et GFDM. 40

Figure III.1: La chaine de transmission OFDM sous Simulink.. 43

Figure III.2 : La chaine d'émetteur d'un système OFDM sur simulink 43

Figure III.3 : Paramètres du bloc Random Integer Generator 44

Figure III.4 : Paramètres du bloc Integer to bit converter. 44

Figure III.5 : Paramètres du bloc Bit to integer Converter. 45

Figure III.6 : Paramètres du bloc QPSK Modulator 45

Figure III.7 : Insert les pilots. 46

Figure III.8 : Paramètres du bloc Multiport Selector……..46

Figure III.9 : Paramètres du bloc Add Cyclic Prefix……...47

Figure III.10 : Paramètres du bloc AWGN. 48

Figure III.11: Récepteur du système OFDM..... 49

Figure III.12 : Paramètres du bloc Remove Cyclic Prefix. 50

Figure III.13 : Paramètres du bloc zéro-padding Select Rows. 51

Figure III.14 : Paramètres du bloc Remove Pilots..... 51

Figure III.15 : Représentation spectral de signal émis..... 52

Figure III.16 : Représentation spectrale du signal reçu. 53

Figure III.17 : Comparaison entre le signal binaire émis (en haut) et le signal binaire reçus (en bas). 53

Figure III.18 : Signal après la modulation QPSK..... 54

Figure III.19 : Représentation spectrale du signal OFDM à l'entrée du canal(AWGN). . 54

Figure III.20 : Représentation spectrale du signal OFDM à la sortie du canal(AWGN). . 55

Figure III.21 : QPSK (constellation transmis à gauche, constellation reçus à droite)..... 56

Figure III.22 : le taux d'erreur binaire. 56

Figure III.23 : BER en fonction SNR (OFDM)..... .57

Figure III.24 : La chaine de transmission FBMC sous Simulink..... 58

Figure III.25 : Représentation spectrale du signal FBMC à l'entrée du canal(AWGN) ... 59

Figure III.26 : Représentation spectrale du signal FBMC à la sortie du canal(AWGN) .. 60

Figure III.27 : Résultats de comparateur des bits émis (en haut) et des bits reçus (en bas). 60

Figure III.28 : BER en fonction SNR pour FBMC..... 61

Figure III.29 : Comparaison d'OFDM/FBMC-SNR vs BER……..62

Figure III.30 : Densité spectrale de puissance FBMC vs OFDM. 63

Figure III.31 : Efficacité spectrale FBMC vs OFDM. 64

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Comparaison entre OFDM et FBMC 32

Tableau III.1: BER vs SNR de QPSK…… ..... ……56

Liste des ACRONYMES

1G	**1**ère **G**énération
2G	**2**ème **G**énération
3G	**3**ème **G**énération
4G	**4**ème **G**énération
5G	**5**ème **G**énération
ADSL	**A**symmetric **D**igital **S**ubscriber **L**ine
AFB	**A**nalysis **F**ilter **B**ank
AWGN	**A**dditive **W**hite **G**aussian **N**oise
BER	**B**it **E**rror **R**ate
CP	**C**yclic **P**refix
DAB	**D**igital **A**udio **B**roadcasting
DSP	**D**ensité **S**pectrale de **P**uissance
DVB-T	**D**igital **V**ideo **B**roadcasting-**T**errestrial
EQM	**E**rreur **Q**uadratique **M**oyenne
FBMC	**F**ilter **B**ank **b**ased **M**ulti-carrier
FDM	**F**requency **D**ivision **M**ultiple
FFT	**F**ast **F**ourier **T**ransform
FIR	**F**ilter **I**mpulse **R**esponse
GFDM	**G**eneralized **F**requency **D**ivision **M**ultiplexing

ICI **I**nter **C**arrier **I**nterférence

IDFT **I**nverse **D**iscret **F**ourier **T**ransform

IEEE **I**nstitute of **E**lectrical and **E**lectronic **E**ngineers

IES **I**nterférences **E**ntre **S**ymboles

IFFT **I**nverse **F**ast **F**ourier **T**ransform

IOT **I**nternet **O**f **T**hings

ISI **I**nter-**S**ymbol **I**nterference

LTE **L**ong **T**erm **E**volution

MTC **M**achine **T**ype **C**ommunication

MATLAB **M**ATrix **L**ABoratory

OFDM **O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiplexing

OOB **O**ut-**O**f-**B**and

OQAM **O**ffset **Q**uadrature **A**mplitude **M**odulation

P/S **P**arallel to **S**erial

PAPR **P**eak-to-**A**verage **P**ower **R**atio

PPN **P**oly **P**hase **N**etwork

PSK **P**hase **S**hift **K**eying

QAM **Q**uadrature **A**mplitude **M**odulation

QPSK **Q**uadrature **P**hase **S**hift **K**eying

RSB **R**apport **S**ignal **B**ruit

SFB	**S**ynthesis **F**ilter **B**ank
TEB	**T**aux **E**rreur **B**inaire
TFD	**T**ransformée **F**ourier **D**iscrète
UFMC	**U**niversel **F**ilter **M**ulti **C**arrier
Wifi	**W**ireless **F**idelity
WLAN	**W**ireless **L**ocal **A**rea **N**etwork
WMAN	**W**ireless **M**etropolitan **A**rea **N**etwork
WPAN	**W**ireless **P**ersonal **A**rea **N**etwork
WWAN	**W**ireless **W**ide **A**rea **N**etwork

Introduction Générale

Introduction général

De nos jours, dans un monde très mobile, la vitesse et la capacité des systèmes de communication sont essentielles pour fournir des méthodes de communication efficaces entre les personnes du monde entier.

Le premier système de communication numérique était basé sur la modulation à mono porteuse. De manière générale, lorsque vous souhaitez augmenter le débit binaire de la transmission, vous devez réduire la durée des symboles. Cependant, l'existence de canaux à trajets multiples introduira des interférences inter symboles (ISI), qui nécessitent une égalisation complexe lors de la réception. Par conséquent, la modulation multi-porteuse a été proposée comme solution alternative pour lutter contre l'influence des canaux multi-trajets. En effet, les données en modulation multi-porteuse sont transmises sur plusieurs fréquences porteuses, divisant ainsi le canal large bande sélectif en fréquence en plusieurs sous-canaux non sélectifs en fréquence.

La technique OFDM est la modulation multi-porteuse la plus utilisée dans la majorité des Systèmes de communications sans fil grâce à ces nombreuses propriétés tels que :

- Une utilisation efficace du spectre grâce à l'utilisation des porteuses mutuellement Orthogonales.
- Une simple implémentation numérique grâce à l'utilisation de l'algorithme de la Transformée de Fourier rapide et son inverse (IFFT/FFT).
- L'insertion du préfixe cyclique donne une grande capacité pour combattre les interférences entre symboles et entre porteuses.

Malgré ces avantages, l'OFDM souffre d'un certain nombre de limitations devant les Exigences des futures applications 5G à cause de différents inconvénients qui sont :

- L'insertion du préfixe cyclique constitue une perte en efficacité spectrale car il n'est qu'une copie de quelque symbole déjà transmis (redondance d'information).
- Des lobes latéraux importants sont générés à cause de l'utilisation du filtre rectangulaire qui devient un sinus cardinal dans le domaine fréquentiel.
- L'OFDM est beaucoup moins efficace dans un contexte de communication à grande mobilité, où l'effet Doppler introduit une forte dispersion en fréquence.

Les chercheurs sont incités pour proposer des solutions à ces limitations soit en améliorant les propriétés de cette technique soit en proposant d'autres alternatives telles que : UFMC, GFDM et FBMC.

Dans ce mémoire nous sommes intéressés par l'étude de certaines nouvelles formes d'onde pour remplacer l'OFDM afin d'améliorer l'efficacité spectrale et donc permettre des débits plus élevé.

FBMC est donc une version des modulations multi-porteuse basée sur l'utilisation de bancs de filtres très sélectifs en fréquence qui permettent une amélioration considérable dans l'efficacité spectrale et réduire le problème de fuite spectrale qu'a l'OFDM.

Le but de notre projet de fin d'étude est de mettre l'accent sur cette nouvelle technique de modulation FBMC et la comparer avec la modulation OFDM et essayer de mettre en évidence les mérites du schéma de cette nouvelle modulation candidate pour les nouveaux systèmes de télécommunication.

Le mémoire est constitué de trois chapitres comme suite :

Dans le premier chapitre nous allons décrire une présentation complète sur les principales notions relatives aux systèmes de communication sans fil ainsi que leurs différentes caractéristiques. Par la suite, Nous allons expliquer le fonctionnement d'une chaîne de transmission numérique ; enfin nous allons introduire les types de modulation.

Dans le deuxième chapitre nous voulons présenter des nouvelles formes d'ondes qui sont utilisé dans le standard 5G.

Dans le troisième chapitre nous réalisons deux chaines de transmission OFDM et FBMC avec le simulateur MATLAB. Donnant des résultats de performance et le tracé de BER pour chaque modulation. Finalement nous faisons une comparaison entre la nouvelle modulation FBMC avec OFDM.

.

Chapitre I

Le principe des modulations multi porteuse

1. Introduction

Ceux qui seront les plus satisfaits du très haut débit de la 5G seront les passionnés de jeux vidéo. La vidéo 360° et 4K pourront être visionnés plus rapidement, et la 5G permettra à ces nouvelles technologies de se développer de manière exponentielle. La 5G est la technologie de téléphonie mobile de nouvelle génération après la 4G. Contrairement à ce que beaucoup pensent, il ne remplacera pas les réseaux existants (3G, 4G), mais comme une extension et un parfait complément.

Dans les réseaux sans fil modernes qui reposent sur la modulation multi-porteuse, l'OFDM à large bande est devenu populaire dans ces réseaux en raison de son efficacité spectrale et de la capacité de l'OFDM à transmettre des données de canal radio à large bande à haut débit avec une atténuation sélective en fréquence.

Dans ce chapitre, nous parlerons de quelques communications sans fils en générale. Ainsi que de la 5G et leurs caractéristiques. Finalement, nous étudions la modulation multi-porteuse, technique OFDM leur principe et ces avantages et ces inconvénients.

2. Définition de la communication sans fils

Un réseau sans fil est un réseau informatique numérique qui utilise des ondes radio pour connecter différents postes de travail ou systèmes entre eux. Il peut être associé à un réseau de télécommunications pour réaliser une interconnexion à distance entre les nœuds. [1]

D'autre part, le système dit sans fil est un système de communication qui n'utilise pas de conducteurs électriques. Cela signifie que la communication peut être établie sans utiliser de câbles qui interconnectent physiquement les appareils. [1]

3. Historique sur la communication sans fils

Depuis les années 1700, l'histoire des télécommunications a été marquée par de nombreux sauts technologiques et des progrès étonnants ont été réalisés. Chap. (1792) a inventé le télégraphe optique, Graham Bell (1876) a inventé le télégraphe. Récemment, la connexion entre satellites a été établie. Le développement des téléphones sans fil est l'une de ces grandes avancées technologiques, qui se caractérisent par l'analogique 1G, 2G, Percée des téléphones cellulaires 3G, 4G ou Wifi.

Ils sont également utilisés dans les situations suivantes :

- Créer un réseau temporaire, ou établir rapidement (réunions, conférences)
- Il permet d'éviter des travaux de câblage à grande échelle dans des endroits difficiles voire interdits (comme Jussieu).
- Fournir la possibilité de transmettre des données dans le cas d'applications mobiles (capteurs métier, etc.). [1]

4. Le système de communication sans fils

Le système de communication sans fil est devenu Un additif indispensable dans notre vie quotidienne. Ils constituent la majorité domaines : industrie, santé, cargaison et sécurité du personnel, etc. nombreux les applications ont rendu ces systèmes et les apparences considérablement développés. La nouvelle norme de communication sans fil peut répondre aux besoins suivants et les exigences des clients (individuels et corporatifs) vitesse, couverture Réseau, transmission multimédia, etc. pour que le réseau puisse être divisé en plusieurs catégories, comme indiqué ci-dessous:

- Les réseaux personnels (WPAN : Wireless Personal Area Network).
- Les réseaux locaux (WLAN : Wireless Local Area Network).
- Les réseaux métropolitains (WMAN : Wireless Metropolitan Area Network).
- Les réseaux étendus (WWAN : Wireless Wide Area Network).
- La classification du réseau se fait en fonction de différents facteurs, principalement le domaine d'utilisation et performances. Ils déterminent l'architecture du système, technologie, en particulier la modulation, le codage, l'égalisation, etc. Dans ce cadre, une technique très utilisée est la modulation multi-porteuses OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), Cela permet de résoudre plusieurs problèmes liés à la vitesse de transmission et aux trajets multiples (canal sélectif en fréquence), qui a permis de résoudre plusieurs problèmes lies aux débits de transmission et aux multi-trajets (canaux sélectifs en fréquence). [2]

5. Caractéristiques des systèmes sans fil 5G

La technologie 5G offrira des vitesses bien supérieures à la 4G, avec un temps de retard très court et une fiabilité élevée, tout en augmentant le nombre de connexions simultanées dans chaque zone de couverture. Son objectif est de prendre en charge

jusqu'à un million d'appareils mobiles par kilomètre carré (dix fois celui de la 4G). Après son déploiement, il doit permettre des vitesses de télécommunications mobiles de plusieurs gigabits de données par seconde, soit 1 000 fois le réseau mobile utilisé en 2010 et 100 fois la vitesse 4G initiale. [3]

La 5G est la cinquième génération de technologie cellulaire. Elle est conçue pour augmenter la vitesse, réduire le retard et améliorer la flexibilité des services sans fil. La technologie 5G possède une vitesse de pointe théorique de 20 Gbit/s, tandis que la vitesse de pointe de la 4G n'est que de 1 Gbit/s. La 5G promet également une latence plus faible, ce qui peut améliorer les performances des applications professionnelles ainsi que d'autres expériences numériques (telles que les jeux en ligne, la vidéoconférence et les voitures sans conducteur). [3]

5.1 Propriété de la cinquième génération

La technologie 5G repose sur 8 exigences techniques [4]:

- Jusqu'à 10 Gbit/s de débit de données - > de 10 à 100 fois plus que les réseaux 4G et 4.5G.
- 1 milliseconde de latence.
- 1 000 fois plus de bande passante par unité de surface.
- Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface (par rapport à la 4G LTE).
- 99,999 % de disponibilité.
- 100 % de couverture.
- 90 % de réduction en utilisation d'énergie du réseau.
- Jusqu'à 10 ans de durée de vie de la batterie pour les appareils IoT à faible-consommation.

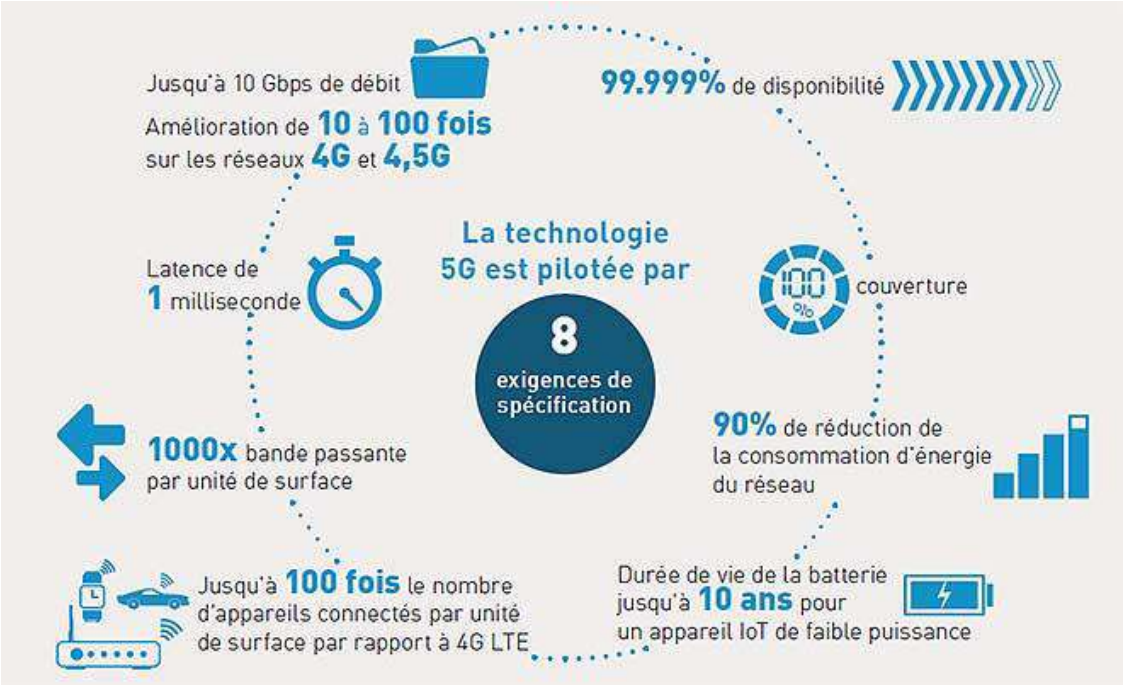


Figure I.1 : Les exigences techniques de la 5G. [4]

5.2 Architecture de la 5G

L'architecture 5G est principalement composée de trois couches horizontales, à savoir « l'activation de service », «la plate-forme d'activation » et «la radio hyper-connectée », qui représente dans la figure suivants : [5]

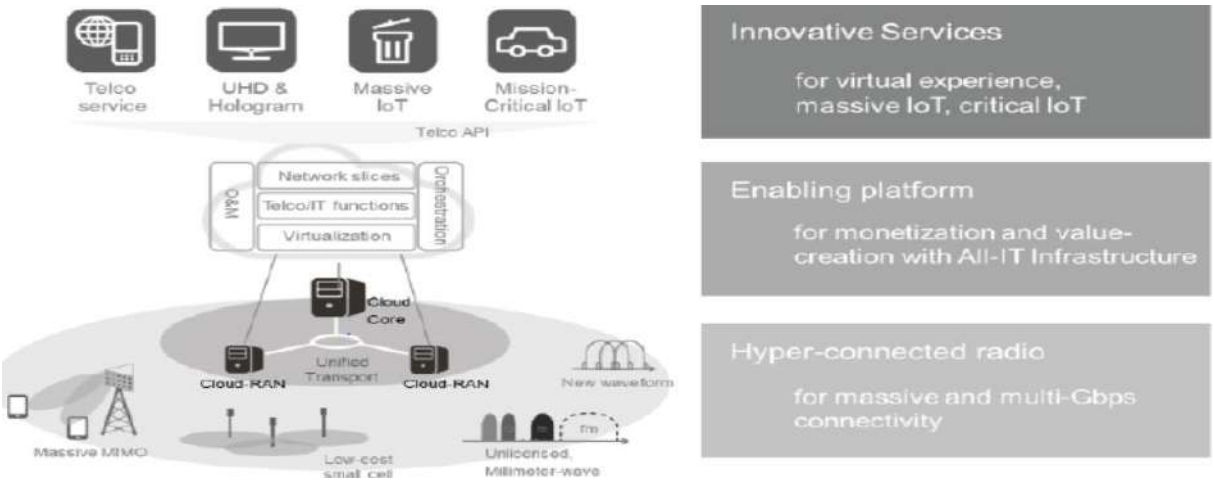


Figure I.2 : L'architecture de la 5G. [5]

6. Les systèmes de transmission numériques

Les systèmes de transmission numérique utilisent des supports physiques (tels que des câbles, des fibres optiques) et se propagent même sur des canaux radio pour transférer

des informations entre la source et le récepteur. Le signal transmis peut provenir directement d'une source numérique dans le réseau de données, ou d'une source analogique (voix, image, etc.), mais il peut être converti en une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer le signal de la source au récepteur de la manière la plus fiable possible. [6]

La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires. Le codeur englobe en général deux fonctions fondamentalement différentes. La première, appelée codage en ligne, associe un support physique adéquat aux éléments abstraits émis par la source. La seconde, appelée codage correcteur d'erreurs, consiste à introduire de la redondance dans le signal émis en vue de le protéger contre le bruit et les perturbateurs présents sur le canal de transmission. La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis. Enfin, du côté récepteur, les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur. [6]

7. La structure d'une chaine de transmission numérique

Le schéma fonctionnel du système de transmission numérique est illustré à la Figure I.3 où l'on se limite aux fonctions de base. [7]

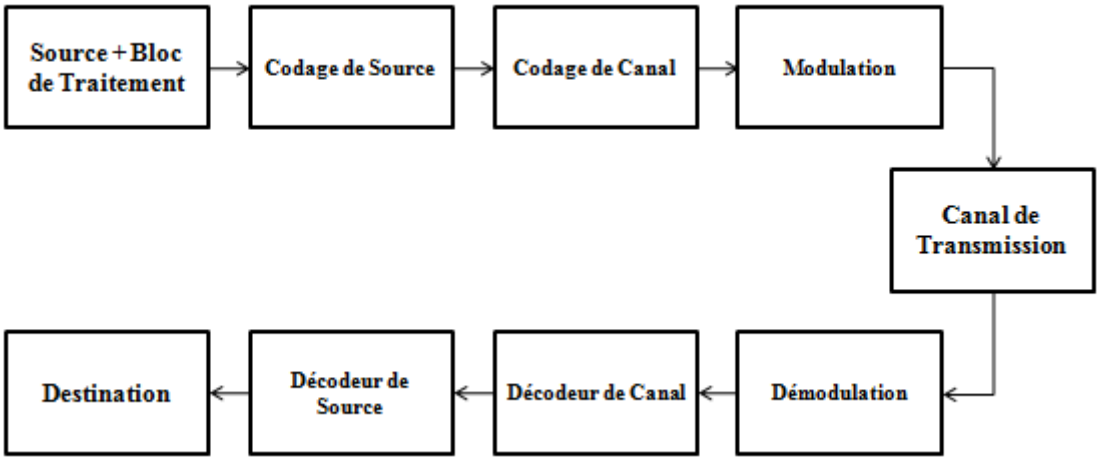


Figure I.3 : Chaine de transmission numérique. [7]

- **L'émetteur :** Il est conçu pour adapter les informations de la source avant leur transmission via le canal de propagation. En fait, le récepteur effectue des opérations à partir du signal reçu pour récupérer les informations de la source. [8]

- **Codage de source :** La séquence envoyée par la source doit être la plus courte Il est possible d'augmenter le débit de transmission nécessaire et d'optimiser l'utilisation des ressources du système. Le but du codeur source est de compresser les données en éliminant les bits insignifiants. Principe de codage La source est publiée par Shannon. [9]
- **Codage de canal :** Lors du passage dans le canal de transmission, le signal est Souffrez de toutes sortes d'interférences et introduisez des erreurs de réception. Afin d'augmenter la fiabilité de la transmission, le codage de canal introduit une redondance dans la séquence d'informations. Le récepteur connaît les règles de codage utilisées, il peut donc détecter et corriger les données binaires erronées. [9]
- **La modulation numérique :** La séquence d'informations binaires passe par le modulateur Numérique, en donnant au signal une enveloppe physique comme interface avec le canal de communication, chaque élément ou groupe d'éléments binaires est associé à la forme d'onde selon la loi d'accord, puis l'ensemble du signal forme un signal et un groupe de bits qui peut être envoyée dans le canal de la bande de base Chaque forme d'onde associée est appelée un symbole. [10]
- **Canal de transmission :** est un support physique utilisé pour transmettre le signal de l'émetteur au récepteur, et pendant le processus de transmission, l'effet de bruit est considéré comme une interférence aléatoire de l'extérieur et de l'intérieur du récepteur. [7]
- **La démodulation numérique :** Utilisée pour récupérer les informations envoyées par l'expéditeur. C'est la fonction de base du récepteur. Son emplacement dépend évidemment de la modulation utilisée. [7]
- **Décodage de canal :** Le décodage de canal consiste d'abord à détecter s'il y a des erreurs dans les informations, puis à les corriger. [7]
- **Décodage de source :** Le décodage de source consiste à reconstruire les informations d'origine de la séquence de remplacement en appliquant des algorithmes de décodage de source « par exemple décompression». [7]
- **Le récepteur :** Son but est de reconstruire autant que possible le message émis à partir du signal reçu. Il comprend un circuit d'amplification de changement de fréquence de démodulation et d'échantillonnage. Enfin, un dispositif d'aide à la décision : reconnaître la valeur du symbole binaire transmis. [11]

8. Caractéristiques du canal de transmission

L'évaluation du système de transmission est déterminée par deux caractéristiques : La qualité de transmission et la complexité de calcul des opérations de modulation/démodulation. Les grandeurs permettant de quantifier la qualité de la transmission sont :

- **Le taux d'erreur binaire (TEB)** : permet de mesurer la fréquence à laquelle les erreurs se produisent, il correspond au rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total des bits émis. [7]
- **Erreur quadratique moyenne (EQM)** : détermine l'écart moyen entre les symboles émis et les symboles reçus. [7]
- **L'efficacité spectrale** : mesure le débit binaire est par unité d'équation de temps et de fréquence pour une transmission de q bits sur une durée et une largeur de bande B allouée à la transmission. Le débit binaire est donné par le rapport q/T_s et l'efficacité spectrale par le rapport q/BT_s. [7]
- **Le rapport signal à bruit (RSB)** : est généralement adopté en transmission numérique comme paramètre d'entrée du récepteur pour lequel on va évaluer la qualité du message numérique restitué, il permet ainsi de qualifier la sensibilité du récepteur aux perturbations subies par le signal lors du passage dans le canal. Le RSB est déterminé par le rapport E_b/N_0avec N_0 la densité spectrale de puissance du bruit blanc à l'entrée du récepteur et E_b l'énergie moyenne par bit du signal modulé. [12]

9. Introduction aux modulations multi-porteuses

9.1 Définition de modulations multi-porteuses

Les techniques qu'on appelle multi porteuses consistent à transmettre des données numériques en les modulant sur un grand nombre de porteuses en même temps. Ce sont des techniques de multiplexage en fréquence. L'intérêt actuel réside dans l'amélioration apportée pour augmenter l'efficacité spectrale en orthogonalisant les porteuses ce qui permet d'implémenter la modulation et la démodulation à l'aide de circuits performants de transformée de Fourier rapide. Le multiplexage en fréquence est bénéfique pour les transmissions dans des canaux sélectifs en fréquence qui comportent des trajets

multiples. C'est pourquoi on trouve cette technique dans les normes de diffusion du son numérique dans des mobiles DAB de télévision numérique terrestre, DVB-T de communications numériques hauts débits, MTC, ADSL. Suivant les applications, cette technique se nomme OFDM. [7]

9.2 Principe de modulations multi porteuses

Dans le cas d'un canal à trajet multiples les techniques de modulation classique sont sensibles aux IES (interférences entre symboles). Pour compenser cet effet négatif, des processus d'égalisation sont utilisée. Cependant leur mise en place s'est avérée d'une grande complexité surtout lorsque le canal varie beaucoup dans le temps ou suivant la fréquence du signal. Les techniques de modulations multi porteuses sont donc apparues pour remédier à ce problème en éliminant les IES en simplifiant l'égalisation. L'information est alors répartie sur un grand nombre de sous porteuses. Ainsi dans un canal de transmission avec des chemins multiples ou certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de chemins, le système sera tout de même capable récupérer l'information perdue sur d'autre fréquences porteuses qui n'auront pas été affectées. [13]

La modulation multi porteuses consiste à divisée la bande de fréquence Δf à N sous Bandes centrées sur des fréquences dites sous-porteuses (voir Figure I.4), chacune modulée par un symbole élémentaire transmis en parallèle, les sous bands de fréquence seront plus étroites et plus petites queB_c. [14]

Dans le domaine temporel, ceci est équivalent à augmenter la durée du symbole $T_s >= \tau_R$ Les interférences entre symboles sont ainsi réduites. [14]

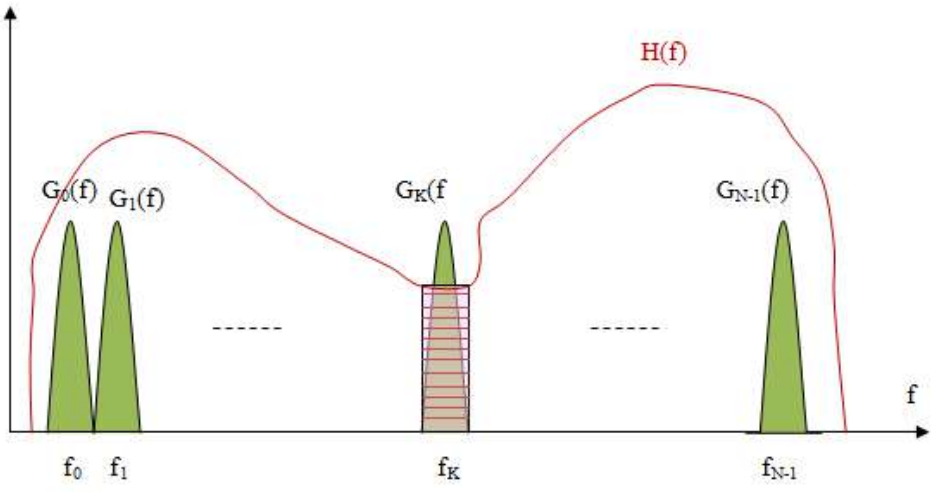


Figure I.4 : Spectre d'un signal multi-porteuse avec la réponse du canal. [15]

Le schéma général d'une modulation multi-porteuse est montré dans la Figure I.5 Les symboles élémentaires sont regroupés par groupes de N et sont transmis en parallèle via les N sous-porteuses$f_0, f_1, \ldots, f_{N-1}$. Le bon choix des filtres d'émission g_T(t)et de réception g_R *(t)*et de l'espace entre les sous-porteuses joue un rôle important dans la restitution des signaux à la réception. Ce choix varie selon la technique multi-porteuses utilisée et influence sur l'efficacité spectrale et sur le niveau des interférences entre porteuses (Inter Carrier Interference ou ICI). [14]

En effet, il y a des modulations qui permettent un chevauchement entre les différents sous-canaux, ce qui augmente leur efficacité spectrale par rapport aux techniques qui exigent une bande de garde pour pouvoir récupérer le signal transmis Correctement. [14]

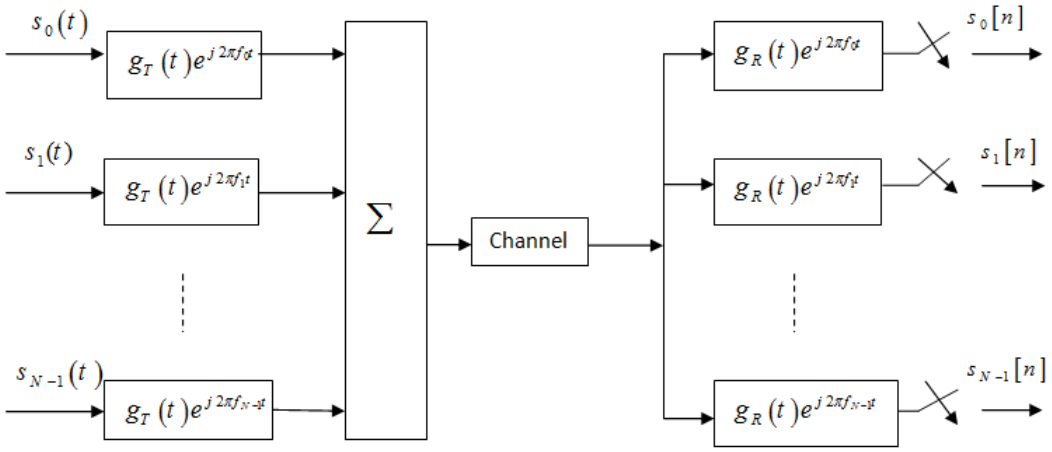


Figure I.5 : Schéma générale d'une modulation multi-porteuse. [15]

La technologie multi-porteuse qui permet le chevauchement des sous-canaux utilise le concept de porteuses orthogonales pour rendre leur séparation possible. Selon le type de filtre de transmission utilisé, ces porteuses sont plus ou moins sensibles aux interférences. Par conséquent, un filtre bien positionné en fréquence réduira probablement l'ICI, mais rendra la mise en œuvre plus compliquée. Par conséquent, il est souhaitable de faire un compromis entre le choix d'un "bon" filtre d'émission et la réduction de la complexité du système. [15]

10. Notion d'orthogonalité

10.1 Rappel mathématique

On définit l'orthogonalité de deux fonctions f (t) et g (t) dans l'intervalle $[a\,,b]$ Donné par les expressions mathématiques suivantes:

$$\int_a^b f(t).g(t)dt = 0 \qquad \text{(I.1)}$$

Cela signifie que ces deux fonctions sont disjointes sur le segment $[a, b]$. Pour obtenir une base orthogonale à N dimension, il suffit de trouver N fonctions orthogonales deux à deux comme le montre la figure I.6, Un ensemble de N fenêtres rectangulaires régulièrement espacées sur l'axe des temps constitue une base orthogonale. [14]

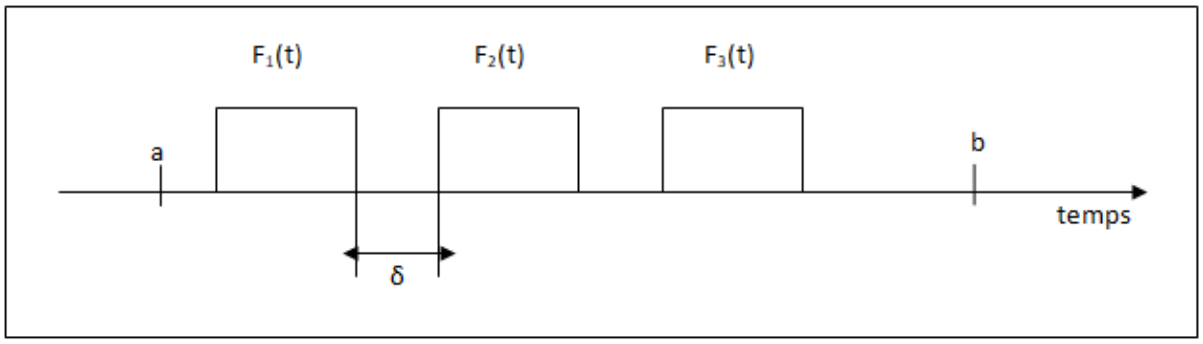


Figure I.6 **:** Exemple d'une base orthogonale. [16]

Afin de transmettre plusieurs signaux d'information dans un seul canal et de les détecter sans interférence, l'orthogonalité est l'attribut de base entre ces signaux. [16]

10.2 L'Orthogonalité

La technologie de modulation OFDM permet un fort chevauchement spectral entre les sous-signaux transporteur. Cependant, les opérateurs doivent respecter des contraintes d'orthogonalité Domaine temporel et domaine fréquentiel pour un fonctionnement correct. Si l'intervalle entre deux fréquences adjacentes fn=1/Tn Figure I.7, l'orthogonalité apparaîtra. En effet, chaque symbole est modulé par la porteuse pendant la fenêtre de durée rectangulaire La base de temps sinus représente le spectre sonore. [14]

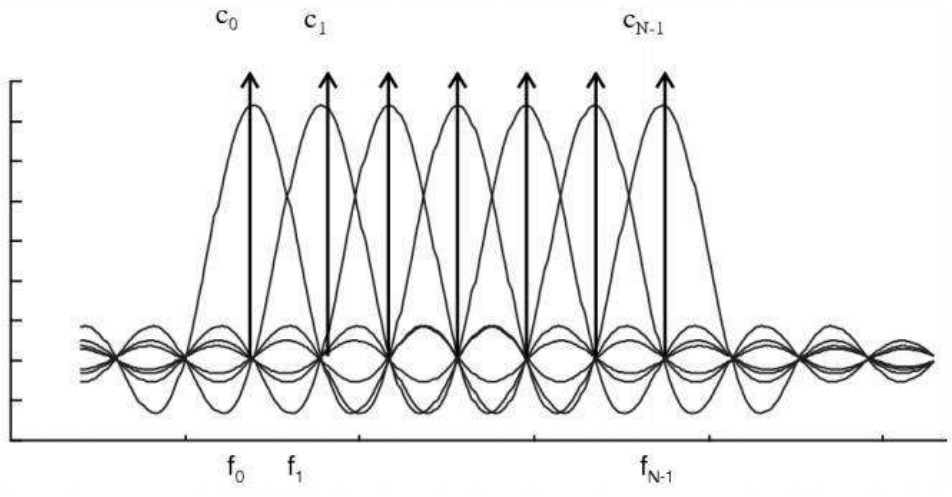


Figure I.7 : Spectre en sortie du modulateur OFDM. [17]

Par conséquent, il n'y a pas d'interférence avec les autres sous-porteuses, c'est ce qui permet recouvrement de spectre des différentes porteuses et une occupation optimale du spectre. [14]

Afin de pouvoir considérer un canal plat, En doit sélectionner le nombre de sous-porteuses N à l'extrémité qui remplit les deux conditions d'origine Ts >> Tm,

Ts << 1 / Bd. [7]

La solution proposée par l'OFDM est très simple et efficace, et peut assurer une bonne séparation entre les sous-porteuses lors de la réception. [14]

11. Technique OFDM

La transmission multi porteuse OFDM est une technique de modulation utilisée dans des systèmes audiovisuels. Cette modulation a été très sollicitée ses dernières années et elle a été proposée dans plusieurs normes de télécommunications, à titre d'exemple, citons les réseaux locaux (WLAN) IEEE 802.11 et les réseaux métropolitains (WMAN), soit l'IEEE 802.16 et le LTE (Long Term Evolution). [14] sans oublier la télévision numérique. Elle consiste à transmettre les données en parallèle sur un très grand nombre de sous-porteuses. Une telle transmission se fait simplement à partir de transformées de Fourier. [18]

Le multiplexag par répartition orthogonale de la fréquence ou OFDM est une technique de modulation multi-porteuse à base de Transformée de Fourier rapide (FFT ou

Faste Fourier Transforme). C'est une combinaison de modulation et de multiplexage fréquentielle. [19]

11.1 Principe et fonctionnement

Le principe de l'OFDM est de transmettre les informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles. Ainsi, le spectre du signal présente une occupation optimale de la bande allouée. Comme le montre la figure I.8, l'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes du temps et des fréquences. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée. [19]

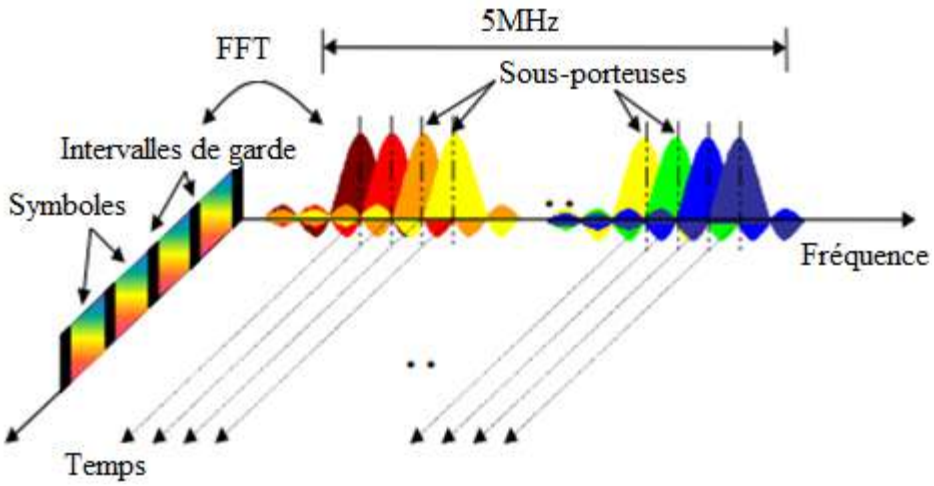


Figure I.8 : Principe de l'OFDM. [19]

La seule méthode simple et peu coûteuse pour réaliser une modulation multi-porteuse consiste à utiliser la FFT et son inverse l'IFFT (Inverse FFT). La figure I.9 représente un simple système OFDM. [19]

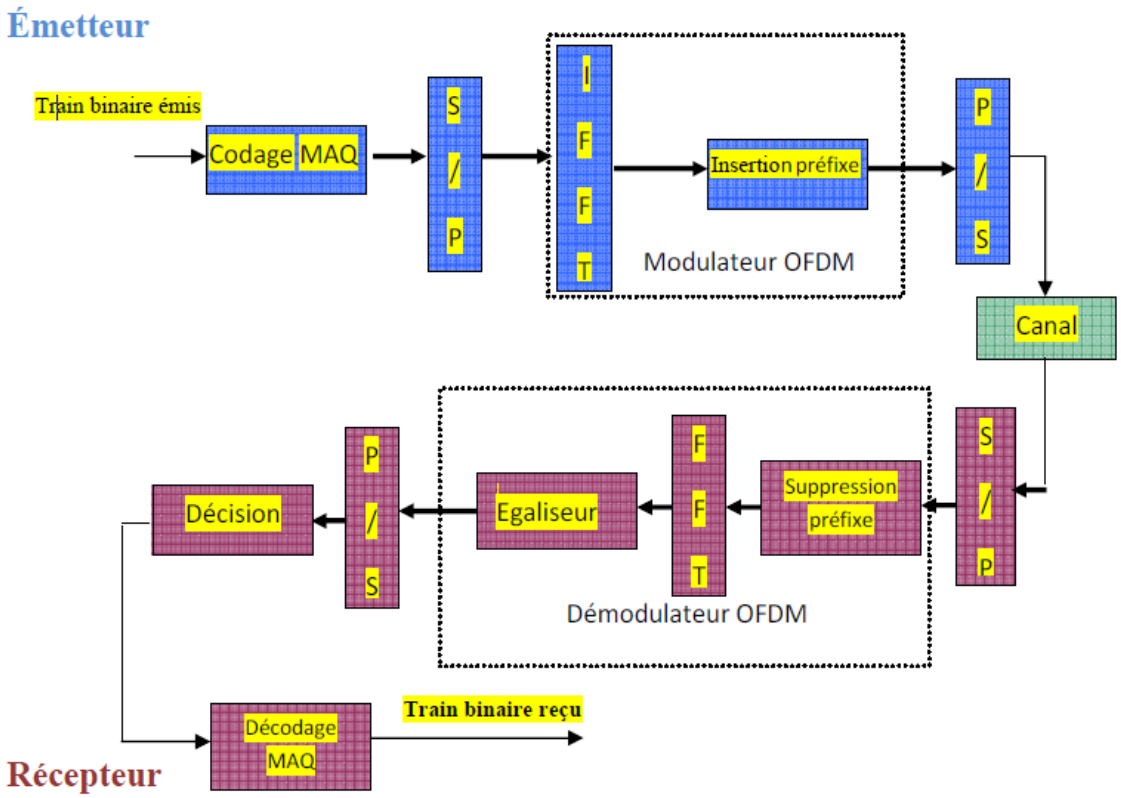


Figure I.9 : Chaine de la transmission OFDM. [21]

Après la conversion série – parallèle, les symboles sont formés selon la modulation utilisée. Puis, l'IFFT est opérée sur les symboles. Une mise en série précède l'insertion d'une extension cyclique du symbole. S'en suivent une conversion numérique analogique, un filtrage et une transposition de fréquence avant le passage par le canal. L'opération inverse est effectuée à la réception. L'égalisation compense les effets du canal. [19]

11.2 Modulation

L'OFDM découpe la bande du système en un grand nombre de porteuses individuelles appelées sous-porteuses. Pour répartir les données à transmettre sur les N sous-porteuses, on groupe les symboles x_k par paquets de N où $\{x_k\}$ est un ensemble de nombres complexes prenant ses valeurs dans un alphabet fini correspondant à une modulation numérique donnée, telles que 16-QAM, QPSK, et … etc. Chaque flux de données en bande de base est associé à une sous porteuse. [19]

Le signal modulé sur la $K^{'ieme}$ sous-porteuse s'écrit sous la forme complexe :

$$s_k(t) = x_k e^{j2\pi f_k t} \quad \text{(I.2)}$$

Où $\{f_k\}$est l'ensemble des fréquences porteuses considérées assurant la condition d'orthogonalité tel que :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T} = f_0 + k\Delta f, 0 \leq k \leq N-1 \quad \text{(I.3)}$$

Sachant quef_0 c'est la fréquence la plus basse des sous-porteuses, T représente la durée allouée à un symbole OFDM, N le nombre de sous-porteuses, et Δf est l'espacement entre les sous porteuses adjacentes. [19]

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

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j2\pi f_k t}, 0 < t < T \quad \text{(I.4)}$$

En discrétisant le signal défini par l'équation et en le ramenant en bande de base pour l'étude numérique, on obtient :

$$s_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \, e^{j2\pi k \frac{n}{N}} \quad \text{(I.5)}$$

Les $s_n$peuvent être obtenus par une transformée de Fourier inverse discrète des symbolesx_k. En choisissant le nombre de sous-porteuses N comme une puissance de 2, le calcul de l'IDFT (Inverse Discret Fourier Transform) se simplifie et peut se calculer par une simple IFFT. La complexité calculatoire de ces opérations est de l'ordre de $N \log_2(N)$ par symbole. [19]

Le spectre du signal OFDM est formé des x_k placés aux fréquences f_k, autour de ces données. Le spectre s'élargit suivant un sinus cardinal. La figure I.10 présente les spectres d'un signal OFDM. [19]

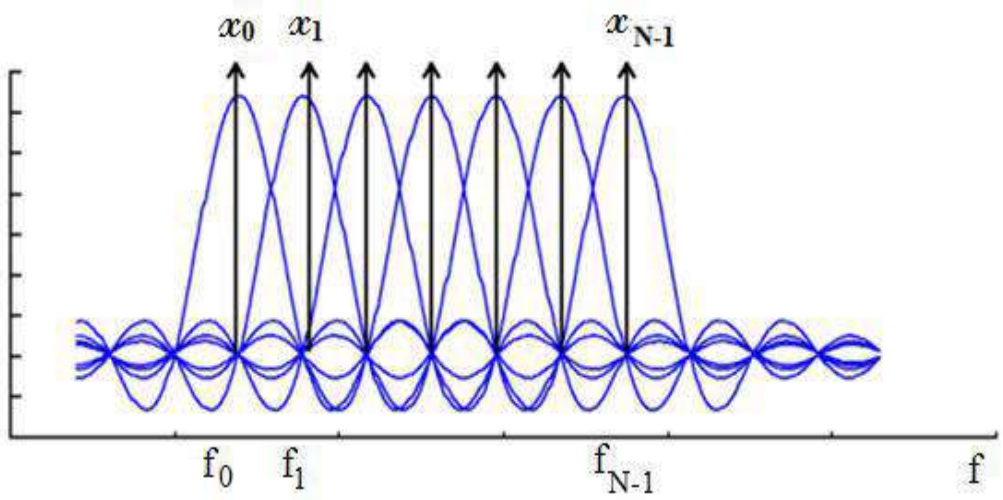


Figure I.10: Spectre du signal OFDM. [19]

11.3 Préfixe cyclique

Afin d'effectuer la transmission, au lieu de transmettre les données en série comme le font les systèmes mono-porteuses, les schémas OFDM transmettent les données par bloc en introduisant aux informations utiles de la redondance, appelée intervalle de garde. Pour éviter qu'ils s'interfèrent, on laisse entre deux symboles OFDM consécutifs un intervalle de garde, qui absorbe les répliques du signal dues aux trajets multiples. En réalité, au lieu d'un intervalle de garde vide, on recopie la fin du symbole OFDM à son début, formant ainsi ce qu'on appelle préfixe cyclique (CP). Le CP assure l'orthogonalité entre les sous-porteuses dans le domaine fréquentiel, en assurant que le signal reçu sur une sous-porteuse contient uniquement une contribution du symbole émis sur cette même sous-porteuse, sans contribution des symboles émis sur les sous-porteuses adjacentes. Dans le domaine temporel, le CP donne les moyens au récepteur de récupérer l'intégralité du signal utile porté par chaque trajet du canal. A la réception, la FFT n'est appliquée que si le CP est supprimé, puisqu'il ne porte pas d'information additionnelle par rapport à la partie utile du symbole OFDM. [19]

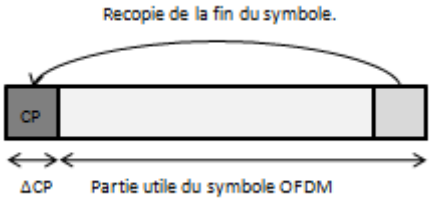


Figure I.11 : Symbole OFDM. [19]

Dans ce cas, on peut en déduire que la durée de chaque symbole devient $T+T_{CP.}$ [19]

11.4 Démodulation

Afin de simplifier les équations, nous présentons la réception d'un signal OFDM à travers un canal sans bruit. Après filtrage et transposition en bande de base, le signal reçu s'écrit comme suit :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k H_k(t) e^{2j\pi\left(f_0+\frac{k}{T}\right)t} \quad \text{(I.6)}$$

Où $H_k(t)$ est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence f_k et à l'instant *t*. Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période *T*. [19]

On définit le signal discrétisé $y_n$reçu en entrée du démodulateur sous la forme :

$$y_n = y\left(\frac{nT}{N}\right) TFD(h_k x_k) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k x_k e^{2j\pi k\frac{n}{N}} \quad \text{(I.7)}$$

Où $h_k$est la réponse complexe du canal à la fréquence f_k. [19]

Le symbole émis peut donc être récupéré par une TFD (Transformée de Fourier Discrète). Le nombre de sous-porteuses ayant été choisi comme une puissance de 2, ce calcul est réalisé par la FFT. Le traitement effectué en sortie de la transformation de Fourier consiste à multiplier chaque échantillon par un coefficient complexe égal à l'inverse de la réponse du canal pour chaque sous porteuse f_k. [19]

11.5 Implémentation numérique

Dans les communications à haut débit, les débits sont limités par des contraintes physiques le bruit dû aux imperfections des systèmes et la nature physique des composants affectent la transmission du signal émis. On réduit dans ce cas les erreurs de transmission en numérisant les informations. De plus l'implémentation numérique offre aussi l'opportunité d'ajouter des codes correcteurs d'erreurs afin de protéger le signal des perturbations engendrées par le canal de transmission. [7]

11.5.1 Implémentation numérique de la séquence de modulation [20]

L'analyse algébrique indique que le signal de sortie s(t) est sous la forme :

$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k \, e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}} \quad \text{(I.8)}$$

En discrétisant ce signal et en le ramenant en bande de base pour l'étude numérique on obtient une sortie s(n) sous la forme :

$$s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{k_n}{N}} \quad \text{(I.9)}$$

Les s(n) sont donc obtenus par une transformée de Fourier inverse discrète des c(k). En choisissant le nombre de porteuses N, le calcul de la transformée de Fourier inverse se simple et peut se calculer par une simple IFFT menant au schéma numérique suivant :

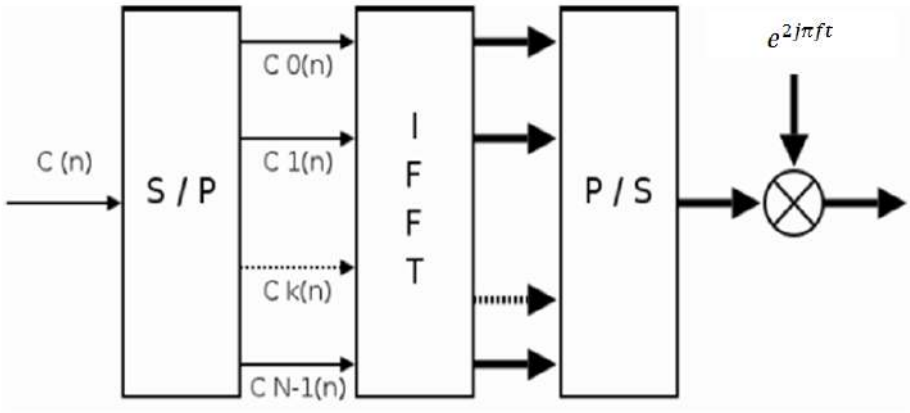


Figure I.12 : la modulation OFDM numérique. [20]

11.5.2 Implémentation numérique de la séquence de démodulation

L'analyse théorique définit le signal discrétisé reçu au niveau du démodulateur sous la forme :

$$z(t_n) = z\left(\frac{nT_s}{N}\right) = z_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{2j\pi \frac{k_n}{N}} \quad \text{(I.10)}$$

Z_n est la transformée de Fourier discrète inverse de $\boldsymbol{c_k H_K}$, la démodulation consiste donc à effectuer une transformée de Fourier directe discrète. Le nombre de porteuses ayant été choisi tel que N = 2n, on peut réaliser ce calcul à l'aide d'une FFT. On obtient alors le schéma de principe suivant :

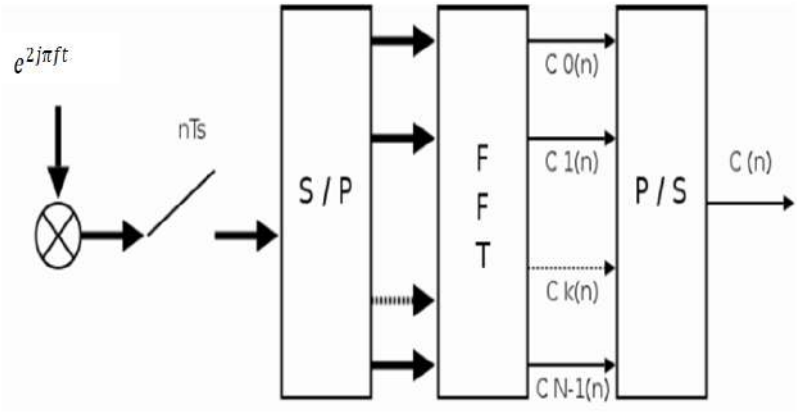


Figure I.13: la démodulation OFDM numérique. [20]

11.6 Avantages et inconvénients de l'OFDM [22]

Les avantages de l'OFDM sont nombreux **:**

- Une utilisation efficace des ressources fréquentielles en comparaison avec les solutions classiques de multiplexage fréquentiel (FDM). Ceci est dû au fait que dans l'OFDM, les canaux se chevauchent tout en gardant une orthogonalité parfaite.
- Une égalisation numérique moins complexe grâce à l'utilisation d'un grand nombre de sous-porteuses, et optimale grâce à l'utilisation de l'intervalle de garde (au prix d'une diminution du débit).
- Les techniques multi-porteuses sont robustes au bruit impulsif puisque chaque porteuse est affectée d'un bruit indépendant des autres porteuses. Contrairement aux modulations mono porteuses ou le bruit peut affecter un certain nombre de symbole transmis, par conséquent, la perte d'un symbole dû à un bruit important n'affectent pas les autres symboles.
- Les techniques OFDM ont également une très grande flexibilité dans l'allocation de bit/débit dans des contextes multiutilisateurs. En effet, en fonction de la valeur du gain instantané du canal, chaque porteuse peut être codée indépendamment des autres porteuses. Il est alors possible d'implémenter la méthode de 'water pouring' lorsque le canal est connu à l'émission.
- Une simple implémentation numérique à l'émission et à la réception grâce à l'utilisation de la transformée de Fourier et son inverse.

- La robustesse contre l'effet multi-trajet grâce à l'utilisation du préfixe cyclique.

La modulation OFDM n'a pas que des avantages, mais elle a aussi des inconvénients :

- L'OFDM conventionnelle, utilise une forme d'onde rectangulaire parfaitement localisée en temps mais mal localisée en fréquence. Elle n'a pas été adoptée dans les communications radio mobiles vue sa sensibilité à la sélectivité temporelle (variations très rapides en temps) du canal de propagation, entraînée par le mouvement des stations mobiles. Le désir actuel d'utiliser cette technique dans les systèmes radio mobiles de 4ème génération (4G) a motivé les chercheurs à proposer de nouvelles formes d'onde bien localisées à la fois en temps et en fréquence.
- L'intervalle de garde induit une perte d'efficacité spectrale et une perte en débit de transmission.
- L'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de synchronisation. Les erreurs de synchronisation induisent un déphasage sur les symboles reçus.
- Malgré ses nombreux avantages, la performance de l'OFDM est beaucoup moins satisfaisante dans un scénario de communication à grande mobilité, où l'effet Doppler joue un rôle important. Dans ce cas, les techniques traditionnelles, qui sont utilisées avec succès pour l'estimation de canal ou l'égalisation dans un environnement statique, fonctionneront de manière très dégradée.

12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné la définition générale des systèmes de communications sans fils, en passant par un petit historique , une brève description du canal de transmission , pour finir, nous avons parlés sur le principe de la modulation OFDM et leur fonctionnement a été expliqué (la modulation et la démodulation) ainsi l'orthogonalité entre les sous-porteuses et l'intervalle de garde, les avantages et les inconvénients. On fera dans le chapitre suivant, une généralisation sur les nouvelles formes d'ondes de modulation multi-porteuse FBMC et FBMC/OQAM et UFMC, GFDM.

Chapitre II

Les nouvelles formes d’ondes

1. Introduction

D'après ce que nous avons vu au chapitre I, OFDM possède plusieurs atouts qui font son succès et sa notoriété dans le standard 4G. Cependant, il présente des inconvénients majeurs, tels que l'insertion d'un intervalle de garde, et un niveau de lobe secondaire très élevé provoquera une fuite de puissance entre différentes sous-porteuses. La technologie OFDM sera utilisée moins fréquemment pour prendre en charge des technologies alternatives multi-porteuses adaptées aux futures normes 5G. Dans ce chapitre, nous discuterons de ces nouvelles formes d'onde candidates FBMC FBMC/OQAM, UFMC, GFDM dans de nouvelles applications pour remplacer l'OFDM.

2. Technique FBMC

C'est une technique de modulation permettant de surmonter les interférences ISI et ICI. L'interférence entre symboles est un défi majeur pour les systèmes de réseau. FBMC (Filter Bank MultiCarrier) est une modification du multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM). En OFDM, les préfixes cycliques sont utilisés pour la robustesse du signal, mais l'utilisation du préfixe cyclique par multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence présente certains inconvénients. Pour surmonter les inconvénients de l'OFDM, on utilise le FBMC. Il fournit une bande passante efficace. Pour gérer cette situation, des techniques de modulation sont utilisées et d'autres méthodes nouvelles seront utilisées à l'avenir. L'un d'eux est FBMC, il fournit une grande efficacité plutôt que OFDM. [23]

2.1 Modulation multi-porteuse des bancs de filtres

Le FBMC fait la modulation de chaque sous-porteuse dans un système multi-porteur.

Le filtre prototype utilisé est celui d'une porteuse à fréquence nulle, qui est à la base des autres filtres de sous-porteuse. Les filtres sont caractérisés par le facteur de chevauchement, K qui est le nombre de symboles multi-porteuses qui se chevauchent dans le domaine temporel. L'équation de choit de L'ordre du filtre prototype est la suivante $2*K-1$ où $K=2,3$, ou 4, sélectionné selon le projet PHYDYAS. [24]

L'implémentation actuelle du FBMC utilise l'étalement de fréquence. Il utilise un IFFT de longueur $N*K$ avec des symboles superposés avec un retard de $N/2$, où N est le nombre de sous-porteuses. Ce choix de conception facilite l'analyse de la FBMC et la comparaison avec d'autres méthodes de modulation. [25]

Pour atteindre la pleine capacité, on mène un traitement de modulation d'amplitude en quadrature décalée (OQAM). Les parties réelle et imaginaire d'un symbole de donnée complexe ne sont pas transmises simultanément, car la partie imaginaire est retardée de moitié de la durée du symbole. [14]

2.2 Architecture de la FBMC

La FBMC est une technique multi-porteuse qui utilise un réseau de filtres à l'émission et à la réception, des filtres de synthèse et d'analyse spécifiques, ainsi qu'une transformée de Fourier inverse rapide (IFFT) en tant que modulateur et transformée de Fourier rapide (FFT) en tant que démodulateur. Un émetteur-récepteur générique à porteuse multiples avec des bancs de filtre est représenté sur la figure II.1 suivant :

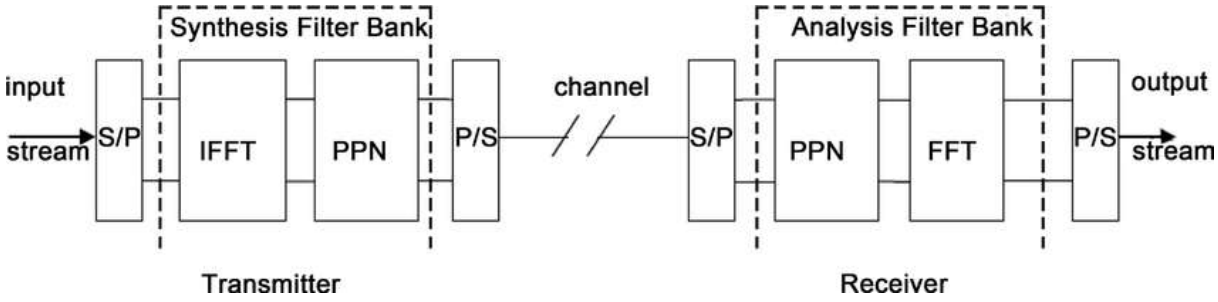


Figure II.1 : Architecture de la FBMC. [5]

L'entrée du système est donnée par :

$$s_i(t) = \sum_n^i s_i[n]\delta(t - nT) \qquad \text{(II. 1)}$$

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

L'espacement temporel entre les symboles est noté T. [1]

Le signal de transmission total peut être considéré comme suit :

$$x(t) = \sum_n \sum_i^{N-1} s_i[n] p T_X(t - nT) e^{j2\pi(t-nT)f_i} \qquad \text{(II. 2)}$$

Le signal x(t) désigne un groupe de sous-porteuses limitées dans le temps, composées de valeur complexe et leur amplitude échelonnée par si [n]. Par conséquent, en supposant des conditions de canal idéales, le signal reçu y(t) serait identique au signal transmis x(t). [1]

2.3 Banc de filtre FBMC

Les bancs de filtres sont des outils du traitement de signal qui permet d'obtenir une représentation particulière de l'information contenue dans un signal ; la représentation donnée par les bancs de filtres reste du domaine temporel. L'idée de base est d'obtenir une série de signaux représentatifs d'une bande de fréquences du signal original,figure II.2. Le signal est filtré par un ensemble de M filtres passe-bandes à supports disjoints, ce qui permet d'obtenir M signaux correspondant chacun à une partie du spectre du signal original. [1]

Dans une telle représentation à un échantillon de l'entrée, correspondent 4 échantillons en sortie. Il y a redondance de l'information car, chaque X_n^k n'occupe qu'une partie du spectre. [1]

Les X_n^k sont des signaux à bande étroite, donc pouvoir les échantillonner à une fréquence plus basse que la fréquence d'échantillonnage initiale sans perte d'information. [26]

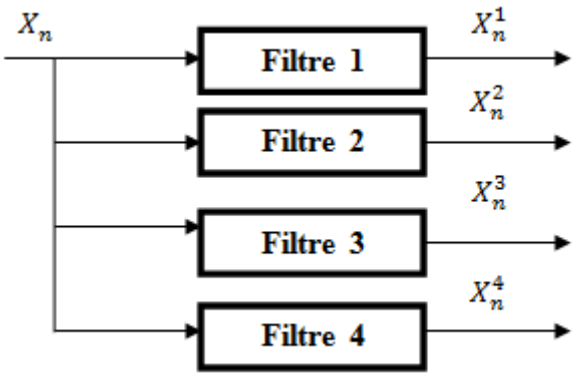


Figure II.2: Banc de filtre à 4 voies. [1]

X_n^K **:** Est le signal FBMC avec :

k : le nombre de sous porteuses.

n : est le flux en temps.

2.4 Principe de la modulation

La figure II.3 représente la partie d'émission FBMC d'une manière générale après la modulation de l'entrée utilisée le signal passe par le bloc d'IFFT pour convertir le signal du domaine fréquentiel au domaine temporel ensuite le signal sortant passe par le bloc du

filtre polyphasé et enfin les signaux résultants seront regroupés parallèlement au sérial et envoyé sur notre canal. [7]

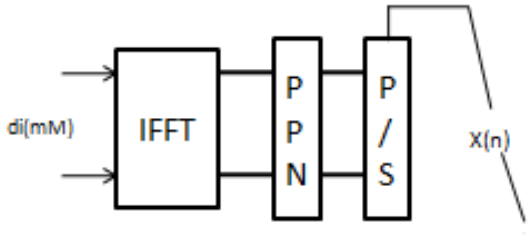


Figure II.3: La modulation FBMC la partie d'émission. [7]

2.5 Principe de la démodulation

La figure II.4 représente la partie de réception de la modulation FBMC, en suivant l'opération inverse de la partie d'émission. A la réception le signal reçu se devise du sérial au parallèle et passe par le filtre polyphasé ensuite par le bloc de la transformé de fourrier rapide FFT enfin notre signal est prêt à être démoduler par la modulation de la sortie et récupérant notre information par la suite :

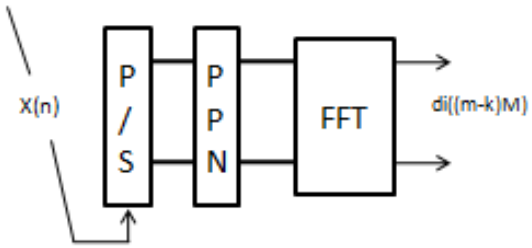


Figure II.4: La modulation FBMC au niveau de réception. [7]

2.6 Avantages et inconvénients de l'FBMC [27]

2.6.1 Les avantages

- Largeur de bande plus élevée par rapport à d'autres l'orthogonale.
- Aucun intervalle de garde et aucun préfixe cyclique ne sont nécessaires. De plus, aucune puissance de traitement supplémentaire n'est nécessaire pour gérer les intervalles de garde et des préfixes cycliques.
- Grâce à une conception de filtre bien localisée, des fuites spectrales plus basses peuvent être assurées.

- Dans le cas de FBMC, la performance peut être facilement améliorée par l'intégration de certains des mécanismes compatibles de traitement des signaux de soutien comme les schémas de diversité et les schémas de codage.
- Dans la FBMC, la séparation des signaux se fait par filtrage. Il n'y a pas un tel besoin critique de synchronisation parfaite entre utilisateurs (une sous-porteuse vide est proposée comme bande de garde entre deux utilisateurs asynchrones).
- La modulation FBMC, est un meilleur choix pour remplir les trous du spectre.

2.6.2 Les inconvénients

- Auto-interférence générée pendant les modes de fonctionnement asynchrones et/ ou dans des conditions de canal multi trajets en termes d'ICI, ISI et ICSI.
- Une complexité excessive et parfois même une incompatibilité avec les techniques de traitement du récepteur lorsque l'on essaie de trouver des solutions à la distorsion électrique, aux interférences multi-trajet.

2.7 Structure du Système FBMC/OQAM [28]

L'idée principale de la technique FBMC/OQAM est de remplacé la modulation QAM habituelle par la modulation OQAM, pour cela un décalage d'une demi-période symbole T/2 est introduit entre la partie réelles et la partie imaginaire d'un symbole QAM donné. Si la partie imaginaire est retardée de T/2 sur une sous-porteuse, c'est la partie réelle qui sera retardée sur la sous-porteuse suivante :

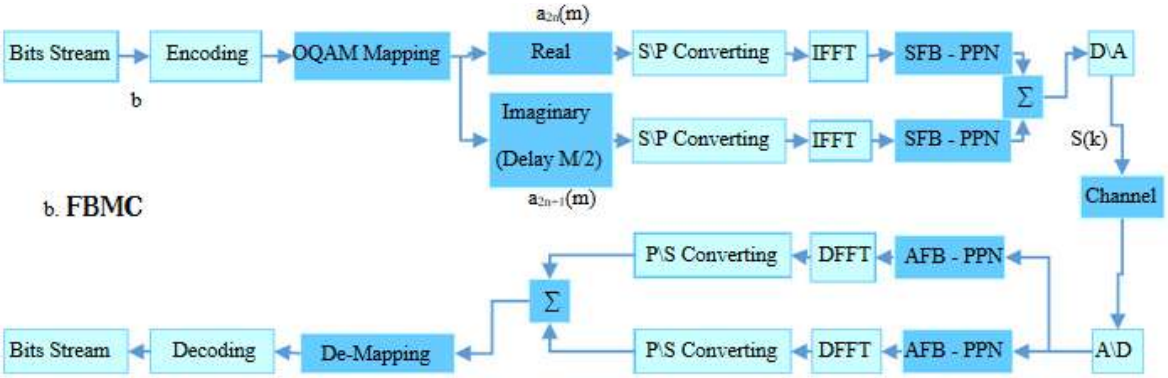


Figure II.5 : Structure générale de FBMC/OQAM. [29]

2.7.1 Principe de traitement OQAM

Les symboles OQAM sont transmis plutôt que les symboles QAM, Pour effectuer cette modulation il y'a deux bloc principaux de traitement OQAM qui s'appelle « pré/post de

traitement », l'un est placé à côté d'émetteur « pré/traitement » et l'autre est placé à côté de récepteur. [30]

Bloc pré/traitement OQAM [28]

La figure II.6 ci-dessus illustre le principe de pré/traitement OQAM qui se compose de deux opérations

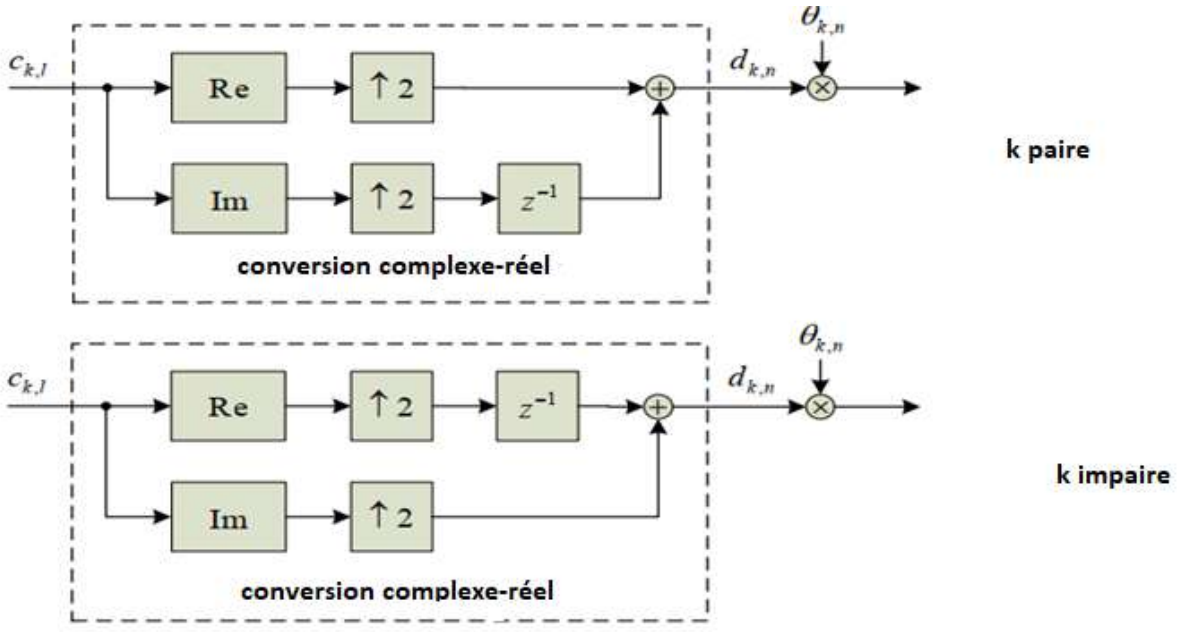


Figure II. 6: Schéma générale de pré/traitement OQAM. [28]

- **La première opération :** C'est une décomposition d'un symbole complexe $C_k[l]$sur deux parties réel et imaginaire pour former deux nouveaux symboles $d_k[n]$ et$d_k[n+1]$ qui transmise à un débit 1/T, cette opération appelle « conversion complexe/réelle »

Tel que :

$$d_k[n] = \begin{cases} R_e(C_k[I])sikpaire \\ I_m(C_k[I])sikimpaire \end{cases} \quad (II.3)$$

$$d_k[n+1] = \begin{cases} I_m(C_k[I])sikpaire \\ R_e(C_k[I])sikimpaire \end{cases} \quad (II.4)$$

Avec :

- T=1/$\mathfrak{X}f$re présente la période du signal.
- $\mathfrak{X}f$ l'espacement entre les sous-porteuses.

- L **:** L'indice d'échantillon à l'entrée du bloc pré-traitement OQAM et la sortie de block post-traitement OQAM.
- N **:** L'indice d'échantillon à la sortie du block pré-traitement OQAM et l'entrée du block post-traitement OQAM.

➢ **La deuxième opération :** c'est une multiplication par $\theta_k[n]$ afin de maintenir les symboles orthogonaux.

Tel que :

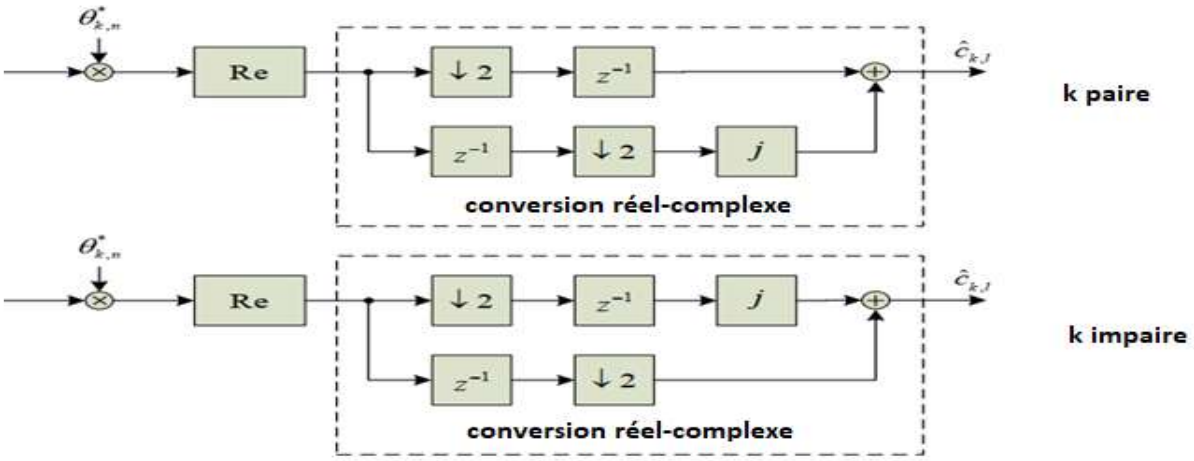
$$\theta_k[n] = J^{k*n} \qquad (\text{II}.5)$$

A la sortie du bloc pré-traitement le signal de données $x_k[n]$ peuvent s'exprime comme suit

$$X_k[n] = d_k[n].\theta_k[n] \qquad (II.6)$$

Bloc Post-traitement OQAM [28]

La figure II.7 ci-dessus illustre le schéma fonctionnel du post-traitement OQAM qui se trouve à la réception, il constitue de deux opérations principales.



La figure II.7 : Schéma fonctionnel du post-traitement OQAM. [28]

➢ **La première opération :** c'est la multiplication par le complexe conjugué de $\theta_k[n]$noté$\theta_k^*[n]$suivie de l'opération qui se compose que de la partie réelle.

➢ **La deuxième opération :** c'est la conversion réelles/complexe dans laquelle deux symboles réelles successifs forment un symbole de valeur complexe (l'un des symboles est multiplié par j)

La forme complexe notée $C_k[l]$ s'exprime comme suit :

$$\hat{C}_k[l] = \begin{cases} \hat{d}_k[n] + j\hat{d}_k[n+1] sikpaire \\ \hat{d}_k[n+1] + j\hat{d}_k[n] sikimpaire \end{cases} \quad \text{(II. 7)}$$

2.8 La modulation FBMC/OQAM [1]

La modulation FBMC/OQAM se positionne comme une alternative à la modulation OFDM classique dans les systèmes 5G. FBMC/OQAM offre une meilleure efficacité spectrale par rapport au système OFDM qui est due à la non-utilisation du préfixe cyclique en plus, elle présente des remontées spectrales faibles au niveau de la DSP.

2.8.1 Principe de la modulation FBMC/OQAM [1]

La technique de FBMC-OQAM fait remplacer la modulation QAM habituelle par la modulation OQAM, où un décalage d'une demi-période symbole T/2 est introduit entre la partie réelles et la partie imaginaire d'un symbole QAM donné.

Si la partie imaginaire est retardée de T/2 sur une sous porteuse, c'est la partie réelle qui sera retardée sur la sous-porteuse.

La figure II.8 représente la structure générale de la technique FBMC/OQAM :

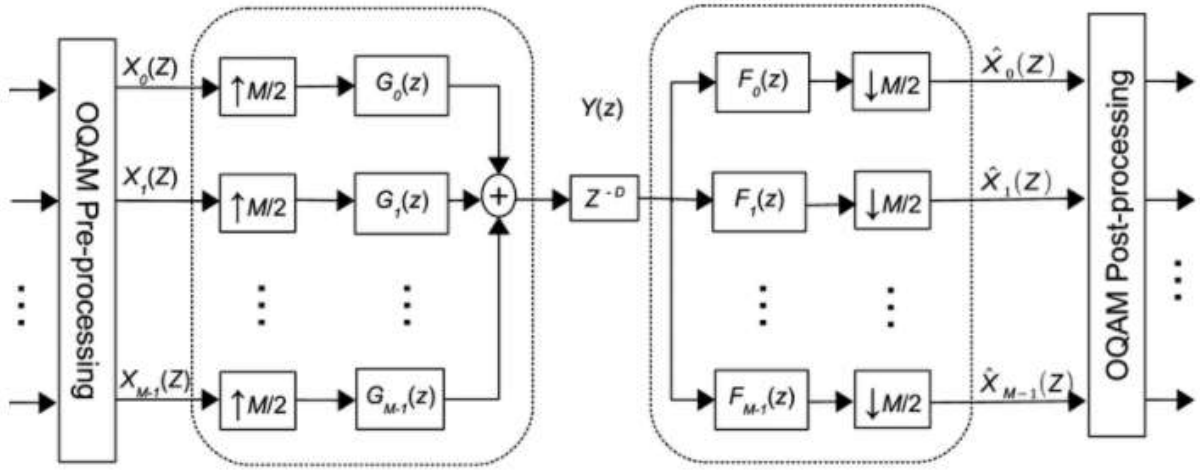


Figure II.8 : Structure générale de la technique FBMC/OQAM. [1]

La Structure de FBMC/OQAM peut être divisée en deux parties : partie émission et partie réception.

- **Partie émission** : A l'émission, les symboles de données SKN, K=0,1,….M-1, qui passent par la modulation QAM sont envoyés par le bloc de conversion série /parallèle puis passe par la modulation OQAM qui consiste à introduire un décalage temporel d'une demi période T/2 entre la partie réelle et la partie

imaginaire du symbole QAM transmis sur une sous porteuse donnée. Ce qui permet d'éliminer les interférences entre symboles.

Le signal résultant passe par le bloc des filtres de synthèse qui contient deux blocs : Le premier bloc c'est la transformé de Fourier inverse rapide. [36] Le deuxième bloc c'est le filtre polyphasés $H_n(z^n)$. A la sortie du banc de filtres de synthèse en a une conversion parallèle/série et à la fin le signal à la sortie peut être exprimé comme suit :

$$y(m) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} d_k(n) \emptyset_k(n) B_k(n) p\left(m| - n\frac{m}{2}\right) e^{j\frac{2\pi}{M}km} \qquad \text{(II. 8)}$$

Où m est l'indice d'échantillon à l'entrée / sortie SFB / AFB, et M est le nombre de sous porteuses dans la banque de filtres.

Le schéma fonctionnel du partie émission FBMC / OQAM est illustré dans la figure II.9 :

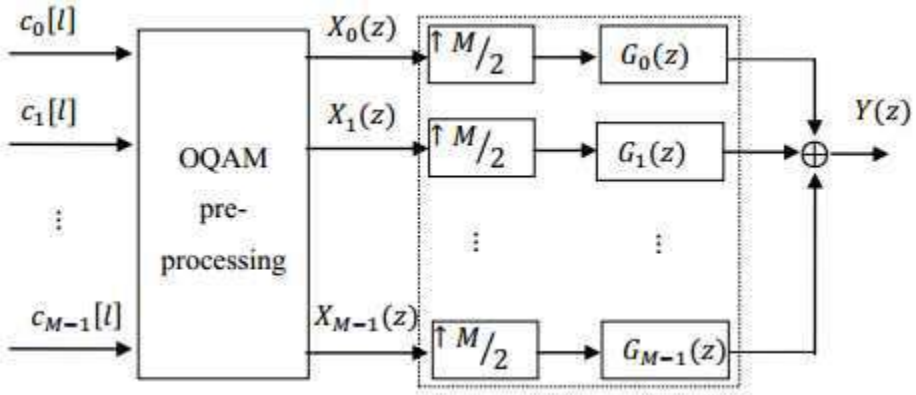


Figure II.9 : Partie émission. [1]

- **Partie réception :** Le signal traverse le canal sans fil et peut être exprimé comme suit :

$$r_k(m) = y_k(m)h_k(m) + W_k(m) \qquad \text{(II. 9)}$$

$h_k(m)$ Est un processus d'évanouissement complexe évalué sur la sous-porteuse pour le Symbole FBMC / OQAM,

$W_k(m)$ Est un processus de bruit gaussien blanc additif (AWGN).

Les processus de $W_k(m)$et k=0,1,…m−1 sont supposés être mutuellement indépendants elle processus gaussiens complexes à moyenne nulle, à distribution

identique et des variances égales. Après le traitement du signal reçu $r_k(m)$ avec le bloc de la banque de filtres d'analyse.

Le schéma fonctionnel du: partie réception FBMC/OQAM est illustré dans la figure II.10 :

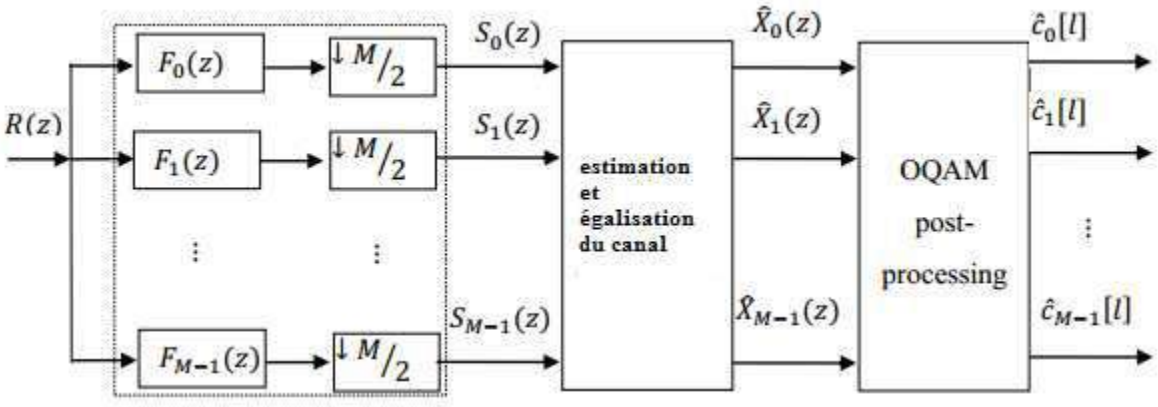


Figure II.10: Partie réception. [1]

2.9 Comparaisons entre l'OFDM et FBMC [22]

La principale différence entre FBMC et OFDM réside dans le choix du filtre prototype. De telle sorte que l'OFDM utilise un filtre à fenêtre rectangulaire et le FBMC utilisant un filtre de type pro conçu avec le principe de mise en forme d'impulsion de Nyquist, qui peut considérablement réduire le problème de fuite spectrale d'OFDM.

La figure II.11 désigne les deux réponses impulsionnelles des filtres utilisés dans les deux Modulations.

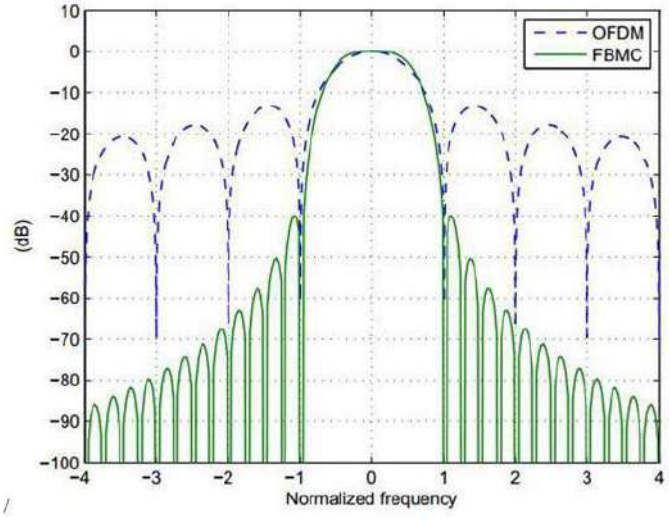


Figure II.11 : Comparaison entre DSP d'OFDM et FBMC. [22]

La technique FBMC/OQAM est moins sensible au décalage de fréquence résiduelle que l'OFDM et est plus robuste à l'effet Doppler.

Les autres éléments de déférence sont bien expliqués dans le tableau ci-dessus :

Tableau II.1 : Comparaison entre OFDM et FBMC. [22]

Propriété	OFDM	FBMC
Extension de préfixe cyclique	Préfixe cyclique est requis dans OFDM. ce qui sacrifie la bande passante.	Préfixe cyclique non requis, ce qui préserve la bande passante
Lobes latéraux	Lobes latéraux larges et interférents	Lobes secondaires bas
Effet Doppler	Très sensible au décalage de fréquence porteuse	Moins sensible et donc performant de manière significative avec l'augmentation de la mobilité des utilisateurs
Complexité informatique	Il a très peu de complexité	Il a une grande complexité

3. Technique UFMC

La technologie UFMC (Universel Filter Multi carrier) est une nouvelle technologie qui combine les fonctionnalités d'OFDM et de FBMC. Il est basé sur le multiplexage par répartition en fréquence FDM. Dans UFMC le flux de données entrant est réparti en plusieurs sous-flux avec un débit de données comparativement inférieur. Ce nouveau candidat offre une émission réduite hors bande et une meilleure synchronisation temps-fréquence. UFMC a été introduit en tant que nouvelle conception de forme d'onde représentant une généralisation de ce principe visant à collecter les avantages tout en

évitant les inconvénients des autres techniques de modulation. UFMC est la méthode qui combine les avantages de l'orthogonalité de l'OFDM et du concept de banque de filtres dans FBMC. Au lieu de filtrer chaque porteuse comme dans FBMC, un bloc de porteuses appelées sous-bande est filtré. Chaque sous-bande contient un nombre de porteuses et la longueur du filtre dépendra de la largeur de la sous-bande. [31]

3.1 Principe de modulation UFMC

L'UFMC divise le bloc $s_k(k \in 1 \dots N)$de symboles QAM en B sous-blocs, chaque bloc est constitué de $n_i$symboles QAM, ces symboles sont regroupés en $s_{ik}(i \in 1 \dots)$ et transmis à aux blocs IFFT. La gamme de fréquences est formée de B sous-bandes consécutives, et les N sous-porteuses d'informations sont transmises dans chaque sous-bande. [32]

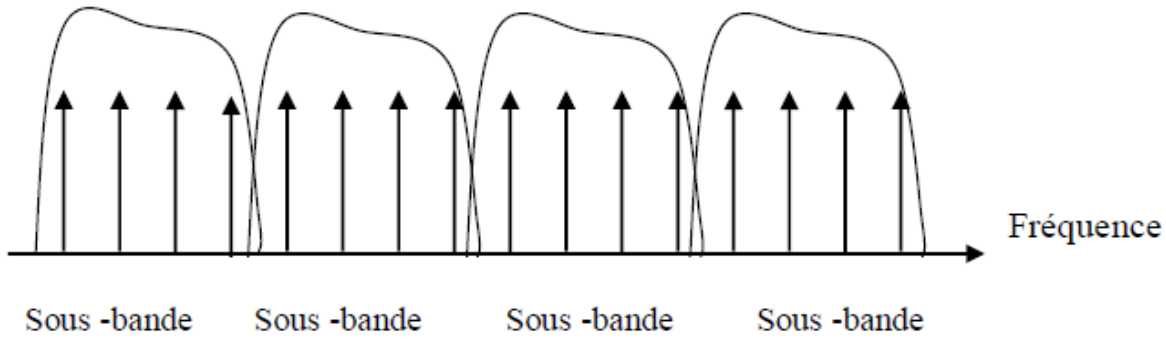


Figure II.12: Formation du signal UFMC dans le domaine fréquentiel. [32]

Les signaux de sortie des blocs IFFT sont fournis séparément aux filtres « Dolph-Tchebyshev». Les caractéristiques fréquentielles du filtre sont décalées en fréquence en fonction des sous-porteuses d'informations de la sous-bande correspondante.

Le signal émis $x_k$dans le domaine temporel est la somme des signaux de toutes les sous-bandes, et peut être représenté en utilisant l'expression suivante:

$$\underbrace{x_k}_{[(N+L-1)\times 1]} = \sum_{i=1}^{B} \underbrace{F_{i,k}}_{[(N+1-1)\times N]} \cdot \underbrace{V_{i,k}}_{[N\times n_i]} \cdot \underbrace{s_{i,k}}_{[n_i\times 1]} \qquad (\text{II. } 10)$$

Où :

$F_{i,k}$:est une matrice de Toeplitz de dimension $((N+L-1) \times N)$ composée de la réponse impulsionnelle du filtre, effectuant la convolution linéaire entre les signaux $X_{i,k}$ et $F_{i,k}$.

V_{ik}: inclut les colonnes pertinentes de la matrice de Fourier inverse en fonction de la position de la sous-bande respective, dans la gamme de fréquences globale disponible.

$s_{i,k}$: est un vecteur de symboles QAM de la i^{ème} sous-bande.

Après superposition, le signal$x_k$est converti et traité dans le domaine radio-fréquence et transmis au canal de communication, la fréquence du signal radio reçu est transmise vers le récepteur et traitée dans le domaine temporel.

Le vecteur y du signal UFMC reçu est représenté comme un produit entre le signal transmit x_k et la matrice H caractérisant la réponse impulsionnelle du canal dans le domaine temporel, incluant le bruit additif w(t).

$$y = H.x_k + w(t) \qquad \text{(II. 11)}$$

Ensuite, le signal UFMC est transformé en bande de base et transmis à l'unité de transformée de Fourier discrète directe (FFT) de 2N points, enfin transféré vers le domaine fréquentiel. Les échantillons disparus à l'entrée du bloc FFT sont complétés par des zéros.

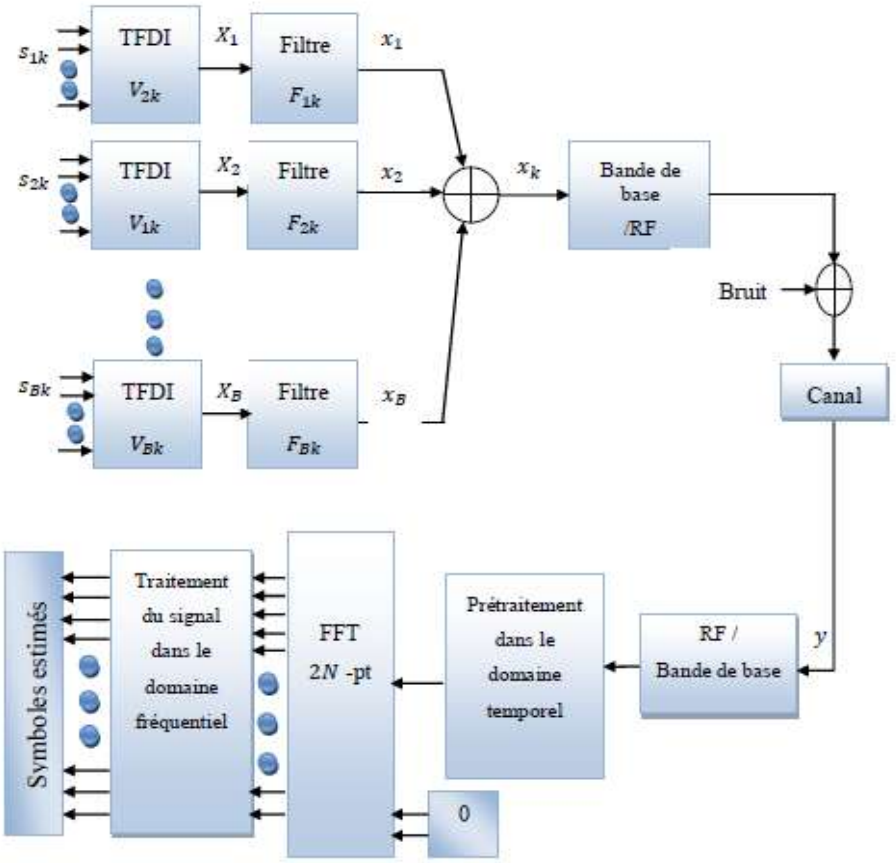


Figure II.13 : Système modèle d'UFMC. [32]

3.2 Schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur UFMC [32]

3.2.1 Emetteur UFMC

La figure II.14 montre que l'UFMC divise la bande complète des *N* sous-porteuses en sous-bandes dont chacune a un nombre fixe de sous-porteuses. Une IFFT de *N* points est calculée au niveau de chaque sous-bande, par la suite la fonctionnalité de filtrage permet de réduire la longueur du filtre. Enfin les réponses des différents filtres sont additionnées.

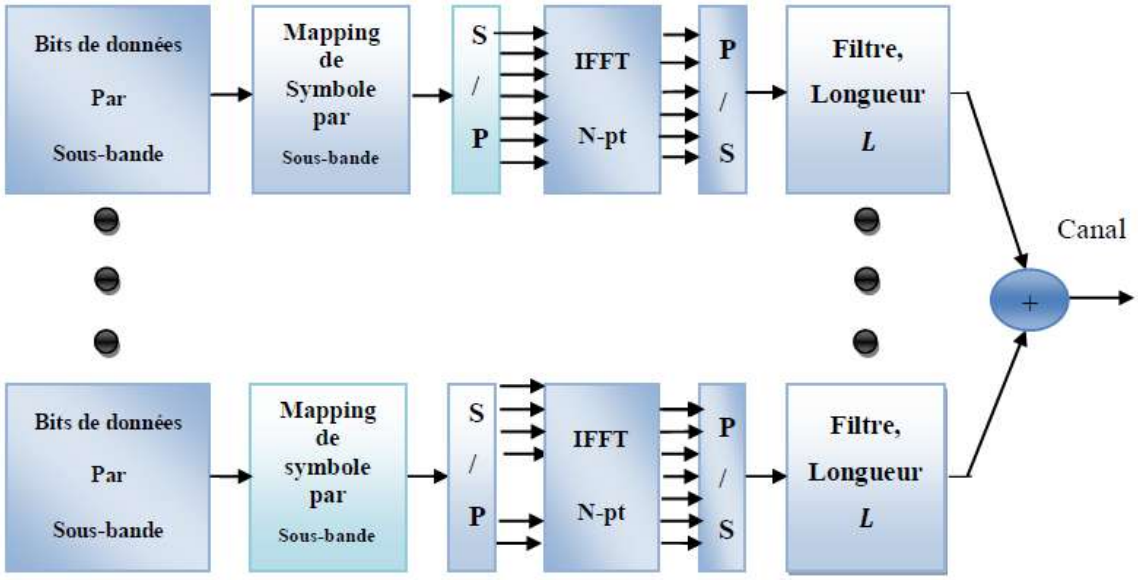


Figure II.14: Emetteur UFMC. [32]

3.2.2 Récepteur UFMC

La figure II.15 illustre le traitement de la modulation UFMC à la réception, basé sur la transformé de Fourier. Le filtrage par sous-bande étend la fenêtre de temps de réception à la prochaine valeur de puissance de deux pour l'opération FFT. Chaque valeur de fréquence alternative correspond à un lobe principal de sous-porteuse. Dans des scénarios typiques, l'égalisation par sous-porteuse est utilisée pour égaliser l'effet conjoint du canal.

Dans cet exemple, seul le filtre de sous-bande est égalisé car aucun effet de canal n'est modélisé. Du bruit est ajouté au signal reçu pour obtenir le rapport signal / bruit désiré.

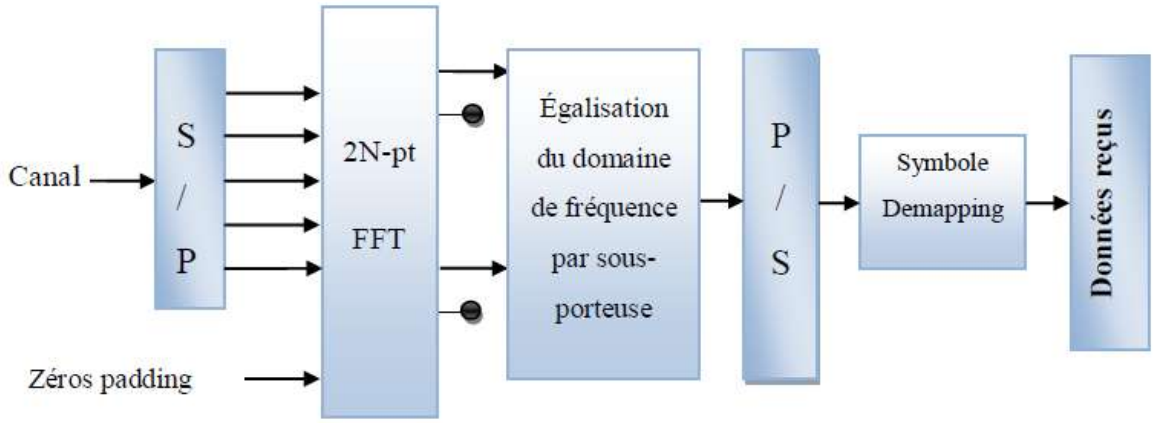


Figure II.15: Récepteur UFMC. [32]

3.3 Comparaison entre UFMC et FBMC [22]

- UFMC a une Bonne efficacité spectrale similaire à FBMC.
- Moins de frais généraux requis par rapport à FBMC.
- Bien adapté pour les transmissions de courte durée par rapport à l'FBMC ,Comme l'orthogonalité complexe est en partie perdue, UFMC peut ne pas être adapté à des débits de données élevés par contre FBMC est mieux adaptée pour les transmissions de langue durée avec des débits élevés .
- Avec un retard important, des égaliseurs à prises multiples doivent être appliqués et un récepteur de plus grande taille FFT augmente la complexité.
- Brouillage causé par des sous-bandes se recouvrant partiellement.
- Une faible complexité et l'amélioration du bruit par rapport à la FBMC.

3.4 Comparaison entre UFMC et OFDM [32]

- L'UFMC peut être considéré comme une généralisation de la modulation OFDM.
- L'UFMC peut utiliser des égaliseurs dans le domaine fréquentiel par sous-porteuse qui égalisent l'impact conjoint du canal radio et du filtre de sous-bande respectif. Cela conduit à un ordre de complexité similaire à celui de l'OFDM avant la conversion en domaine fréquentiel.
- L'UFMC n'utilise pas de CP, mais possède une protection contre l'IES, en raison de la montée en puissance et de la décélération du filtre au début et à la fin d'un symbole.
- L'UFMC utilise un filtrage par sous-bandes. L'utilisateur 1 utilise une taille $N1$ de FFT et une longueur de filtre$eL1$, l'utilisateur 2 utilise$eN2$ et $L2$, les durées des

symboles de l'UFMC peuvent être conçues de manière identique, selon la relation : $N1+L1-1=N2+L2-1$.

- Afin d'avoir une comparaison équitable entre l'UFMC et l'OFDM, la longueur de CP-OFDM est choisie pour être : $LCP=L-1$, L est la longueur du filtre.

4. Technique GFDM

Le système GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) est une modulation non orthogonale qui offre plus de degrés de liberté grâce à l'utilisation d'un large choix de filtres. Les radiations hors bandes du signal GFDM transmis sont contrôlées par un filtre de mise en forme ajustable, qui est appliqué à chacune des porteuses. Dans le GFDM, la structure des données est ajustable à deux dimensions : on regroupe les symboles des données dans un bloc pour lequel le nombre de porteuses et les durées temporelles sont ajustables. La taille des blocs est variable, ce qui permet de pouvoir implémenter de longs filtres ou de réduire le nombre total des sous-porteuses. Similairement à l'OFDM, le GFDM utilise aussi un préfixe cyclique pour combattre les ISI, sauf que le préfixe cyclique est utilisé pour chaque bloc, et la durée de chaque bloc peut être plusieurs fois la durée de la période symbole, et donc le préfixe cyclique est utilisé moins fréquemment que dans l'OFDM. [33]

4.1 Emetteur et récepteur GFDM [19]

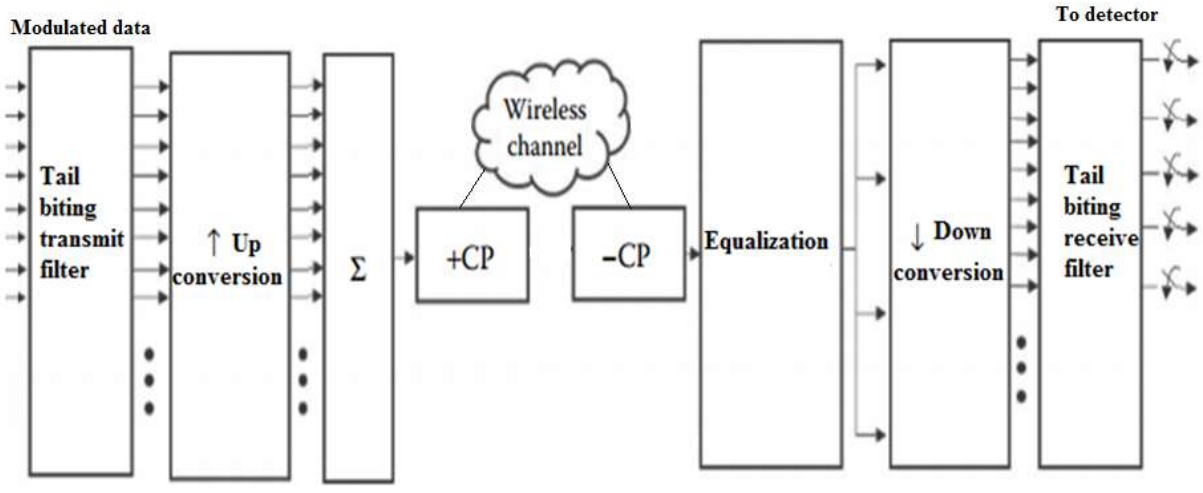


Figure II.16: Schéma global d'un émetteur-récepteur GFDM. [19]

4.2 Principe et fonctionnement de l'GFDM

Le multiplexage par répartition en fréquence généralisé (GFDM), est un nouveau concept de transmission multi porteuse flexible qui introduit des degrés de liberté supplémentaires par rapport au multiplexage OFDM traditionnel.

Dans GFDM, le rayonnement hors bande du signal d'émission est commandé par un filtre de mise en forme d'impulsions réglable qui est appliqué aux sous porteuses individuelles. En outre, une structure de données bidimensionnelle est introduite pour grouper des symboles de données sur plusieurs sous porteuses et des tranches de temps vers des blocs. La taille des blocs est un paramètre variable et permet de mettre en œuvre des filtres longs ou de réduire le nombre total de sous porteuses. Le traitement des ces blocs se fait à basse de filtres numériques piqueurs qui préservent les propriétés circulaires dans le domaine temporel et fréquentiel. De manière similaire à OFDM, dans GFDM, un préfixe cyclique peut être utilisé pour combattre l'ISI dans un canal à trajets multiples. L'un des inconvénients de cette technique est le filtrage de sous porteuse qui peut entrainer des sous porteuses non orthogonales et il peut se produire à la fois une interférence entre symboles (ISI) et une interférence entre porteuses (ICI). Les figure II.17 et II.18 montre deux diagrammes de bloc l'un présente un émetteur GFDM le l'autre un modulateur GFDM détaillé. [34]

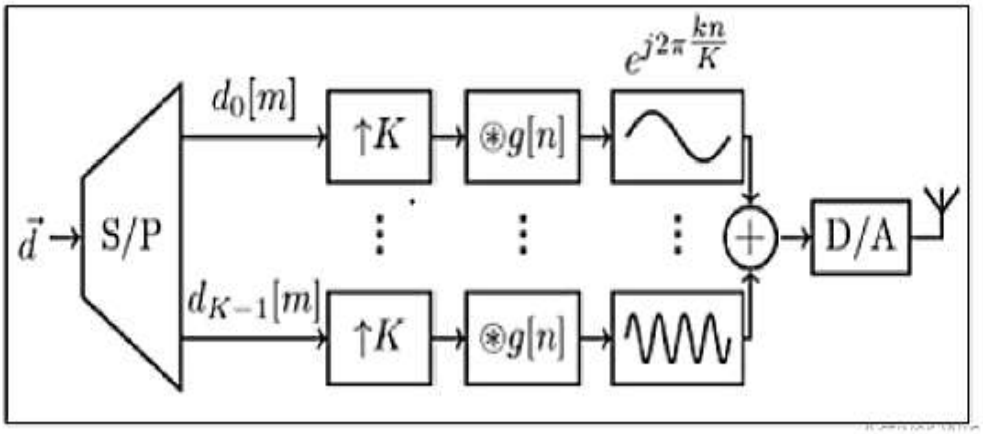


Figure II.17: diagramme de bloc de l'émetteur GFDM. [34]

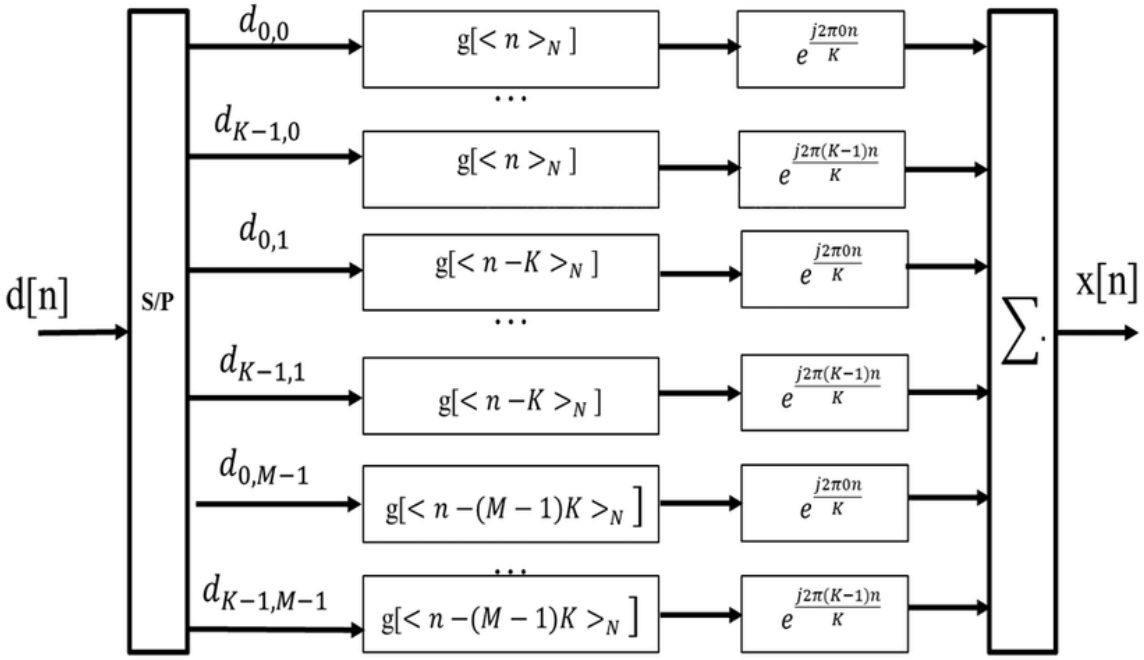


Figure II.18: diagramme de bloc de modulateur GFDM détaillé. [33]

4.3 Avantages de la modulation GFDM [35]

La nature flexible du GFDM rend cette forme d'onde adaptée à un futur système de communication 5G. Les caractéristiques des techniques GFDM sont répertoriées comme suit :

- Débuts plus élevés.
- Faible consommation d'énergie.
- Réduire l'OOB.
- Haute efficacité spectrale et réponse à court portée.
- Une bonne localisation en fréquence de l'impulsion d'émission rend le système robuste contre la dispersion de fréquence (effet Doppler).
- Une bonne localisation de l'impulsion fournit une robustesse contre la dispersion du temps.
- PAPR, le taux de puissance moyen maximal pour GFDM est inférieur à celui de l'OFDM.
- Modulation multi porteuse flexible avec une allocation de spectre dynamique qui peut être obtenues sans interférence sévère dans le service ou d'autres utilisateurs.
- Petite cout supplémentaire en ajoutant un seul CP pour tout le bloc qui contient plusieurs sous symboles pour réduire la consommation d'énergie, et réaliser la

diversité de transmission et de réception, pour réduire la complexité car GFDM est forme d'onde non orthogonale.

4.4 Performance du système GFDM comparée au système OFDM [35]

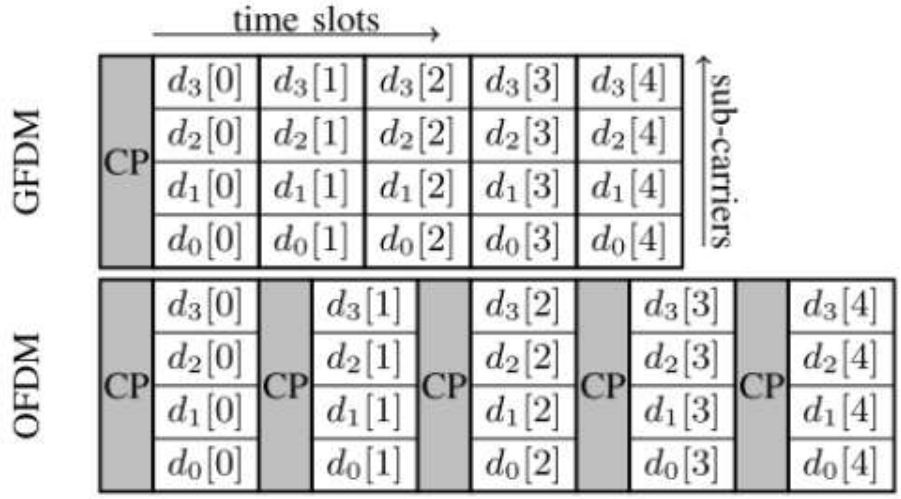


Figure II.19: différentes structures de blocs dans OFDM et GFDM. [35]

La figure II.19 représente une comparaison entre la OFDM et GFDM par rapport à l'utilisation du préfix cyclique, l'OFDM utilise un CP pour chaque sous porteuse, par contre la GFDM utilise un seule CP pour toutes les sous porteuses. L'OFDM souffre de sa faible efficacité énergétique due à l'utilisation du CP ainsi que de ses émissions élevées OOB.

Parmi les caractéristiques intéressantes de GFDM, on peut citer la réduction du rayonnement hors bande (OOB) et le faible ratio de pic par rapport à la moyenne (PAPR), qui constituent les principales lacunes de la modulation OFDM utilisée dans les réseaux de communication sans fil actuels. [19]

- **Rayonnement hors bande (OOB)**

L'OOB est l'émission sur une ou des fréquences situées en dehors de la largeur de bande nécessaire mais en son voisinage immédiat. GFDM peut fournir une émission OOB réduite par rapport à OFDM, car il applique des filtres de mise en forme d'impulsion par sous-porteuse. Différentes réponses aux impulsions de filtrage peuvent être utilisées pour filtrer les sous-porteuses, et ce choix affecte les émissions OOB. L'énergie réduite hors bande (c'est-à-dire les lobes latéraux inférieurs) favorise une robustesse contre l'ICI plus élevée et permet d'utiliser un plus grand nombre de sous-porteuses tout en respectant encore un masque spectral prescrit. Ce lobe latéral inférieur dans GFDM permet également une

utilisation plus efficace du spectre par rapport à l'OFDM, qui a habituellement besoin d'une bande de garde de 10% pour répondre au masque de spectre. [19]

- **PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)**

Le facteur de crête, couramment appelé PAPR est une mesure caractéristique d'un signal. C'est le rapport entre l'amplitude du pic du signal et la valeur efficace du signal. C'est donc une valeur sans dimension. En traitement du signal, il est souvent exprimé en décibels (dB).

La valeur élevée du PAPR est l'une des préoccupations importantes du système basé sur OFDM, étant donné que cela réduit l'efficacité de l'amplificateur de puissance utilisé dans le circuit. En effet, dans le cas de l'OFDM, on a un symbole par sous-porteuse (M = 1), ce qui provoque un PAPR très élevé, presque de l'ordre du nombre de sous-porteuses K. Alors, on peut dire que GFDM peut avoir un PAPR réduit en raison du nombre M (M> 1) de symboles dans chacune des K sous-porteuses. [19]

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents types de modulations multi-porteuses nommées, FBMC, UFMC et GFDM utilisées dans les systèmes 5G. Dans le chapitre suivant on va entamer notre partie expérimentale, dont on va faire la simulation dans MATLAB des chaines de transmission utilisant les techniques OFDM et FBMC en vue de leur comparaison.

Chapitre III

Simulation et résultats des modulations multi-porteuses

1. Introduction

Après avoir finalisé la partie théorique, nous allons passer dans ce chapitre à la simulation de quelques caractéristiques des formes d'ondes à l'aide de MATLAB.

Le but de ce projet est comparé la technologie de la modulation 5G proposée FBMC avec l'OFDM, qui est une technique de modulation utilisée dans les communications 4G et 5G. Nous voulons comparer les paramètres clés de ces technologies pour analyser les avantages de chaque technologie candidat, Densité spectrale de puissance, efficacité spectrale et taux d'erreur binaire pour d'évaluer les performances de chacune d'elles.

2. Taux d'erreur binaire (BER)

Le taux d'erreur sur les bits est le paramètre principal décrivant la qualité de la transmission numérique. Il est défini comme le rapport des bits d'erreur sur le nombre total de bits reçus. Ce rapport détermine le nombre d'erreurs avant et après démodulation, Qui augmentera en raison des interférences : panne d'équipement ou de réseau, mauvais pointage d'antenne, longueur de canal, etc. Le BER est exprimé sous la forme du rapport Eb/No, Eb est l'énergie d'un bit et No est la densité spectrale de puissance du bruit du canal AWGN.

3. Réalisation de la chaine de transmission OFDM sous Simulink

Dans cette partie, nous allons simuler la chaîne de transmission de la technique OFDM sous SIMULINK. Elle se compose de deux parties à savoir une partie en émission (modulation OFDM) et la deuxième en réception (démodulation OFDM), comme illustre la Figure III.1 :

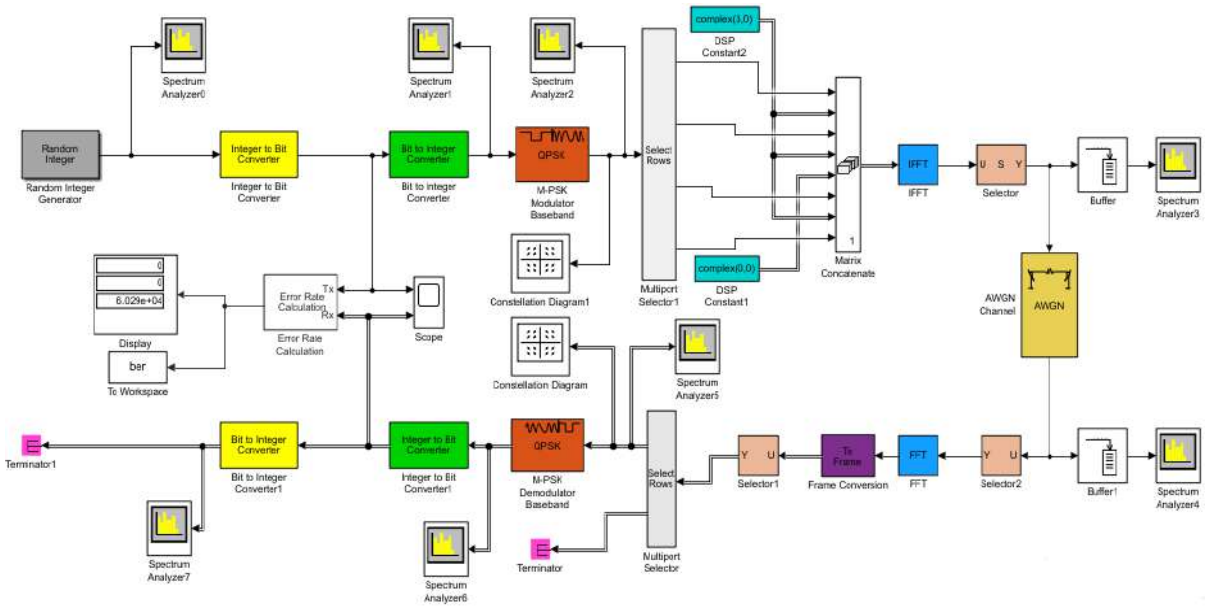


Figure III.1: La chaine de transmission OFDM sous Simulink.

3.1 La chaine d'émission du système OFDM

La figure ci-dessous illustre un émetteur d'un système OFDM.

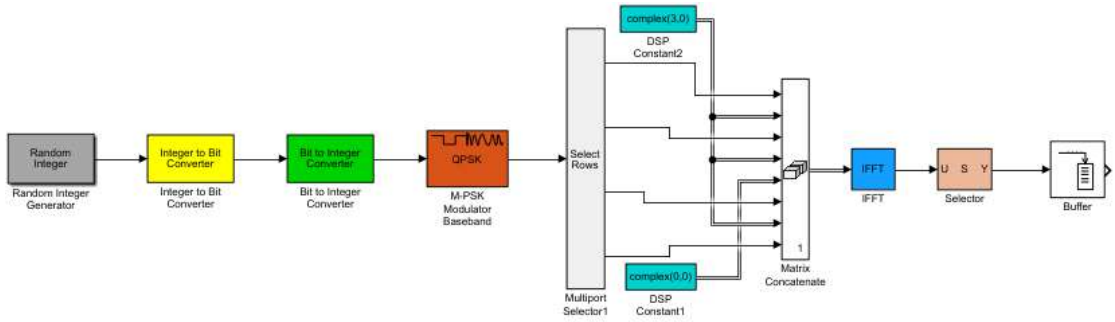


Figure III.2: La chaine d'émetteur d'un système OFDM sur Simulink.

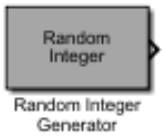
Dans la chaîne de transmission, nous générons des séquences binaires représentant de la voix, des données, des images et même des informations analogiques, qui sont générées par conversion analogique-numérique. Ensuite, les données binaires sont réparties sur chaque sous-porteuse, puis modulées à l'aide d'un modulateur voir la Figure III.2. A la sortie du modulateur, l'information a une constellation bien particulière. A chaque entrée, nous appliquons ensuite une transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) pour moduler les sous-porteuses. Terminez ensuite la conversion parallèle/série, puis nous ajoutons l'intervalle de garde comme préfixe cyclique, et le tout peut être transmis.

3.1.1 Configuration des différents blocs La chaine d'émission

- **Random Integer Generator :**

Ce bloc génère un nombre aléatoire d'entiers avec les paramètres suivant :

- 4états d'entiers.
- Une fréquence de 3MHz.
- 192 échantillons par trame. Voir la figure III.3



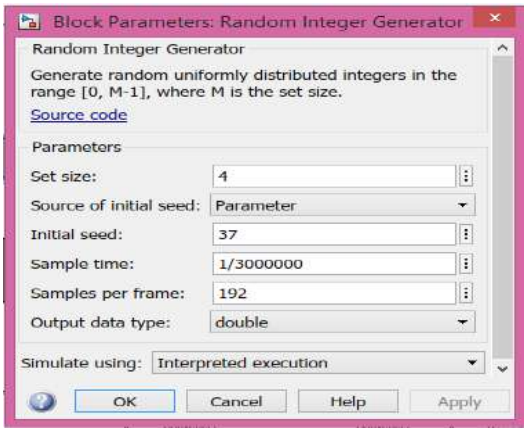
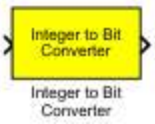


Figure III.3**:** Paramètres du bloc Random Integer Generator.

- **Integer to bit converter**

Pour la conversion des entiers en lieux, nous utiliserons le bloc approprié, avec un seul paramètre pour modifier le nombre de bits de chaque entier, dans notre exemple nous avons choisi 2 bits, Voir la figure III.4.



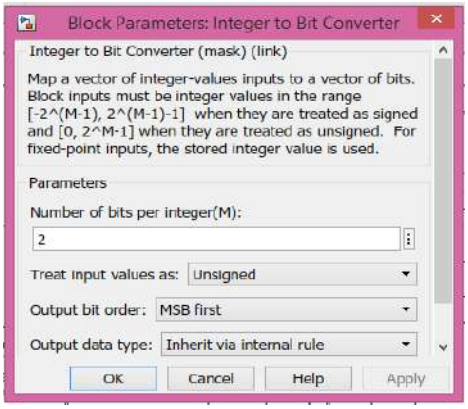


Figure III.4: Paramètres du bloc Integer to bit converter.

- **Bit to integer converter :**

Pour la conversion bit à entier, les mêmes paramètres doivent être modifiés, c'est-à-dire que le nombre de bits de chaque entier est égal à 2 bits, Voir la Figure III.5.



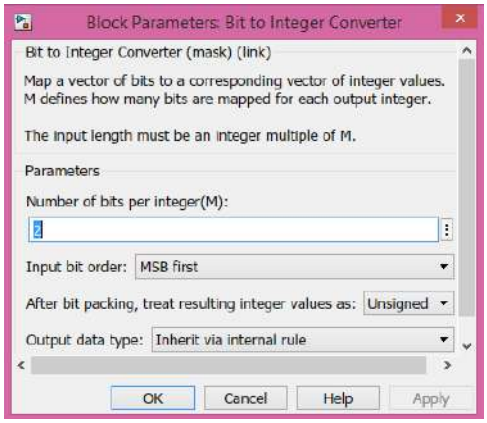


Figure III.5: Paramètres du bloc Bit to integer Converter.

- **Modulation QPSK :**

Le bloc Modulateur effectue une modulation QPSK numérique pour moduler le signal, et la sortie est une représentation en bande de base du signal modulé. La source que nous utilisons est constituée de 4 états possibles, donc la modulation que nous devons utiliser doit également être les 4 états en modifiant l'ordre de la constellation : GRAY au lieu de BINARY, voir la Figure III.6.



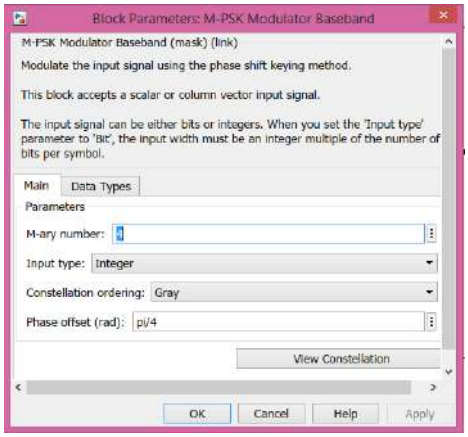


Figure III.6: Paramètres du bloc QPSK Modulator.

- **Insertion des sous-porteuses pilotes et DC :**

Toutes les sous-porteuses disponibles dans la bande de fréquences ne sont pas attribuées aux données utilisateur. Certaines sous-porteuses sont utilisées pour d'autres raisons, telles que :

- DC Sub-carrier : La porteuse centrale, pour marquer le centre de la bande OFDM.
- Pilot Sub-Carriers : utilisées pour transporter des séquences PILOTE bien utiles pour connaitre le canal de propagation.

Le rôle du bloc suivant est d'intégrer ces différentes sous-porteuses :

- On va intégrer une DC Sub-Carrier au milieu de la trame et 3 Pilot Sub-Carriers.
- Select Rows : Pour découper les 192 symboles reçus à son entrée par 4, en rangeant chaque ensemble dans une sortie.
- Entre les 4 ensembles on va intégrer nos Pilot Sub-Carriers et au milieu La porteuse centrale.

Et pour rassembler le tout on va utiliser le bloc Matrix Concaténation en changeant le nombre des entrées à 8, voir la Figure III.7 et la Figure III.8 .

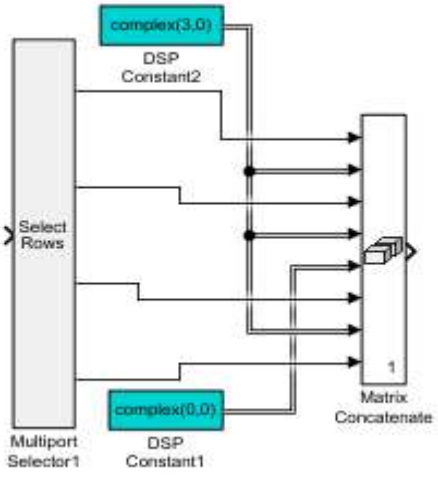


Figure III. 7: Insert les pilots.

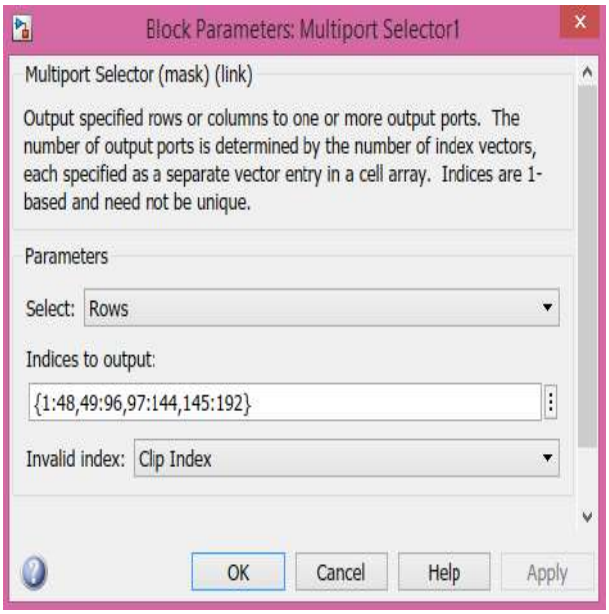


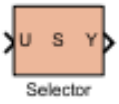
Figure III.8: Paramètres du bloc Multiport Selector.

- **IFFT :**



L'IFFT est une méthode de conversion des données du domaine fréquentiel vers le domaine temporel et fournit une méthode simple de modulation des données sur N sous-porteuses orthogonales. La sortie IFFT est essentiellement la somme de toutes les sinusoïdes orthogonales N qui y sont entrées, donc IFFT est le bloc le plus important de la chaîne de modulation OFDM, et la taille de l'IFFT sélectionnée est de 256.

- **Adding Cyclic Prefix**



Le préfixe cyclique utilisé dans « Orthogonal Frequency Division Multiplexing » fournit un élément essentiel du signal global agissant comme une bande de garde entre chaque symbole OFDM.

- L’ajout de préfixe cyclique ajoute la robustesse du signal OFDM.
- Les données qui sont retransmises peuvent être utilisées si nécessaire.

Et L'intervalle de garde introduit par le préfixe cyclique permet les effets de l'interférence entre symboles soient réduites.

- Le « Cyclic préfix » qui peut présenter de l’interférence avec des symboles adjacents est enlevé et le symbole OFDM est remis.

Ceci est ajouté pour garantir la propriété d'orthogonalité sur la durée de la partie utile du signal. Voir la Figure III.9.

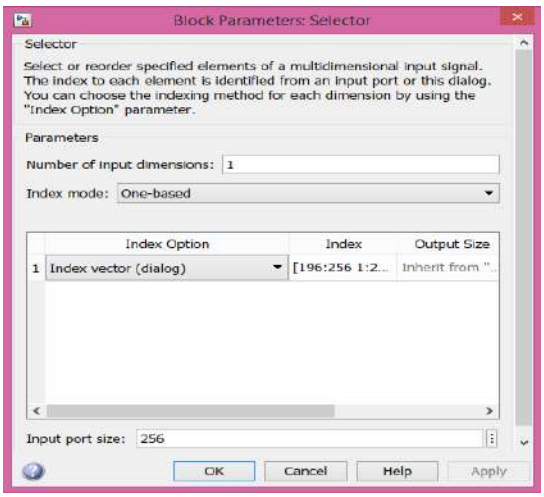
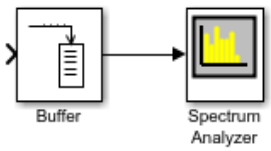


Figure III.9: Paramètres du bloc Add Cyclic Prefix.

- **Visualisation de spectre**

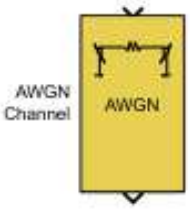
On peut visualiser le spectre à la sortie de l'émetteur ou bien à l'entrée du récepteur en utilisant « Spectrum Analyzer » en sélectionnant un ou plusieurs symboles de la trame à l'aide de « Buffer ».



- **Canal de Transmission AWGN**

Dans notre travail nous utilisons le canal AWGN. La valeur du SNR peut être modifiée pour déterminer la limite pour laquelle on commence à avoir un taux d'erreur élevé.

Le bloc Channel AWGN ajoute du bruit blanc gaussien à un signal d'entrée réel ou complexe. Lorsque le signal d'entrée est réel, ce bloc ajoute du bruit gaussien réel et produit un véritable signal de sortie. Lorsque le signal d'entrée est complexe, ce bloc ajoute bruit gaussien complexe et génère un signal de sortie complexe. Ce bloc accepte un scalaire à valeur, vecteur signal d'entrée de la matrice avec un type de données simple ou double. Voir la Figure III.10.



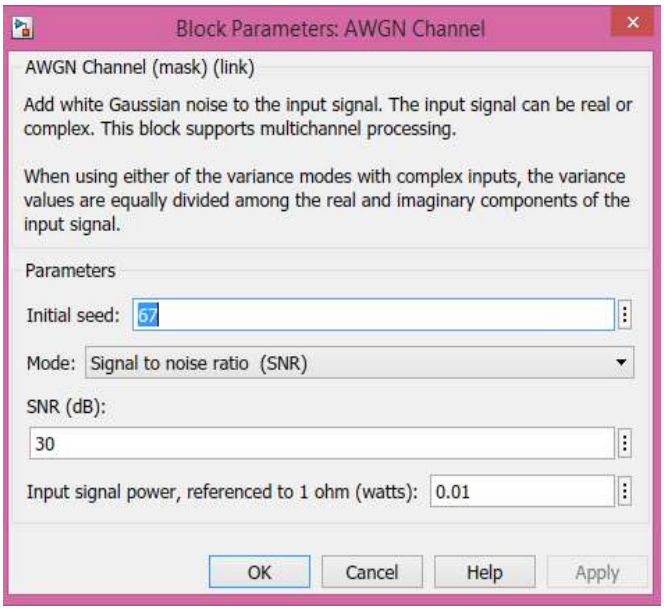


Figure III.10: Paramètres du bloc AWGN.

3.2 La chaine de réception du système OFDM

La figure III.11 ci-dessous illustre le récepteur du système OFDM.

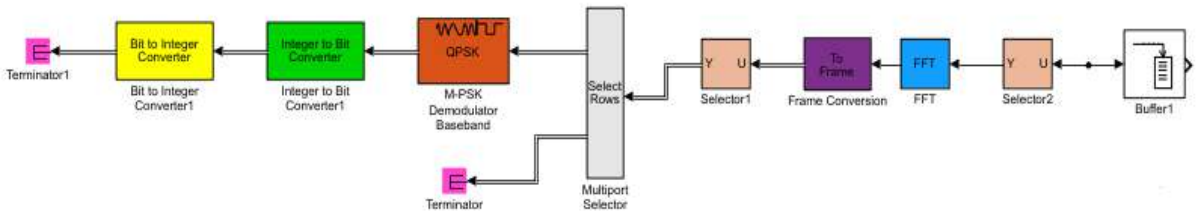


Figure III.11: Récepteur du système OFDM.

Le récepteur effectue l'opération inverse de l'émetteur, en utilisant un convertisseur analogique-numérique à grande vitesse pour convertir le signal OFDM en un signal numérique. La transformée de Fourier rapide est utilisée pour analyser le signal dans le domaine fréquentiel. Démodulez ensuite les données. A la sortie de la chaîne de réception, une chaîne d'informations est obtenue. La possibilité de transmission du signal original dépend des interférences et des erreurs de traitement introduites par le canal

3.2.1 Configuration des différents blocs La chaine réception

- **Remove Cyclic Prefix :**

Ce bloc est ajouté pour enlever le préfixe qui a été introduit dans l'émission OFDM. Comme on peut le voir à partir de la boîte de dialogue ci-dessus, les échantillons de préfixe cyclique sont retirés de 62 à 317. Tous les paramètres de la boîte de dialogue sont similaire à celles de la boîte 'Ajouter préfixe cyclique'. Voir la Figure III.12.



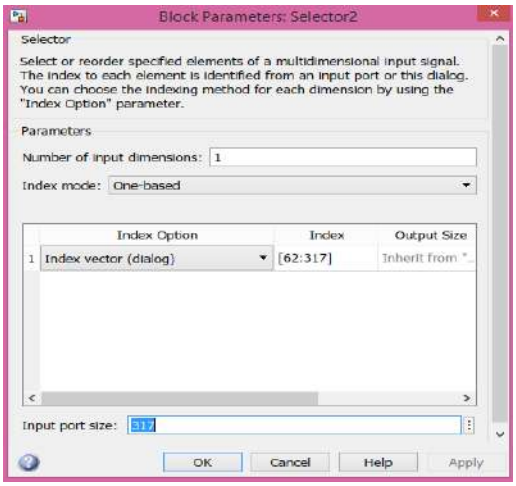
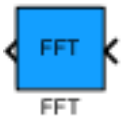


Figure III.12 : Paramètres du bloc Remove Cyclic Prefix.

- **FFT**



A la sortie du préfixe cyclique la taille du vecteur est 256, qui seront directement traiter par le bloc FFT. Au niveau du récepteur, un bloc FFT est utilisé pour traiter le signal reçu et l'amener dans le domaine fréquentiel. Idéalement, la sortie de la FFT sera symboles d'origine qui ont été envoyés à l'IFFT à l'émetteur.

Pour la taille de la FFT on a le choix entre 256 ou « Inherit FFT lengthfrom input dimensions ».

- **Frame Conversion**



Bloc pour passe l'entrée vers la sortie et regrouper les données en trame qui peut être soit basée sur l'image ou à base d'échantillons.

- **Removezero – pading**

Pour éliminer les zéros de bourrage qui ont été introduits dans la transmission OFDM on a utilisé les paramètres suivants (voir la Figure III.13):



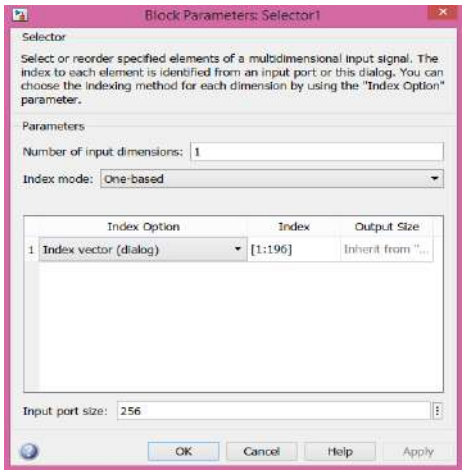


Figure III.13 : Paramètres du bloc zéro-padding Select Rows.

- **Select Rows :**

Ce bloc a été utilisé ici pour éliminer la séquence pilote à partir de la matrice de données Voir la figure III.14.

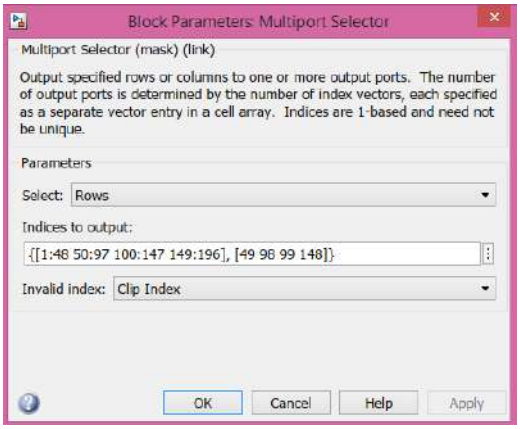


Figure III.14 : Paramètres du bloc Remove Pilots.

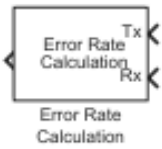
- **QPSK Démodulateur Baseband**



Le bloc démodulateur QPSK transforme le signal modulé en entrée et est la représentation en bande de base du signal modulé. Ce module accepte des signaux d'entrée, tels que des rapports ou des vecteurs colonnes.

Pour les blocs restants, ils ont le même rôle et paramètres que ceux utilisés au niveau de la modulation.

- **Error Rate Calculation**



Le bloc de calcul du taux d'erreur compare les données transmises avec les données reçues par la chaîne de transmission. Il calcule le taux d'erreur en tant que statistique en cours, en divisant le nombre total de paires d'éléments de données inégaux par le nombre total d'éléments de données d'entrée provenant d'une seule source.

Si les entrées sont des bits, alors le bloc calcule le taux d'erreur binaire. Si les entrées sont les symboles, il calcule le taux d'erreur de symbole.

- **Terminator**



Pour la comparaison et la recherche dans la simulation, nous avons utilisé d'autres modules de modulation et démodulation, à savoir « Rectangular QAM Modulator and demodulator ».

3.3 Résultats de la simulation OFDM avec modulation QPSK

Les figure III.15 et III.16 ci-dessous représente la densité spectrale de puissance du signal d'émis et reçu (après démodulation), successivement, en utilisant la modulation QPSK. On remarque que, dans ce spectre existe une composante continue de puissance 33.47 dBm et un composante fondamentale de puissance 8.971 dBm à la fréquence 0.75 MHz. On observe aussi autres harmoniques inférieurs à 8 dBm qui représentent le bruit.

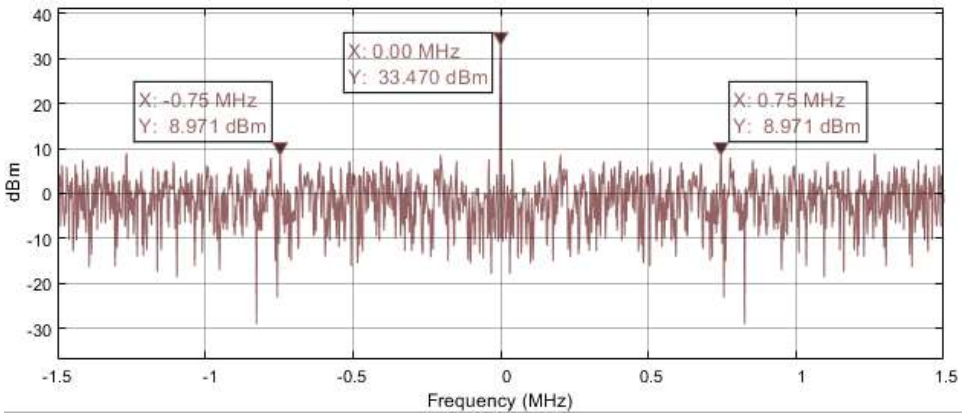


Figure III.15 : Représentation spectral de signal émis.

Dans la figure III.16, On remarque quelle signal reçu, C'est à dire le signal en sortie de l'émetteur filtré par le canal est bruité.

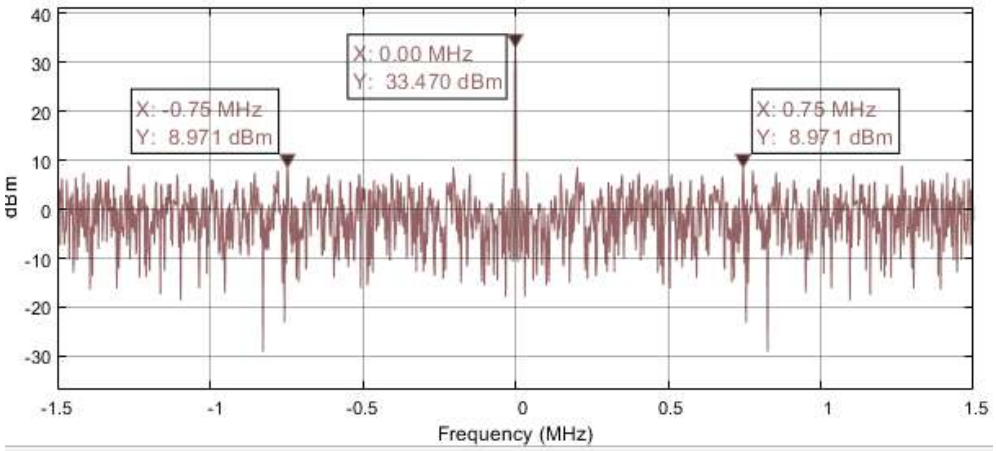


Figure III.16 : Représentation spectrale du signal reçu.

Pour visualiser la différence entre le signal émis et reçus on peut représenter les deux signaux en binaire dans la figure III.17. On observe que les données émis et reçu sont les même.

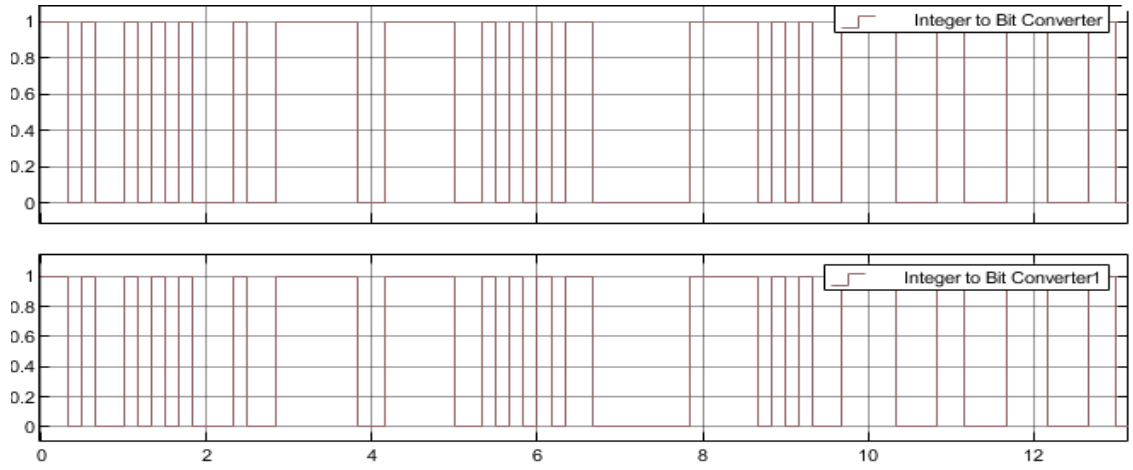


Figure III.17 : Comparaison entre le signal binaire émis (en haut) et le signal binaire reçus (en bas).

3.4 Les spectres de signal après la modulation

La figure III.18 représente la densité spectrale de puissance du signal après modulation QPSK. On remarque que, dans ce spectre existe des composantes fondamentales des puissances 8.577 dBm et 8.494 dBm à la fréquence 0.85 MHz et 1.36 MHz, successivement. Avec harmoniques inférieurs à 8 dBm qui représentent le bruit.

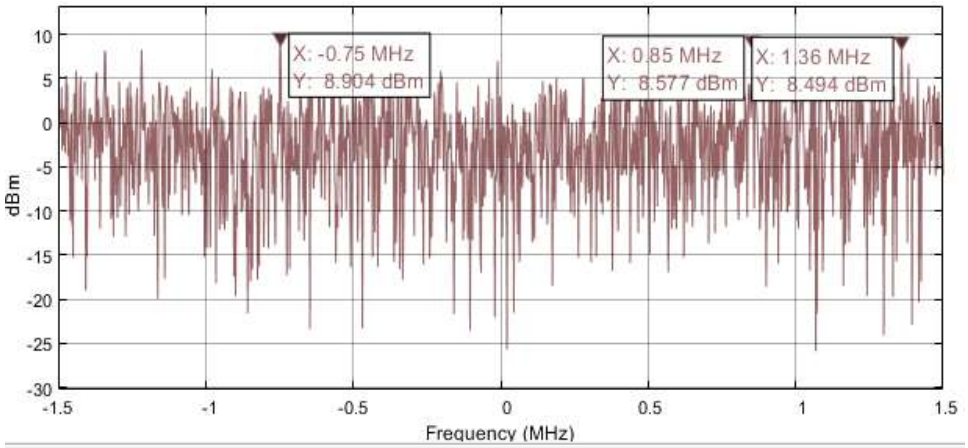


Figure III.18 : Signal après la modulation QPSK.

La figure III.19 et III.20 représente la densité spectrale de puissance du signal OFDM à l'entrée et la sortie du canal (AWGN), successivement, On observe que, dans ce spectre existe des composantes fondamentales à la fréquence 0.92 MHz et 1.87 MHz. On observe aussi autres harmoniques qui représentent le bruit.

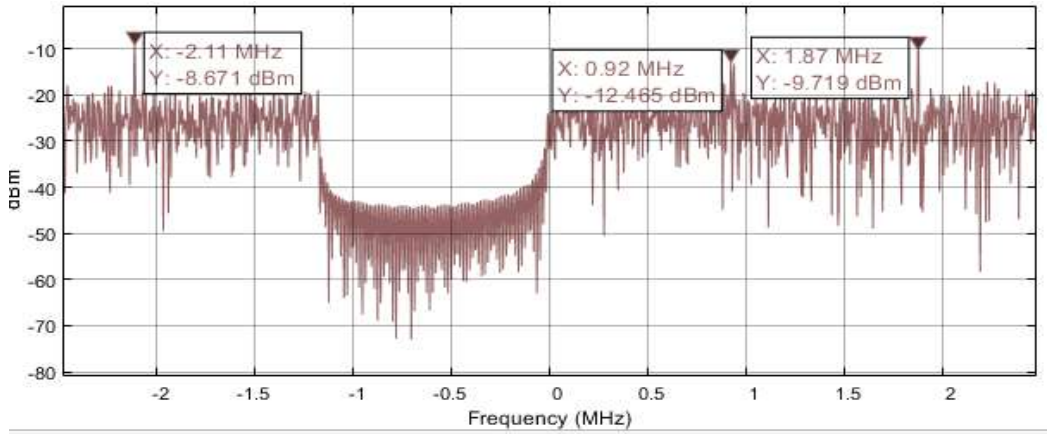


Figure III.19 : Représentation spectrale du signal OFDM à l'entrée du canal(AWGN).

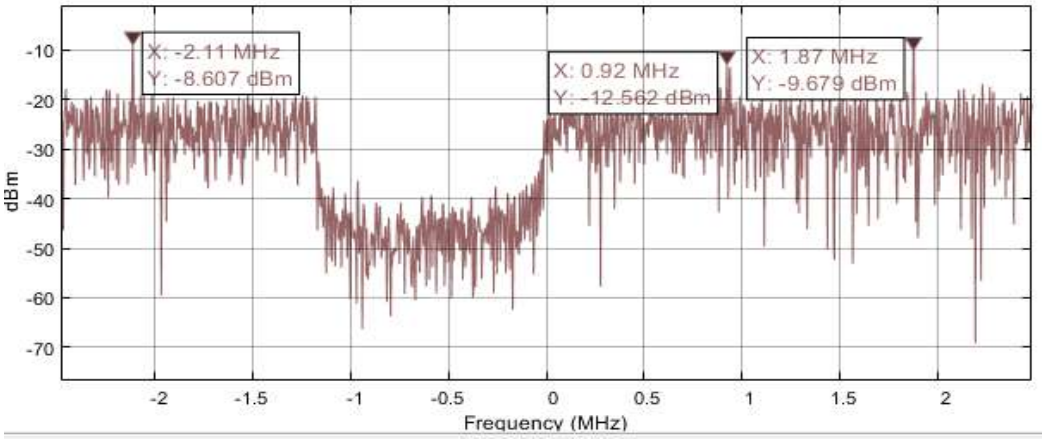


Figure III.20 : Représentation spectrale du signal OFDM à la sortie du canal(AWGN).

A ce niveau on peut visualiser les sous-porteuses à l'entrée du canal :

- Chaque composante fondamentale représente une sous-porteuse.
- Les 3 composantes fondamentales à grande amplitude représentent les sous-porteuses pilotes.
- La composante fondamentale à faible amplitude représente la sous-porteuse centrale.

3.5 Diagrammes de constellations

Le diagramme de constellation représente un signal modulé par modulation numérique, telle que la modulation à saut de phase (PSK). Cette représentation est située dans un graphe à deux dimensions, et son axe définit le plan complexe au moment où le symbole est échantillonné. Le point dans le plan complexe est l'image du symbole qui apparaît à l'instant donné, qui est produit par la modulation. Le diagramme de constellation peut être utilisé pour identifier le type d'interférence ou de distorsion dans le signal.

Les figures suivantes représentent les constellations du signal d'entrée et sortie, générée par le modulateur QPSK. On remarque que, dans la constellation transmis, il y a exactement quarte point de constellation qui représente la quarte états de modulation QPSK, ces points ont les amplitudes avec phases différents de$\frac{\pi}{4}$.

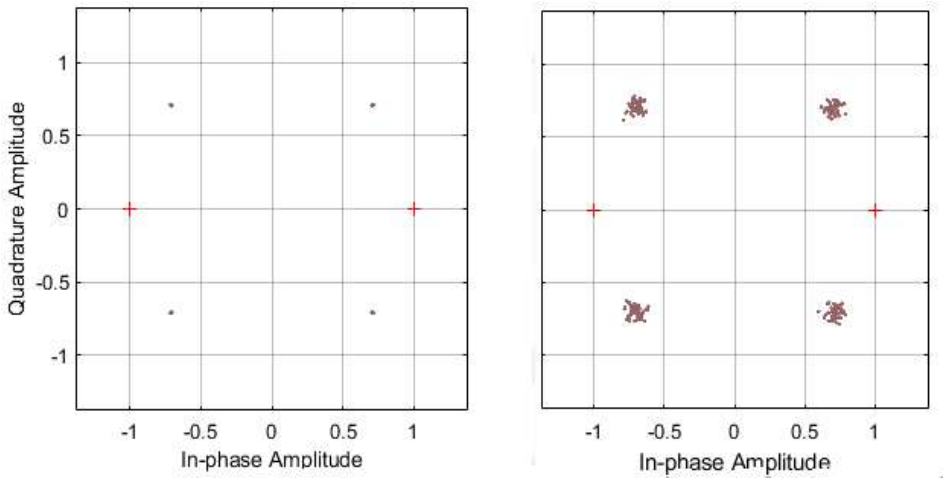


Figure III.21 : QPSK (constellation transmis à gauche, constellation reçus à droite).

3.6 Résultat de simulation pour la performance BER

Le nombre des bits erronés est égale à 0 à la valeur de SNR=30db

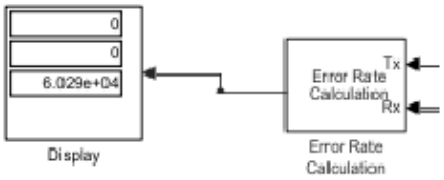


Figure III.22 : le taux d'erreur binaire.

Le tableau ci-dessous représente les différentes valeurs de BER en fonction SNR.

Tableau III.1**:** BER vs. SNR

SNR	BER	SNR	BER	SNR	BER	SNR	BER	SNR	BER
0	0.4282	**7**	0.3248	**14**	0.1414	**21**	0.0083	**28**	0
1	0.4176	**8**	0.3012	**15**	0.1186	**22**	0.0027	**29**	0

2	0.4053	**9**	0.2823	**16**	0.0927	**23**	5.22E-4	**30**	0
3	0.3904	**10**	0.2579	**17**	0.0691	**24**	0		
4	0.3764	**11**	0.2307	**18**	0.0447	**25**	0		
5	0.3597	**12**	0.2003	**19**	0.0303	**26**	0		
6	0.3435	**13**	0.1738	**20**	0.0171	**27**	0		

On obtient la figure III.23 qui présente le taux d'erreurs binaire BER en fonction de rapport signal sur bruit SNR de 0-30 dB. À partir de cette figure, On observe que quand le SNR augmente, le BER diminue.

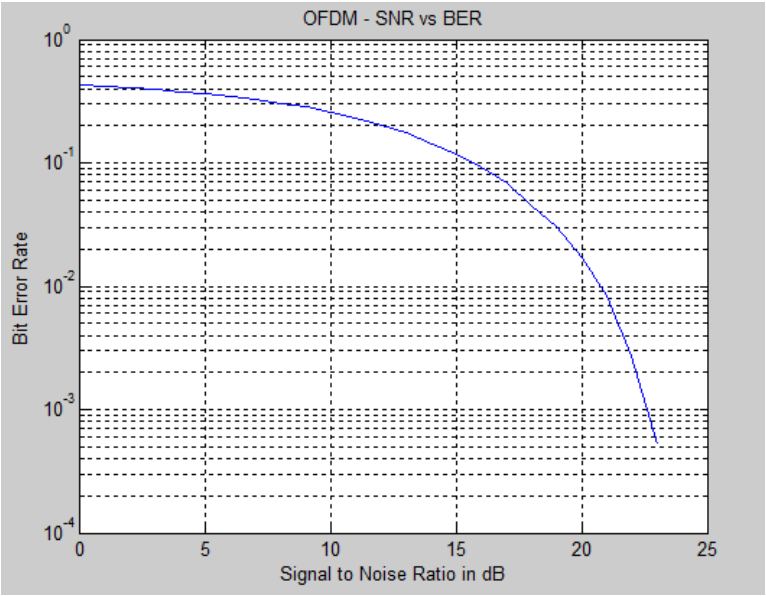


Figure III.23: BER en fonction SNR (OFDM).

4. Réalisation de la chaine de transmission FBMC sous Simulink

La chaine de transmission équivalente sous Simulink dans la figure suivante :

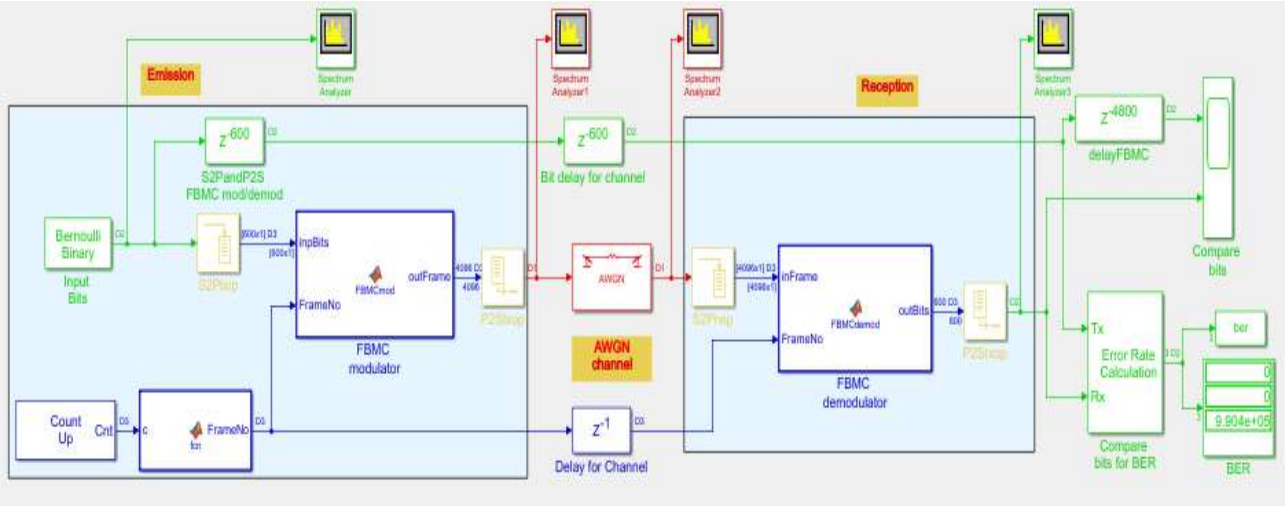


Figure III.24 : La chaine de transmission FBMC sous Simulink.

4.1 Description détaillé sur le programme de la modulation FBMC

Dans La partie d'émission, il y a :

- Initialisation : déclaration des paramètres d'initialisation. Le nombre d'échantillonnage par symbole et le nombre des sous-canaux, facteur de chevauchement, et la langueur du prototype, …

numfft =1024, numGuards=212, numSymbols=200.

- Conception du filtre prototype : ce block déclare le filtre du prototype passe bas de type FIR (Filter Impulse Response) avec un facteur de chevauchement égal k=4.
- Data d'entrer qui se convertira du décimal au binaire et ses bits considérés comme les données d'entrée de notre chaine de transmission.
- La modulation d'entré QAM après un décalage au niveau de la partie imaginaire par rapport à la partie réelle.
- Du Transfer de block **:** Transformer de fourrier rapide inverse : en appliquant la transformée de fourrier rapide sur le signal pour se déplacer du domaine fréquentiel au domaine temporel par la commande IFFT.

- Les filtres polyphasés synthétisent SFB est représenté par la partie du banc des filtres identiques avec la partie théorique par les étapes du sur-échantillonnage et le filtre reforme les données du serial au parallèle S/P
- Effet de canal **:** Cette partie génère le bruit et l'additionne avec notre signal qui identifie le bruit blanc gaussien (AWGN) additif.

Dans La partie réception il y a :

- Les filtres polyphasés de la partie AFB sont représentés par la partie du banc des filtres identiques avec la partie théorique par les étapes du sur-échantillonnage et le filtre après la reformation des données parallèle au serial P/S.
- Transformer de fourrier rapide pour se déplacer du domaine temporel au domaine fréquentiel.
- Block de transformer **:** La démodulation au niveau de la réception de la modulation QAM et caractériser par la réception après reformation des bits set décoder au décimale et extraction, ensuite calcule du BER de notre chaine de transmission.

4.2 Les résultats d'exécution de programme FBMC

4.2.1 Les spectres de signal avant et après le canal AWGN

La figure III.25 Représente le signal FBMC à l'entrée du canal (AWGN) On remarque que, le signal présente une largeur de bande 20 GHz.

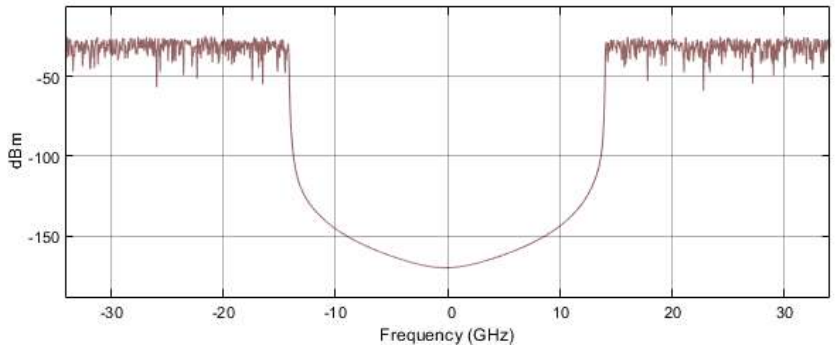


Figure III.25 : Représentation spectrale du signal FBMC à l'entrée du canal(AWGN).

Et la figure III.26 est Représente le signal FBMC à la sortie du canal (AWGN). On observe que le signal est bruité.

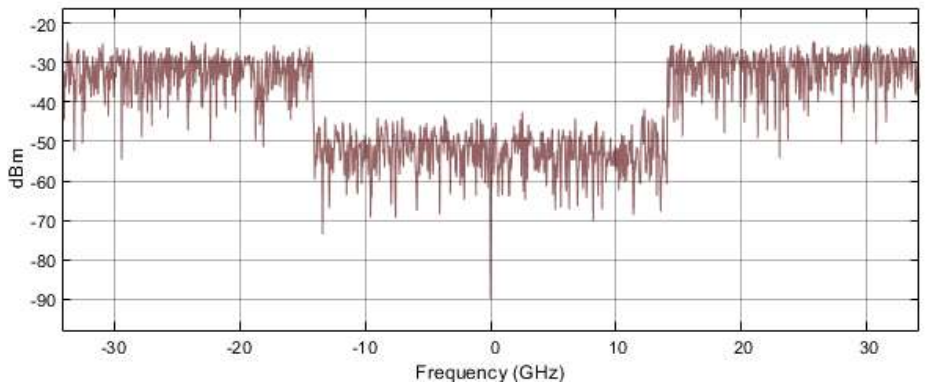


Figure III.26 : Représentation spectrale du signal FBMC à la sortie du canal(AWGN)

4.2.2 Résultats de comparateur des bits émis et des bits reçus

La figure suivant représente le signal des bits émié et reçus. On remarque que, les bits de signal émis et reçu sont les même.

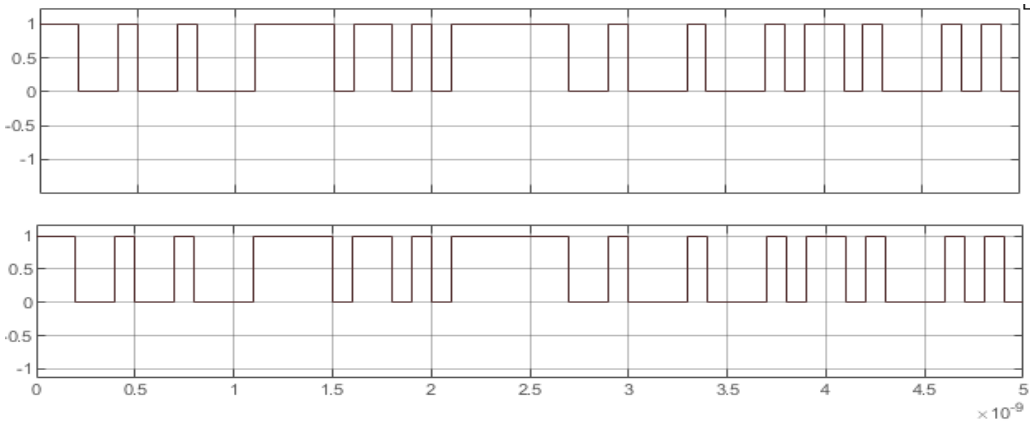


Figure III.27 : Résultats de comparateur des bits émis (en haut) et des bits reçus (en bas).

4.2.3 Résultats de simulation pour les performances BER du FBMC

La figure suivante présente le résultat de la simulation montrant la performance de la technique FBMC. Nous exprimons ces performances en termes de BER en fonction du SNR. (Voir les résultats dans les Annexes). On observe que quand le SNR augmente, le

BER diminue. En plus, On remarque que le SNR égale à 5dB pour BER 10^{-2}. Le BER égale à 0 à partir de 10 dB.

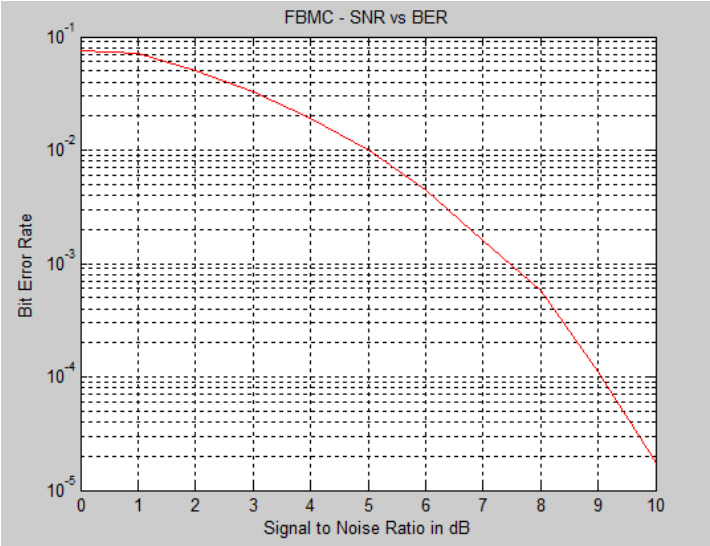


Figure III.28: BER en fonction SNR pour FBMC.

5. Rappel théorique [37]

5.1 Densité spectrale

La densité spectrale représente la force du signal sur une période de temps (c'est-à-dire) La bande passante possible des bits qui peuvent être envoyés avec succès.

5.2 Efficacité spectrale

Efficacité spectrale/efficacité spectrale ou efficacité de bande passante signifie non. Bits pouvant être transmis sur la bande passante. C'est le débit d'information qui peut être transmis sur une bande passante donnée dans un système de communication spécifique.

$$\eta_{FBMC} = \frac{m \times S}{S + K - \frac{1}{2}} \qquad (III.1)$$

6. Comparaison de OFDM avec FBMC

6.1 Comparaison BER vs SNR (OFDM et FBMC)

La variation du SNR affecte la qualité de la constellation. La simulation du BER vs SNR a été générée pour le SNR de 0 à 30 dB sur la Figure III.29.

Comme on peut le voir sur la Figure III.29 le FBMC a des meilleures performances par rapport au système OFDM point de vue BER, ce dernier démuni rapidement à zéro à partir de 10 dB.

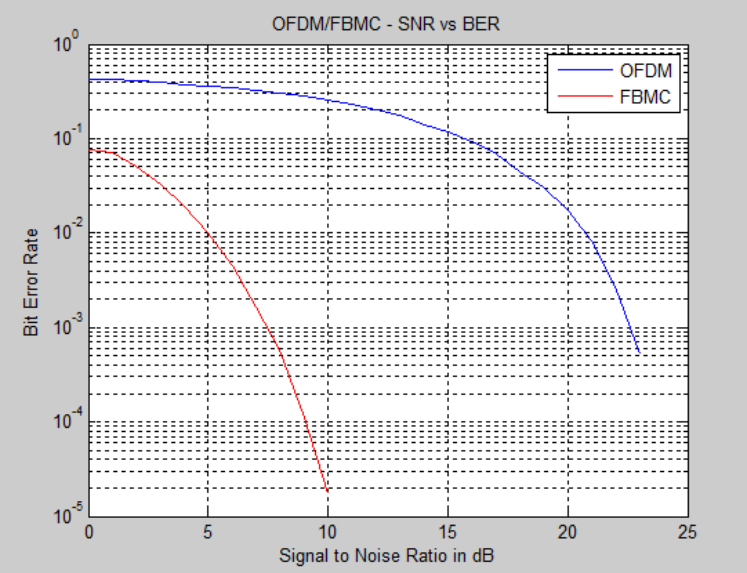


Figure III.29 : Comparaison d'OFDM/FBMC-SNR vs BER.

6.2 Comparaison de la densité spectrale

Nous Comparons dans la figure III.30, la densité spectrale de FBMC et OFDM. Dans la simulation nous traçons deux graphes en référence respectivement au même. La densité spectrale représente la force du signal sur une période de temps (c'est-à-dire la bande passante possible de bits qui peuvent être envoyés avec succès). La densité spectrale d'une modulation est efficace si la force est plus proche de la fréquence normalisée.

La zone ombrée rouge représente la densité spectrale de FBMC, et le bleu représente la densité spectrale d'OFDM. Comme on peut le voir sur la figure ci-dessus, la densité spectrale du FBMC est mieux que celle de l'OFDM. Par ce que la puissance de FBMC est inférieur à OFDM donc la FMBC économise l'énergie par rapport OFDM.

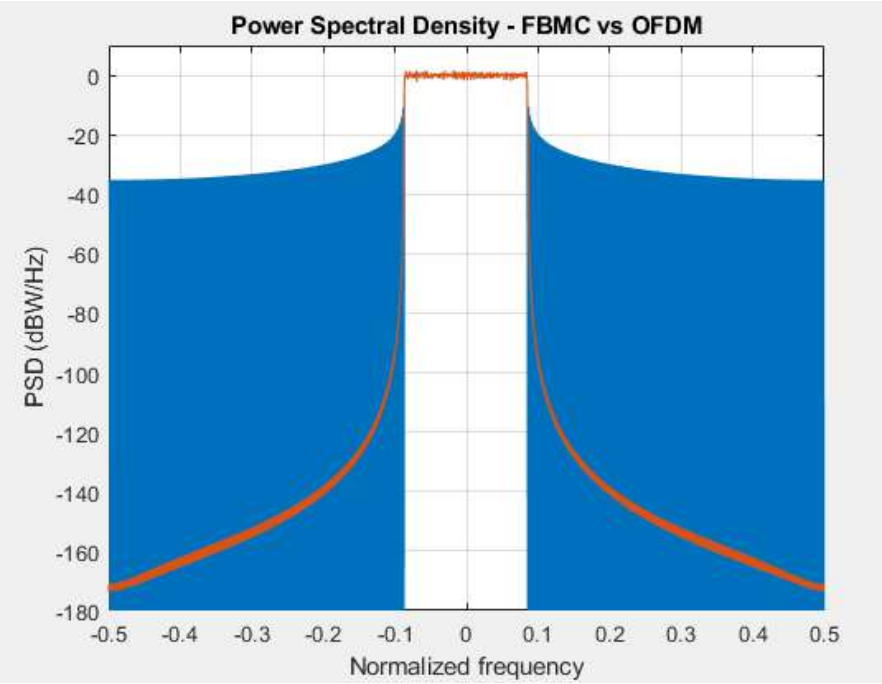


Figure III.30 : Densité spectrale de puissance FBMC vs OFDM.

6.3 Comparaison de l'efficacité spectrale

Comme on peut le voir sur la figure III.31 qui présente l'efficacité spectrale de l'OFDM et du FBMC. Les courbes sont générées par variation de '*Duration of Burst*' de 0 à 30. On peut observer que l'efficacité spectrale du FBMC augmente avec la '*Duration of Burst*' et devenir stable comme l'OFDM à 30 ms. En plus, on remarque que, l'OFDM surpasse le FBMC en terme de l'efficacité spectrale.

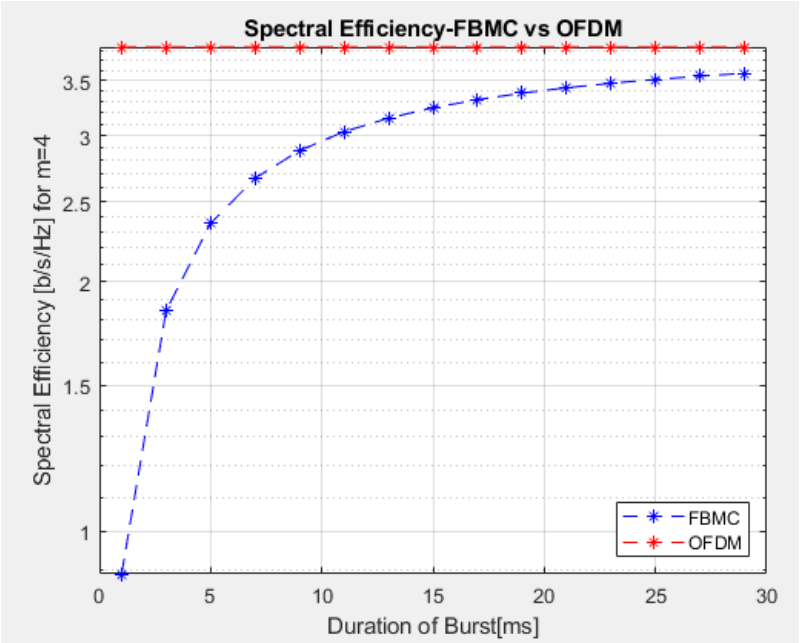


Figure III.31 : Efficacité spectrale FBMC vs OFDM.

7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation d'une chaine de transmission OFDM et FBMC sous l'environnement Simulink de Matlab. Nous avons effectué une comparaison de BER et efficacité spectrale. À partir des résultats de simulation effectuée nous pouvons conclure que la technique FBMC présente des caractéristiques un peu meilleures par rapport à OFDM.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le débit, la capacité et la vitesse de transmission des systèmes sont toujours les besoins que l'on veut améliorer. Au cours de cette mémoire nous avons tenté de répondre à des problèmes majeurs qui se posent pour le standard actuel (4G) et proposé des solutions efficaces à ces limitations envers les applications du future standard (5G). Nous avons présenté, le système de communication sans fils, Caractéristiques des systèmes sans fil 5G, la communication multi porteuse et leur Principe. Après nous avons expliqué la technique OFDM, qui est une technique de modulation utilisée dans les communications 4G et 5G, nous avons expliqué aussi leur principe de fonctionnent et ces avantages et inconvénients. Après nous avons vu les nouvelles formes d'onde qui sont utilisés dans le standard 5G comme FBMC, UFMC et GFDM ainsi que leur principes, avantages et inconvénients avec une petite comparaison avec l'OFDM.

Notre travaille Dans ce projet de fin d'étude est basé sur, la comparaison des performances entre la technique de modulation multi porteuse OFDM la plus utilisé et une technique moins connue FBMC en termes de leur principe de fonctionnement. Nous avons comparé ces technologies pour analyser les avantages de chaque technologie candidate, la densité spectrale de puissance, l'efficacité spectrale et le taux d'erreur binaire pour évaluer les performances de chacune.

Nous avons expliqué la couche physique de ces techniques. C'est-à-dire les chaines des communications Ainsi que nous avons réalisé ces communications sous le simulateur MATLAB/Simulink. De plus nous avons représenté les résultats sous forme de spectres dans le domaine fréquentiel. Nous remarquons d'après les résultats que les données reçues et les mêmes que les données émises pour les deux liaisons.

Ces résultats de simulation montrent que FBMC donne une amélioration globale de la performance par rapport à OFDM classique pour tous les paramètres considérés, prouvant FBMC comme un candidat idéal pour le développement futur des communications sans fil. Dans de futurs travaux, nous espérons étendre nos recherches sur la technologie FBMC pour mettre en évidence d'autres facteurs importants dans la recherche sur les masques spectraux, qui ne sont pas pris en compte ici afin de mener des recherches basées sur cette nouvelle technologie.

.

Bibliographie

Bibliographie

[1] REZGUI BADREDDINE. « étude Conception d'un système de communication sans fils multi-porteuses à base de Bancs de filtres FBMC» ; UNIVERSITE DE L'ARBI BEN M'HIDI D'OUM EL BOUAGHI FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEES DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE; Année 2018/2019.

[2] JOHN Terry and JUHA Heiskala. OFDM Wireless LANs : A Theoretical and Practical Guide. Sams Publishing, 2002.

[3] **https://www.cisco.com/c/fr_ca/solutions/what-is-5g.html**. Le site consulté en 2021.

[4] **https://www.gemalto.com/france/telecom/inspiration/5g 19/06/2019.** Le site consulté en 2021.

[5] BENDAHMANE Amira Meriem ; Ghermoul Rania. (2017 /2018) Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC''Mémoire , université de tlemcen.

[6] **https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/technologies-de-l information-th9/techniques-et-systemes-de-transmission-en-reseaux-et-telecoms-42293210/transmission-des-signaux-numeriques-e7100/. Le site consulté en 2021.**

[7] DAOUD Khedidja ; '' SIMULATION COMPARATIVE DES TECHNIQUES FBMC ET OFDM POUR LES RESEAUX 5G '' ; université de tlemcen faculté de technologie département de telecommunication ;Juin 2016.

[8] ASSIA Lila. "Etude et simulation de system Mimo a multiplexage spatial associe a la technique MC-CDMA ", Laboratoire de Télécommunications, Université Abou bekrBelkaid, Tlemcen, 13 février 2014.

[9] BENYAROU. Mourad. " Optimisation des systèmes multi-antennes appliqués aux systèmes MC CDMA», Université Abou BekrBelkaid, Thèse de Doctorat En Sciences, Laboratoire de Télécommunications-Tlemcen, Année2012- 2013.

[10] Roger Dib "Conception et Validation d'un simulateur de system OFDM pour les réseaux intérieurs sans fil ", École De Technologie Supérieure Université de Québec, 28 Avril 2003.

[11] BENHAMMOU Fatiha, BENCHIKH Dalal,"Etude d'une Chaine de Transmission Numérique En Bande Base", Université de Tlemcen, Laboratoire de Télécommunications, Année 2010.

[12] ELHADJI Mansour Fall. "Conception D'un amplificateur RF Agile En CMOS Pour Les Futures Générations De La Téléphonie Mobile ", Université Québec, Mars 2012.

[13] DAACHI Dalila. « étude des systémes MIMO-OFDM communication sans fil » ; UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ; 2011-2012.

[14] BENSENOUCI Salima , BENSABER .Habiba Bochra, " Evaluation d'un système de communication FBMC", Université ABOUBAKR BELKAÏD– Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE, Année 04 ; juillet 2019.

[15 Brahim ELMAROUD ; « Analyse des performances etamélioration des systèmes FBMC dans les transmissions sans fil non linéaires et asynchrones » ; UNIVERSITÉ MOHAMMED V FACULTÉ DES SCIENCES Rabat ; THÈSE DE DOCTORAT ; 25 Juin 2016.

[16] TOUHAMI Ridha. « developpement d'un model OFDM pour la 4eme generation du mobile de communication » université ferhat abbas setif UFAS algerie ; magister electronique.

[17] https://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/32ad7cff-b81d-47bc-bbe0-

ed1858459d94. Le site consulté en 2021.

[18] SLIMANI Hassen, SAIAHI Youcef. "Compensation des distorsions dans un système OFDM sous différent types modulations numériques". Thèse de Master d'Université MOHAMED BOUDIAF_ M'SILA_ FACULTE DE TECHNOLOGIE. Année 2018. 67 p.

[19] MAHARIMANANA Léonie Elsa. “ETUDE DE LA MODULATION GFDM ET DE LA TECHNIQUE D’ACCES NOMA DU RESEAU 5G“. Thèse de Master d’Université D’ANTANANARIVO_ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE. Année Mardi 28 Mars 2017. 101p.

[20] GRUYER, P., & PAILLARD, S. (2005). Mod{é}lisation d’un modulateur et d{é}modulateur OFDM. Universit{é} de Bretagne, 12, 1–22.

[21] MELLE NACER BET Ghania, MELLE GUEZOUI Zahia. “Application d’un réseau de neurones pour la réduction des distorsions de non linéarités dans une transmission multi porteuses O.F.D.M“. Thèse de Master d’Université MOULOUD.

[22] Youcefi.Abdessamad, Mazouni.Ibrahim ," Les différentes formes d'ondes candidates dans les applications 5G",Université 8Mai 1945– Guelma Faculté des sciences et de la Technologie Département d’Electronique et Télécommunications, Année juillet 2019.

[23] Kaur, S., Kansal, L., Gaba, G. S., & Safarov, N. (2018). Survey of Filter Bank Multicarrier (FBMC) as an efficient waveform for 5G. International Journal of Pure and Applied Maathematics, 118(7), 45–49. http://www.ijpam.eu.

[24] Bellanger, M. (2010). FBMC Physical Layer: A Primer. PHYDYAS, January, 1–31. http://www.ict-phydyas.org/teamspace/internal-folder/FBMC-Primer_06-2010.pdf.

[25] https://nl.mathworks.com/help/comm/examples/fbmc-vs-ofdm-modulation.html. . Le site consulté en 2021.

[26] https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01635877 Submitted on 15 Nov 2017. Le site consulté en 2021.

[27] DALI.Amina, BOUAFIA.Zineb," Étude énergétique de la forme d’ondes multi porteuses à base de banc de filtres", Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –Faculté de TECHNOLOGIE, Année 19 ;juin 2017.

[28] HACINI. Khaled , ABADELIA. Anes," Egaliseur LTE-LMS avec différentes modulations ",Université 8Mai 1945– Guelma Faculté des sciences et de la Technologie Département d'Electronique et Télécommunications, Année juillet 2019.

[29] Ramadhan, A. J. (2017). Implementation of 5G FBMC PHYDYAS prototype filter. International Journal of Applied Engineering Research, 12(23), 13476–13481.

[30] Viholainen, A., Bellanger, B., & Huchard, M. (2009). Prototype Filter and Structure Optimization. PHYDYAS – PHYsical Layer for DYnamic AccesS and Cognitive Radio , D5(1), 1–102. http://www.ict-phydyas.org/delivrables.

[31] An, C., Kim, B., & Ryu, H.-G. (2016). Waveform Comparison and Nonlinearity Sensitivities of FBMC, UFMC and W-OFDM Systems. 83–90. https://doi.org/10.5121/csit.2016.61508.

[32] KERRICHE Noura, KEDIDAH Meriem. "Comparaison de la modulation UFMC de la 5ème génération avec la modulation multi-porteuses OFDM". Thèse de Master d'Université SAAD DAHLAB_BLIDA_Faculté de Technologie. Année 2018. 57p.

[33] Marwa CHAFII. "Étude d'une nouvelle forme d'ondes multi porteuses à PAPR réduit ". THÈSE DE DOCTORAT d'École doctorale Matisse. ANNÉE 2016, 159 p.

[34] BENAZOUT Nassiba. "Etude et simulation de la technique multi porteuses GFDM". Thèse de Master d'Université SAAD DAHLAB_ BLIDA_Faculté de Technologie. Année 2018. 50 p.

[35] SADOU Bachir, ALQUDAMI Dheya Alhaq. "Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobile 5G et 6G de nouvelle génération". Thèse de Master. Année 2020. 73p.

[36] www.electronics- articles/radio/modulation/quadrature-amplitude-modulation.

[37] F. Schaich and T. Wild, "Waveform contenders for 5G — OFDM vs. FBMC vs. UFMC," Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), 2014 6th International Symposium on , Athens, 2014, pp. 457-460.

Annexes

Annexes

1. Programme d'OFDM BER vs SNR

```
SNR=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
    12 13 14 15 16 17 18 19 20
    21 22 23 24 25 26 27 28 29 30];
 BER=[0.4282 0.4176 0.4053 0.3904 0.3764 0.3597 0.3435 0.3248
0.3012
    0.2823 0.2579 0.2307 0.2003 0.1738 0.1414 0.1186 0.0927 0.0691
    0.0447 0.0303 0.0171 0.0083 0.0027 5.22E-4 0 0 0 0 0 0 0];
plot(SNR,BER)
semilogy(SNR,BER)
xlabel('Signal to Noise Ratio in dB');
ylabel('Bit Error Rate');
title ('OFDM - SNR vs BER');
grid
```

1. Programme de FBMC pour la chaine de transmission

```
%This code is the mother code for the simulink model
%This is a slightly modified version of the
%'FBMC-vs-OFDM-modulation' help example in MATLAB
%https://www.mathworks.com/help/comm/examples/fbmc-vs-ofdm-
modulation.html

    clear all; close all; clc;
    numFFT = 2^11;            % Number of FFT points
     numGuards = 212;          % Guard bands on both sides
     K = 4;                    % Overlapping symbols, one of 2, 3,
or 4
    numSymbols = 10;         % Simulation length in symbols
     bitsPerSubCarrier = 2;    % 2: 4QAM, 4: 16QAM, 6: 64QAM, 8:
256QAM

%Prototype Filter
    HkOneSided = [0.971960 sqrt(2)/2 0.235147];
    Hk = [fliplr(HkOneSided) 1 HkOneSided];

% QAM symbol mapper
    qamMapper = comm.RectangularQAMModulator(...
          'ModulationOrder', 2^bitsPerSubCarrier, ...
          'BitInput', true, ...
          'NormalizationMethod', 'Average power');

% Transmit-end processing
%   Initialize arrays
```

```
    L = numFFT-2*numGuards;  % Number of complex symbols per OFDM
    symbol
    KF = K*numFFT;
    KL = K*L;
    dataSubCar = complex(zeros(L, 1));
    dataSubCarUp = complex(zeros(KL, 1));

    numBits = bitsPerSubCarrier*L/2;    % account for oversampling
    by 2
    inpData = zeros(numBits, numSymbols);
    rxBits = zeros(numBits, numSymbols);
    txSigAll = complex(zeros(KF, numSymbols));
    symBuf = complex(zeros(2*KF, 1));

% Loop over symbols
    for symIdx = 1:numSymbols

% Generate mapped symbol data
        inpData(:, symIdx) = randi([0 1], numBits, 1);
        modData = qamMapper(inpData(:,symIdx));

% OQAM Modulator: alternate real and imaginary parts
        if rem(symIdx,2)==1     % Odd symbols
            dataSubCar(1:2:L) = real(modData);
            dataSubCar(2:2:L) = 1i*imag(modData);
        else                    % Even symbols
            dataSubCar(1:2:L) = 1i*imag(modData);
            dataSubCar(2:2:L) = real(modData);
        end

        % Upsample by K, pad with guards, and filter with the
    prototype filter
        dataSubCarUp(1:K:end) = dataSubCar;
        dataBitsUpPad = [zeros(numGuards*K,1); dataSubCarUp;
    zeros(numGuards*K,1)];
        X1 = filter(Hk, 1, dataBitsUpPad);
        % Remove 1/2 filter length delay
        X = [X1(K:end); zeros(K-1,1)];

        % Compute IFFT of length KF for the transmitted symbol
        txSymb = fftshift(ifft(X));

        % Transmitted signal is a sum of the delayed real, imag
    symbols
        symBuf = [symBuf(numFFT/2+1:end);
    complex(zeros(numFFT/2,1))];
        symBuf(KF+(1:KF)) = symBuf(KF+(1:KF)) + txSymb;

        currSym = complex(symBuf(1:KF));
        % Store transmitted signals for all symbols
        txSigAll(:,symIdx) = currSym;
    end

    % QAM demodulator
    qamDemod = comm.RectangularQAMDemodulator(...
        'ModulationOrder', 2^bitsPerSubCarrier, ...
```

```
        'BitOutput', true, ...
        'NormalizationMethod', 'Average power');

    % Process symbol-wise
    for symIdx = 1:numSymbols
        rxSig = txSigAll(:, symIdx);
        % Perform FFT
        rxf = fft(fftshift(rxSig));

        % Matched filtering with prototype filter
        rxfmf = filter(Hk, 1, rxf);
        % Remove K-1 delay elements
        rxfmf = [rxfmf(K:end); zeros(K-1,1)];
        % Remove guards
        rxfmfg = rxfmf(numGuards*K+1:end-numGuards*K);

        % OQAM post-processing
        %  Downsample by 2K, extract real and imaginary parts
        if rem(symIdx,2)==1
            % Imaginary part is K samples after real one
            r1 = real(rxfmfg(1:2*K:end));
            r2 = imag(rxfmfg(K+1:2*K:end));
            rcomb = complex(r1, r2);
        else
            % Real part is K samples after imaginary one
              r1 = imag(rxfmfg(1:2*K:end));
              r2 = real(rxfmfg(K+1:2*K:end));
              rcomb = complex(r2, r1);
          end
          %  Normalize by the upsampling factor
          rcomb = (1/K)*rcomb;

          % Demapper: Perform hard decision
          rxBits(:, symIdx) = qamDemod(rcomb);
      end
      %rxBits([511:520],10)'
      %inpData([511:520],2)'
      %Delay by 8 frames, or, 8x600=4800 bits

      Sft=bitsPerSubCarrier*KL/L;
      inpComp=inpData(:,[1:numSymbols-Sft]);
      outComp=rxBits(:,[Sft+1:numSymbols]);
      tf=isequal(inpComp,outComp)
```

3. Programme de FBMC modulation bloc

```
function outFrame = FBMCmod(inpBits,FrameNo)
coder.extrinsic('assignin','evalin');
numFFT = 1024;              % Number of FFT points
numGuards = 212;            % Guard bands on both sides
K = 4;                      % Overlapping symbols, one of 2, 3, or 4
bitsPerSubCarrier = 2;      % 2: 4QAM, 4: 16QAM, 6: 64QAM, 8: 256QAM
 %Prototype Filter
```

```
HkOneSided = [0.971960 sqrt(2)/2 0.235147];
Hk = [fliplr(HkOneSided) 1 HkOneSided];

% QAM symbol mapper
qamMapper = comm.RectangularQAMModulator(...
    'ModulationOrder', 2^bitsPerSubCarrier, ...
    'BitInput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power');
%   Initialize arrays
L = numFFT-2*numGuards;  % Number of complex symbols per OFDM
symbol
%numBits = bitsPerSubCarrier*L/2;    %oversampling by 2 (= L =
600)
dataSubCar = complex(zeros(L, 1));
KL = K*L;
dataSubCarUp = complex(zeros(KL, 1));
KF = K*numFFT;
% Generate mapped symbol data
modData = qamMapper(inpBits);
% OQAM Modulator: alternate real and imaginary parts
if rem(FrameNo,2)==1     % Odd symbols
    dataSubCar(1:2:L) = real(modData);
    dataSubCar(2:2:L) = 1i*imag(modData);
else                     % Even symbols
    dataSubCar(1:2:L) = 1i*imag(modData);
    dataSubCar(2:2:L) = real(modData);
end
% Upsample by K, pad with guards, and filter with the prototype
filter
dataSubCarUp(1:K:end) = dataSubCar;
dataBitsUpPad = [zeros(numGuards*K,1); dataSubCarUp;
zeros(numGuards*K,1)];
X1 = filter(Hk, 1, dataBitsUpPad);
X = [X1(K:end); zeros(K-1,1)]; % Remove 1/2 filter length delay
% Compute IFFT of length KF for the transmitted symbol
txSymb = fftshift(ifft(X));
% Transmitted signal is a sum of the delayed real, imag symbols
```

```
symBuf = complex(zeros(2*KF, 1));
symBuf = evalin('base','WSsymBuf'); %Load from workspace
symBuf = [symBuf(numFFT/2+1:end); complex(zeros(numFFT/2,1))];
symBuf(KF+(1:KF)) = symBuf(KF+(1:KF)) + txSymb;
assignin('base','WSsymBuf',symBuf); %Save to workspace for next
frame
 outFrame = complex(symBuf(1:KF));
```

4.Programme de FBMC démodulation bloc

```
function outBits = FBMCdemod(inFrame,FrameNo)
 numFFT = 1024;            % Number of FFT points
numGuards = 212;          % Guard bands on both sides
K = 4;                    % Overlapping symbols, one of 2, 3, or 4
bitsPerSubCarrier = 2;    % 2: 4QAM, 4: 16QAM, 6: 64QAM, 8: 256QAM
 % Prototype filter
HkOneSided = [0.971960 sqrt(2)/2 0.235147];
Hk = [fliplr(HkOneSided) 1 HkOneSided];
 % QAM demodulator
qamDemod = comm.RectangularQAMDemodulator(...
    'ModulationOrder', 2^bitsPerSubCarrier, ...
    'BitOutput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power');
% Perform FFT
rxf = fft(fftshift(inFrame));
% Matched filtering with prototype filter
rxfmf = filter(Hk, 1, rxf);
% Remove K-1 delay elements
rxfmf = [rxfmf(K:end); zeros(K-1,1)];
% Remove guards
rxfmfg = rxfmf(numGuards*K+1:end-numGuards*K);
% OQAM post-processing
%  Downsample by 2K, extract real and imaginary parts
if rem(FrameNo,2)==1
    % Imaginary part is K samples after real one
    r1 = real(rxfmfg(1:2*K:end));
    r2 = imag(rxfmfg(K+1:2*K:end));
    rcomb = complex(r1, r2);
```

```
else
    % Real part is K samples after imaginary one
    r1 = imag(rxfmfg(1:2*K:end));
    r2 = real(rxfmfg(K+1:2*K:end));
    rcomb = complex(r2, r1);
end
%  Normalize by the upsampling factor
rcomb = (1/K)*rcomb;
% Demapper: Perform hard decision
outBits = qamDemod(rcomb);
```

5. Programme FBMC BER vs SNR

```
SNR=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20  21 22
23 24 25 26 27 28 29 30];
BER=[0.075467 0.071467 0.050278 0.0325 0.019332 0.010017 0.0045139
0.0016146 0.0005816 0.00011285 1.7361e-05  0 0 0  0  0  0  0  0  0
0  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

semilogy(SNR,BER,'r')
xlabel('Signal to Noise Ratio in dB');
ylabel('Bit Error Rate');
title ('FBMC - SNR vs BER')
 grid on
```

6. programme OFDM/FBMC - SNR vs BER

```
SNR=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20  21 22
23 24 25 26 27 28 29 30];
 BER1=[0.4282  0.4176 0.4053 0.3904 0.3764 0.3597 0.3435 0.3248
0.3012 0.2823 0.2579 0.2307 0.2003 0.1738 0.1414 0.1186 0.0927
0.0691 0.0447 0.0303 0.0171 0.0083 0.0027 5.22E-4 0 0 0 0 0 0 0];
BER2=[0.075467 0.071467 0.050278 0.0325 0.019332 0.010017
0.0045139 0.0016146 0.0005816 0.00011285 1.7361e-05  0 0 0  0  0
0  0  0  0  0  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

semilogy(SNR,BER1)
hold on
semilogy(SNR,BER2,'r')
xlabel('Signal to Noise Ratio in dB');
ylabel('Bit Error Rate');
title ('OFDM/FBMC - SNR vs BER')
legend('OFDM','FBMC')
grid on
```