



République Algérienne démocratique et populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologies



Filière : Génie électrique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Télécommunication

Spécialité : Système de Télécommunication

Par : Korichi Khaled et Moussaoui Salah Eddine

Sujet

**Analyse des performances de FBMC dans un
système de transmission sans fil**

Devant le jury composé de :

M. TOUHAMI Redha	MAA	Président
M. AJGOU Riadh	MCA	Examineur
M. KHELIL Abdellatif	MCB	Encadreur

2018/2019

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que :

Je dédie ce mémoire à :

A ma famille

A mes chers parents qui ont sacrifié leurs vies pour ma réussite et m'ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux J'espère qu'un jour, Je pourrai leur rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que Dieu leur prête bonheur et longue vie.

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

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

Remerciement

*Tout d'abord nous remercions **ALLAH** le tout puissant pour ces Faveurs et ses bontés, de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de terminer ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier très chaleureusement Monsieur **Dr. Khalil Abdellatif** qui m'a permis de bénéficier de son encadrement. Sa disponibilité, son soutien, ses précieux conseils, ses remarques pertinentes, ainsi que ses explications ont été déterminants dans la réalisation de ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements au **membre de jury**. Veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance.*

Je profite cette opportunité pour remercier l'ensemble des enseignants de notre département de télécommunication pour toutes les connaissances acquises dans le domaine des Télécommunications grâce à leur concours.

Dans l'impossibilité de citer tous les noms, mes sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont permis par leurs conseils et leurs compétences la réalisation de ce mémoire.

Résumé

La technique de transmission multi porteuses OFDM utilisée dans la 4G souffre de plusieurs inconvénients qui empêchent son utilisation dans un contexte de réseaux mobiles 5G. La FBMC utilise un schéma de modulation différent et un filtre prototype pour conserver les avantages de l'OFDM et améliorer ses points faibles. L'objectif de ce mémoire est d'analyser les performances d'une transmission sans fil via la technique multi porteuse FBMC, et comparer les résultats obtenus avec la technique classique OFDM. Dans ce travail, nous commençons par les exigences de la 5ème génération (5G). Ensuite, nous entamons les modulations multi-porteuses OFDM et FBMC. En fin, une comparaison basée sur le BER et la DSP entre OFDM et FBMC-OQAM est effectuée. Les différents résultats ont été simulés sous logiciel MATLAB.

Mots clés : 5G, OFDM, FBMC, OQAM.

Abstract

The OFDM multi-carrier transmission technique used in 4G suffers from several disadvantages that prevent its use in a context of 5G mobile networks. The FBMC uses a different modulation scheme and a prototype filter to retain the advantages of OFDM and improve its weak points. The purpose of this thesis is to analyze the performance of a wireless transmission via the FBMC multi-carrier technique, and to compare the results obtained with the classic OFDM technique. In this work, we start with the requirements of the 5th generation (5G). Then, we expose the OFDM and FBMC multi-carrier modulations. Finally, a comparison based on the BER and the DSP between OFDM and FBMC-OQAM is performed. The different results were simulated under MATLAB software.

Key words: 5G, OFDM, FBMC, OQAM.

ملخص

تُعاني تقنية الإرسال متعدد الموجات OFDM المستخدمة في شبكات الجيل الرابع (4G) من عيوب متعددة تمنع استخدامها في شبكات المحمول (5G). يستخدم FBMC نظام تضمين مختلف ومرشح نموذجي للاحتفاظ بمزايا OFDM وتحسين نقاط ضعفه. الغرض من هذه المذكرة هو تحليل أداء الإرسال اللاسلكي عبر تقنية FBMC متعددة الموجات الحاملة، ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع نتائج تقنية OFDM الكلاسيكية. في هذا العمل، نبدأ بمتطلبات الجيل الخامس (5G). ثم نعرض التضمينات متعددة الموجات الحاملة OFDM و FBMC. أخيراً، يتم إجراء مقارنة تستند إلى BER و DSP بين OFDM و FBMC-OQAM. تم محاكاة النتائج المختلفة باستعمال برنامج MATLAB

الكلمات المفتاحية: 5G, OFDM, FBMC, OQAM.

Table des Matières

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Résumé.....	III
Abstract.....	IV
ملخص	V
Liste des Figures.....	IX
Liste des Tableaux.....	XI
Liste des Acronymes.....	XII
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Les exigences de la 5G.....	4
1.1. Introduction.....	5
1.2. Challenge de la 5G.....	5
1.3. Objectif de la 5G.....	5
1.4. La nouvelle architecture de la 5G.....	6
1.4.1. Une architecture cellulaire sans fil 5G	7
1.5. Les technologies utilisées dans la 5G.....	8
1.5.1. Les ondes millimétriques.....	8
1.5.2. Antennes intelligentes - MIMO et configuration du faisceau (beamforming)	9
1.5.3. Des cellules de plus en plus petites	10
1.5.4. Full Duplex	11
1.6. Formes d'ondes envisageables pour la 5G.....	12
1.6.1. GFDM.....	12
1.6.2. FBMC	12
1.6.3. UFMC.....	13
1.6.4. F-OFDM	14

1.7. Conclusion.....	15
Chapitre 2: Modulation multi-porteuse à base de bancs de filtres FBMC.....	16
2.1. Introduction.....	17
2.2. Modulation multi porteuse (MCM).....	17
2.3. Modulation multi porteuse OFDM.....	19
2.3.1. Schéma générale.....	19
2.3.2. Spectre OFDM :	20
2.3.3. L'orthogonalité	21
2.3.4. Ajout du préfixe cyclique/ suppression de préfixe cyclique.....	22
2.4. FBMC (Filter Bank Multi Carrier).....	23
2.4.1.Principe générale.....	23
2.4.2. Types de FBMC	24
2.5. OQAM-FBMC.....	27
2.5.1. Principe générale.....	27
2.5.2. Pré-traitement OQAM.....	29
2.5.3. Post-traitement OQAM	30
2.5.4. Analyse et synthèse par bancs de filtres	31
2.6. Les filtres prototypes.....	33
2.6.1. Le filtre PHYDYAS	33
2.6.2. Le filtre Hermite.....	34
2.6.3. Le filtre cosinus surélevé de la racine (RRC)	35
2.7. Conclusion.....	35
Chapitre 3 : Simulations et Résultats.....	36
3.1. Introduction.....	37
3.2. Modèle de simulation.....	37
3.3. Comparaison des performances de BER d'OFDM et FBMC.....	38
3.3.1. Paramètres de simulation.....	38

3.3.2. Le canal AWGN.....	38
3.3.3. Le canal Pedestrian A.....	39
3.3.4. Le canal Vehicular A.....	40
3.4. Comparaison des PSD d'OFDM et FBMC.....	41
3.4.1. Paramètres de simulation.....	41
3.4.2. Le filtre RRC OQAM.....	42
3.4.3. Le filtre PHYDYAS	42
3.4.4. Le filtre Hermite.....	43
3.5. Conclusion.....	44
Conclusion Générale.....	45
Références.....	47

Liste des Figures

Chapitre 1

Figure 1.1 les exigences de la 5G [1].....	6
Figure 1.2 Architecture cellulaire de la 5G [4].....	8
Figure 1.3 Massive MIMO[8]	10
Figure 1.4 Full Duplex[10].....	11
Figure 1.5 schéma bloc GFDM [11]	12
Figure 1.6 schéma bloc FBMC [11]	13
Figure 1.7 schéma bloc UPMC [11]	13
Figure 1.8 schéma bloc F-OFDM [11].....	14

Chapitre 2

Figure 2. 1 concept de multi-porteuse.....	17
Figure 2. 2 Le schéma général d'une transmission multi-porteuse [20].....	18
Figure 2. 3 a) porteuse disjointes, b) porteuses orthogonales chevauchées	19
Figure 2. 4 Schéma block OFDM [17].....	20
Figure 2. 5 Spectre OFDM[26].....	21
Figure 2. 6 Représentation de la nature orthogonale du spectre d'un signal OFDM [28]	21
Figure 2. 7 symbole OFDM avec CP	23
Figure 2. 8 Schéma block Filter Bank Multi Carrier FBMC[17].....	23
Figure 2. 9 configuration de synthèse-analyse (Transmultiplexer)	24
Figure 2. 10 Le diagramme équivalent d'un système FMT / FBMC en bande de base[29]	25
Figure 2. 11 Le diagramme équivalent d'un système CMT / FBMC en bande de base. [29]	26
Figure 2. 12 Le diagramme équivalent d'un système SMT / FBMC en bande de base. [29]	27
Figure 2.13 Structure générale de la technique FBMC/OQAM (partie émission/partie réception).	28
Figure 2. 14 Prétraitement OQAM	30
Figure 2. 15 Post-traitement OQAM.	31
Figure 2. 16 Banc de filtres à M canaux (a)banc d'analyse (b)banc de synthèse .[6].....	31

Chapitre 3

Figure 3. 1 Modèle de simulation.....	37
Figure 3. 2 Comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal AWGN	39
Figure 3. 3 Comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Pedestrian A.	40
Figure 3. 4 Comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Vehicular A	41

LISTE DES FIGURES

Figure 3. 5	Comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre RRC OQAM.....	42
Figure 3. 6	Comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre PHYDYAS OQAM	43
Figure 3. 7	Comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre Hermite OQAM	44

Liste des Tableaux

Table 3. 1	Paramètre de simulation	38
Table 3. 2	Les paramètres de simulation.	41

Liste des Acronymes

1G	Première Génération
2G	Deuxième Génération
3G	Troisième Génération
4G	Quatrième Génération
5G	Cinquième Génération
AFB	Analyses Filter Bank
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER.	Bit Error Rate
BS	Base Station
BSS	Base Station System
CP	Cyclic Préfixe
CP-OFDM	Cyclic Préfixe Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CMT	Cosine Modulated Multitone
DAS	Distributed Antenna System
FFT	Fast Fourier Transform
FBMC	Filter Bank Based Multicarrier
FDD	Frequency Division Duplex
FMT	Filtered Modulated Multitoned
F-OFDM	Filter OFDM
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing

LISTE DES ACRONYMES

ICI	Inter-Carrier Interference
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ISI	Inter-Symbol Interference
IOT	Internet Of Things
LTE	Long Term Evolution
MC	Multi-Carrier
MCM	Multi-Carrier Modulation
MIMO	Multiple Input Multiple Outputs
NFV	Network Functions Virtualization
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OOB	Out Of Band
OQAM	Offset Quadrature Amplitude Modulation
PHYDAS	Physical Layer For Dynamic Spectrum Access And Cognitive Radio
PPN	Polyphase Network
PSD	Power Spectral Density
RAN	Radio Access Network
RRC	Root Raised Cosine
SMT	Staggered Modulated Multitone
SFB .	Banc De Filtre De Synthèse
S/P	Serial To Parallel

LISTE DES ACRONYMES

SDN	Software Defined Networking
SNR	Signal-To-Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex
UFMC	Universal Filtered Multi Carrier
UE	User Equipment

Introduction Générale

De nos jours, les usages de technologie de communication sans fils se multiplient, les réseaux de télécommunication font face à une hétérogénéité d'usage sans précédent. Jusqu'ici, chaque génération (1G, 2G, 3G, 4G) de réseaux a été mise en œuvre en réponse à des usages spécifiques. Mais la 5G devra répondre à des besoins diversifiés. En effet, à côté des utilisateurs cellulaires classiques apparaissent de nouveau type d'objets communicants, où ce qui est désormais courant d'appeler l'Internet des Objets .

Le système des réseaux actuelles, basé sur une structure centralisée et parfaitement synchronisée, n'est pas en mesure de satisfaire les besoins hétérogènes des utilisateurs coexistant de manière non ordonnée et asynchrone. D'autre part, il est connu que la couche physique des réseaux actuels est basée sur la modulation OFDM qui souffre d'une très mauvaise localisation fréquentielle, et une résistance faible aux asynchronismes nécessitant donc que des mesures de resynchronisation soient mises en place par le réseau, généralement par un échange de signaux pilotes qui nuisent à l'efficacité spectrale du réseau.

Afin de dépasser les limitations de l'OFDM, un grand nombre de travaux de recherche se sont concentrés sur l'élaboration d'une nouvelle forme d'onde basée sur les bancs de filtres(FBMC), qui permet en plus de fournir des débits plus élevés, d'avoir une meilleure efficacité spectrale que l'OFDM. En d'autres termes, avec la FBMC, l'interférence du canal adjacent est réduite, par conséquent, plusieurs utilisateurs peuvent utiliser simultanément le spectre . Donc, la FBMC est mieux adaptée à la coexistence entre des utilisateurs asynchrones sur des bandes adjacentes. Ceci a poussé les chercheurs à proposer la FBMC-OQAM comme standard de la 5G pour les communications radio-mobiles.

La demande des nouveaux services et applications sans fil ainsi que l'augmentation rapide du nombre d'utilisateurs impose des contraintes de débit. Parmi les solutions étudiées pour répondre à ces contraintes de débit, on trouve les modulations multi porteuses : OFDM et FBMC.

Les principaux objectifs de ce mémoire sont l'étude et l'évaluation des performances de la FBMC-OQAM dans un canal sans fil. Une comparaison avec d'autres types de modulation multi-porteuse en particulier OFDM a été considérée.

Le travail présenté dans ce mémoire est subdivisé en trois chapitres. Dans le premier chapitre nous allons définir comment le monde est arrivé à la 5G ensuite nous allons décrire

une présentation complète sur l'architecture de la 5G et pour finir nous comparons entre la 4ième génération et la 5ième génération.

Dans le 2ème chapitre nous allons faire une étude de différentes variantes de la modulation FBMC, nous allons considérer des systèmes FBMC fonctionnant avec la modulation OQAM (Offset Quadrature Amplitude Modulation). Comme nous avons abordé le système OFDM. La modulation FBMC/OQAM réalise une mise en forme du signal modulé par l'utilisation d'un filtre dit prototype et sous sa forme conventionnelle ne nécessite pas l'utilisation d'un CP.

Le dernier chapitre est divisé en deux parties. La première partie traite la simulation du système OQAM-FBMC et aussi présente l'influence de type du canal sur le SNR. Dans la deuxième partie on s'intéresse sur l'optimisation de la DSP utilisant différent types de filtre prototype. Notre travail est terminé par une conclusion générale.

Chapitre 1 : Les exigences de la 5G

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'occupe à la cinquième génération de communications sans fil (5G), c'est la dernière version de la technologie cellulaire, conçus pour augmenter la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil. Elle nous offre des grands débits binaires massifs allant jusqu'à 20 Gbps (supérieures à celles du réseau filaire), ainsi qu'une latence de 1 ms ou moins pour les utilisations nécessitant un retour d'information en temps réel. La 5G permettra également une forte augmentation de la quantité de données transmises sur les systèmes sans fil grâce à une plus grande largeur de bande disponible et à une technologie d'antenne avancée.

1.2. Challenge de la 5G

- ✓ servir un très grand nombre d'utilisateurs
- ✓ Utilisation efficace du spectre
- ✓ Réduire la consommation d'énergie
- ✓ soutenir une grande mobilité
- ✓ soutenir l'avalanche de volume de trafic $1000 \times$ dans dix ans

1.3. Objectif de la 5G

La technologie 5G repose sur 8 exigences techniques :

- ✓ 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 [1]

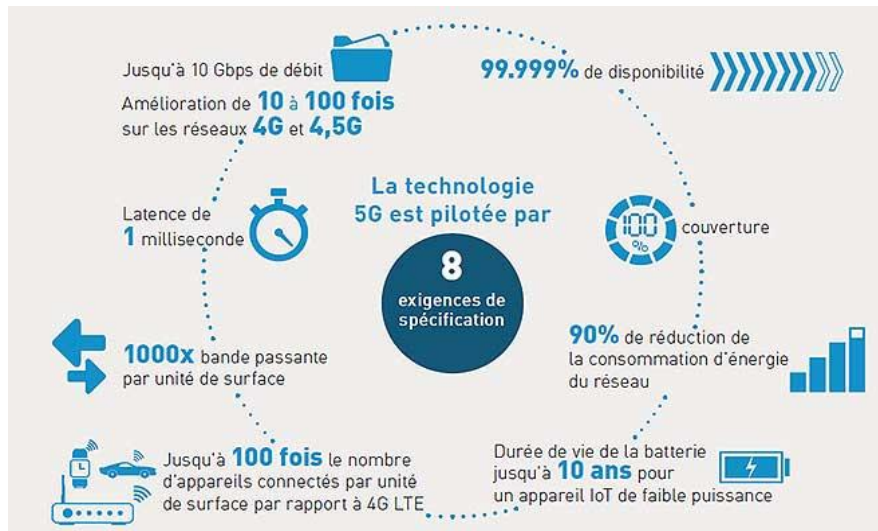


Figure 1.1 les exigences de la 5G [1]

1.4. La nouvelle architecture de la 5G

En raison de la quantité massive de nouvelles bandes passantes mises à disposition, la croissance importante attendue du nombre d'appareils connectés, de la large gamme d'applications à prendre en charge et des différentes caractéristiques de qualité de service des différentes utilisations, l'architecture 5G est conçue d'une manière inédite. Les principales différences entre l'architecture 5G et celles des réseaux 1G à 4G sont les suivantes :

❖ **L'infrastructure et les services réseau sont séparés :**

Dans le monde de la 5G, les différents systèmes d'infrastructure de réseau - tels que relais, antennes, accès radio Réseaux (RAN), nœuds d'accès alimentant les RAN, réseaux de base, centres de données pouvant fournir des services cloud à l'équipement utilisateur (UE) sont séparés par une couche « ressources physiques ». En conséquence, l'infrastructure physique n'est pas nécessairement détenue ou exploitée par le même opérateur. Ces ressources (informatiques, stockage, connectivité) sont plutôt considérées comme étant des ressources virtuelles logiques pouvant être exploitées au besoin selon un autre niveau dans l'architecture 5G.[2]

❖ Réseaux définis par logiciel (SDN) :

La fourniture de services de réseau sera effectuée au moyen d'un système de réseau « virtuel ». Ce dernier traduira les besoins des utilisateurs en instructions utilisables par les « gestionnaires d'infrastructure virtuelle » pour exploiter, si nécessaire, des sections de l'infrastructure physique. Le réseau lui-même devient un concept abstrait puisqu'il y a une séparation complète fourniture de services de réseau avec l'infrastructure. Les réseaux, dans le sens actuel du terme, n'existeront plus. Ils seront remplacés à l'intérieur du contexte nouveau créé par le fonctionnement du réseau 5G. [2]

Certaines « tranches » du réseau ne pourront inclure que les transmissions d'ondes du type « mmWave », d'autres pourraient intégrer la 4G en cas de mauvaises performances et passer aux vitesses des ondes « mmWave » seulement pour certaines applications. Ces « tranches » du réseau seront indépendantes les unes des autres ; elles auront des capacités et des critères de performance différents. Elles constitueront réellement des « réseaux à l'intérieur du réseau ». [2]

1.4.1. Une architecture cellulaire sans fil 5G

Dans cette architecture, les stations de base extérieures (BS) seront équipées de grandes antennes avec des antennes réparties autour de la cellule et connectées aux BS via des fibres optiques bénéficiant des technologies DAS et MIMO massifs. Les utilisateurs mobiles extérieurs ont généralement un nombre limité d'éléments d'antenne, mais ils peuvent collaborer entre eux pour former des liens MIMO virtuels massifs. En dehors de chaque bâtiment, de grandes antennes seront également installées pour communiquer avec les BSS extérieures, possible via LOS. De nombreuses technologies peuvent être utilisées pour une communication à courte portée avec des débits de données élevés. Quelques exemples sont femto-cell, Wi-Fi, ultra large bande (UWB), communication d'onde millimétrique, communication via la lumière visible (VLC) [3].

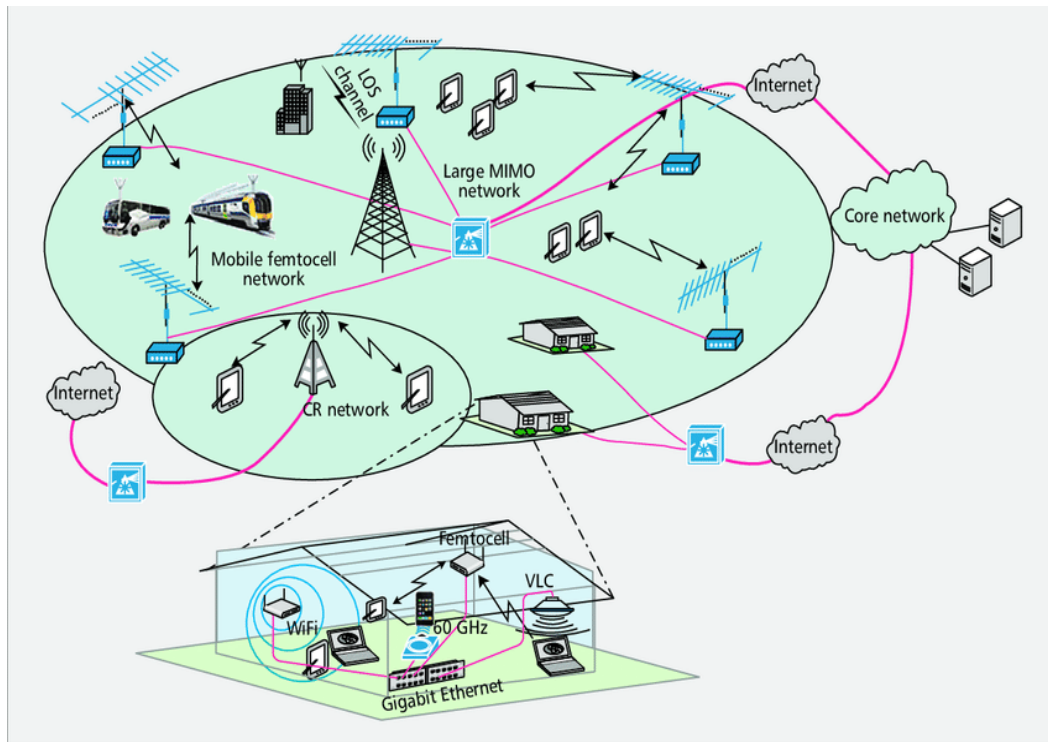


Figure 1.2 Architecture cellulaire de la 5G [4]

En plus de trouver le spectre inutilisé, nous pouvons essayer d'améliorer l'utilisation du spectre de fréquences existant par exemple via des réseaux radio cognitifs. Pour accommoder les utilisateurs à mobilité élevée dans un véhicule et dans les trains à grande vitesse, il convient d'utiliser le concept de femto-cellule mobile. Des femto-cellules mobiles sont situées à l'intérieur des véhicules pour communiquer avec les utilisateurs au sein de la femto-cellule mobile tandis que de grandes antennes sont situées à l'extérieur d'un véhicule pour communiquer avec des stations de base extérieures. Une femto-cellule mobile et ses utilisateurs associés sont tous considérés comme une seule unité de la BS. Du point de vue de l'utilisateur, une femto-cellule mobile est considérée comme une BS régulière. [4]

1.5. Les technologies utilisées dans la 5G

1.5.1. Les ondes millimétriques

La clé technologique de la 5G se situe dans l'utilisation de fréquences plus élevées du spectre, par rapport à celles affectées actuellement. La 4G et ses

prédécesseurs ont eu recours, en gros, à des bandes de fréquences en dessous de 6 GHz. La 5G utilise les ondes que l'on appelle millimétriques. [5]

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

Les ondes millimétriques promettent donc une capacité de données plus élevée que nous avons actuellement maintenant. On dit que plus la fréquence est élevée, plus la transmission de données est importante. [6]

L'avantage des longueurs d'ondes plus courtes d'ondes millimétriques est que les antennes utilisées pour transmettre et recevoir les signaux peuvent être considérablement réduites. Cela signifie que les téléphones utilisant les ondes millimétriques pourraient profiter de plusieurs antennes pour différentes bandes d'ondes millimétriques dans un seul appareil : ainsi le réseau disponible serait plus efficace, et la connexion internet beaucoup plus rapide lorsque plusieurs utilisateurs seraient connectés. [6]

1.5.2. Antennes intelligentes - MIMO et configuration du faisceau (beamforming)

L'architecture émergente de la 5G permet également la réutilisation de la bande passante de l'antenne relais. Dans les technologies des précédentes générations de télécommunications mobiles (1G à 4G), tout signal émis se propage à 360°, dans tous les sens. Dans le monde de la 5G, la technologie MIMO est utilisée. Au lieu d'avoir une seule grande antenne, MIMO possède un certain nombre de petites antennes lesquelles pointent vers différentes directions, augmentant ainsi plus de vingt-sept fois le nombre d'antennes disponibles et pouvant transmettre les mêmes fréquences que celles utilisées par des antennes voisines.

De plus, comme une bande de fréquence est généralement divisée en plusieurs « séquences », cela augmentera encore le nombre de canaux séparés pouvant être fournis (car non seulement la même fréquence peut être utilisée dans différentes directions, mais les antennes peuvent utiliser plusieurs fréquences en même temps).

Enfin, il existe une technologie appelée la configuration du faisceau (beamforming) qui se réfère à la capacité de l'antenne 5G de nouvelle génération à concentrer ses rayons radio vers des emplacements spécifiques déterminés. Il convient de noter que la capacité de focaliser les faisceaux radio suppose que le système d'antennes lui-même est capable d'identifier l'emplacement de tous les équipements utilisateurs connectés. La caractéristique de détection de localisation de MIMO et la configuration du faisceau distinguent nettement l'infrastructure de la technologie 5G de celles des précédentes générations (1G-4G). [7]

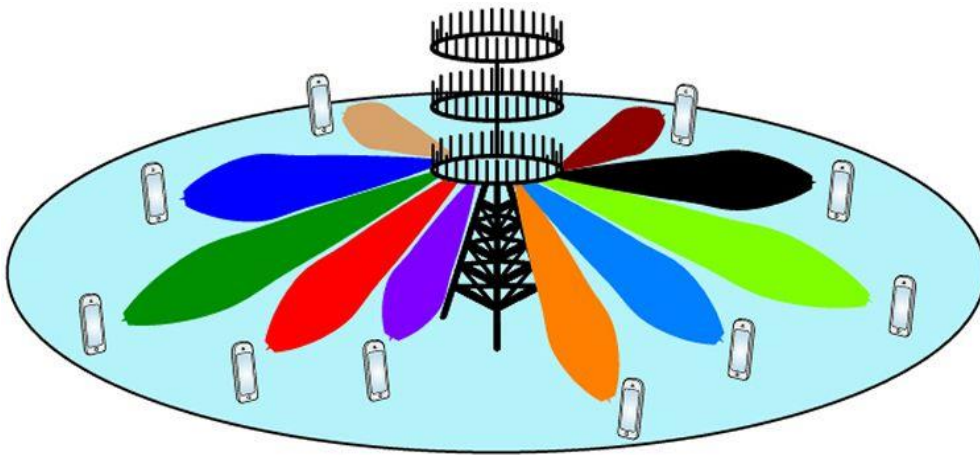


Figure 1.3 Massive MIMO[8]

1.5.3. Des cellules de plus en plus petites

Le déploiement des réseaux mobiles actuels est essentiellement basé sur l'utilisation de stations de base dites « macro » ; des sites dotés d'antennes de forte puissance sont installés pour garantir la couverture d'une zone relativement large, avec une qualité de service suffisante. L'architecture du réseau est en constante évolution : de nouvelles stations radioélectriques sont régulièrement installées afin d'augmenter la capacité des réseaux en vue de mieux répondre aux préoccupations des utilisateurs, en ce qui concerne la couverture indoor et outdoor ainsi que la qualité de service.

Néanmoins, l'augmentation continue des demandes capacitaires impose aux opérateurs, déjà aujourd'hui, de densifier leurs réseaux avec des cellules toujours plus petites.

La 5G, qui verra encore probablement une forte augmentation des volumes de données échangés, et qui utilisera des bandes millimétriques, aux faibles capacités de propagation, nécessitera probablement la généralisation de la mise en place d'émetteurs radioélectriques de faible puissance (small-cells).

Des estimations évoquent, pour satisfaire la demande et permettre l'introduction de la 5G, un nombre d'au moins 10 small-cells par site macro en milieu urbain⁴², milieu dans lequel les cellules sont déjà relativement resserrées pour faire face à la densité des usages. [9]

1.5.4. Full Duplex

Dans les systèmes classiques, l'émission et la réception se font soit sur des bandes de fréquences différentes (duplexage en fréquences dit FDD (frequency division duplexing), utilisé sur toutes les bandes des réseaux mobiles français) soit à des instants différents (duplexage temporel dit TDD (time division duplexing), pressenti pour les réseaux de boucle locale radio LTE en France). Le full duplex ambitionne de permettre l'émission et la réception simultanée d'information, sur les mêmes fréquences, au même moment et au même endroit. [9]

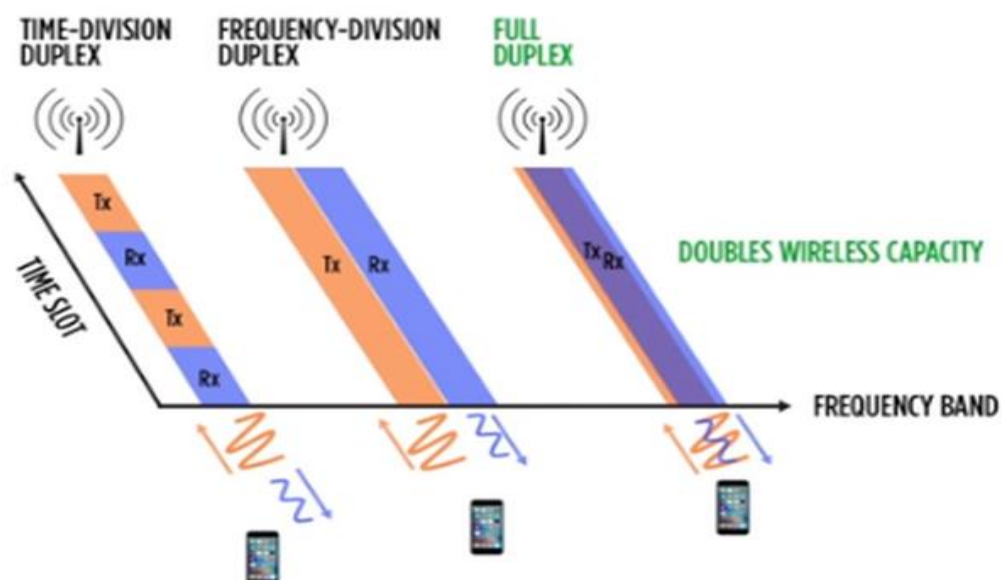


Figure 1.4 Full Duplex[10]

1.6. Formes d'ondes envisageables pour la 5G

L'OFDM n'est pas adapté à la 5G en raison de son faible rendement spectral et de son problème de synchronisation. Ces limitations ont attiré l'attention des chercheurs qui étudient les formes d'onde futures pour la 5G.

L'un des aspects qui intéressent les chercheurs est la latence beaucoup plus courte, nécessaire pour développer les nouveaux services et applications telles que la conduite autonome qui exige un délai de latence ultra-court et une liaison de communication très robuste.

1.6.1. GFDM

Avec G-FDM, nous pouvons transmettre plusieurs symboles par sous-porteuse, ce qui n'est pas possible avec OFDM. G-FDM utilise une transmission par blocs qui est facilitée par la mise en forme d'impulsions circulaires des sous-porteuses individuelles. L'émission hors bande est réduite en appliquant différents filtres de mise en forme et un préfixe cyclique est utilisé pour réduire ISI et ICI.

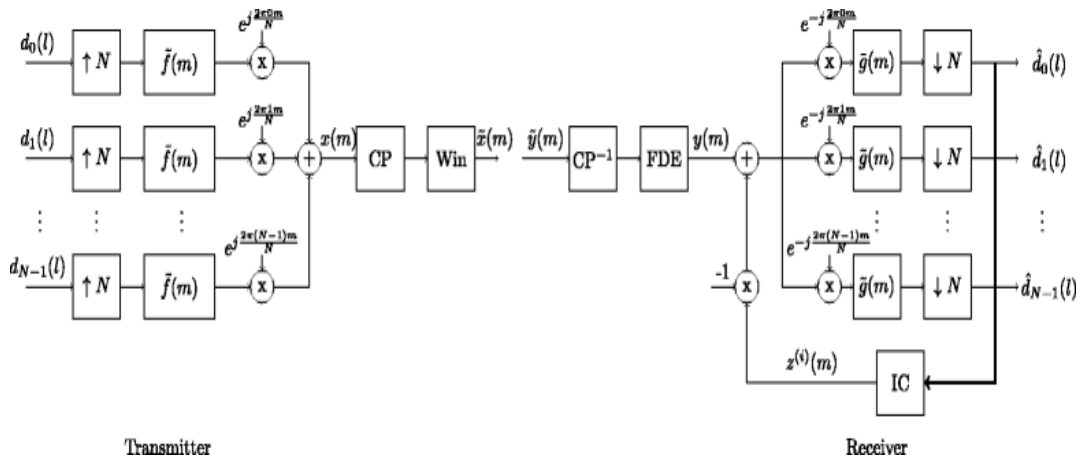


Figure 1.5 schéma bloc GFDM [11]

1.6.2. FBMC

Utilise des bancs de filtres du côté de l'émetteur et du récepteur. Ces filtres sont la version décalée en fréquence et en phase d'un filtre prototype. Le filtre prototype est la base du système FBMC qui sépare deux symboles de telle sorte qu'un minimum d'émission hors bande se produise. Le filtre prototype est conçu pour obtenir une

faible émission hors bande entre les sous-porteuses. Dans la FBMC, le CP peut être retiré et les sous-porteuses peuvent être mieux localisées en temps et en fréquence, en utilisant une conception de filtre prototype avancée. Elle est la principale concurrente pour la communication 5G

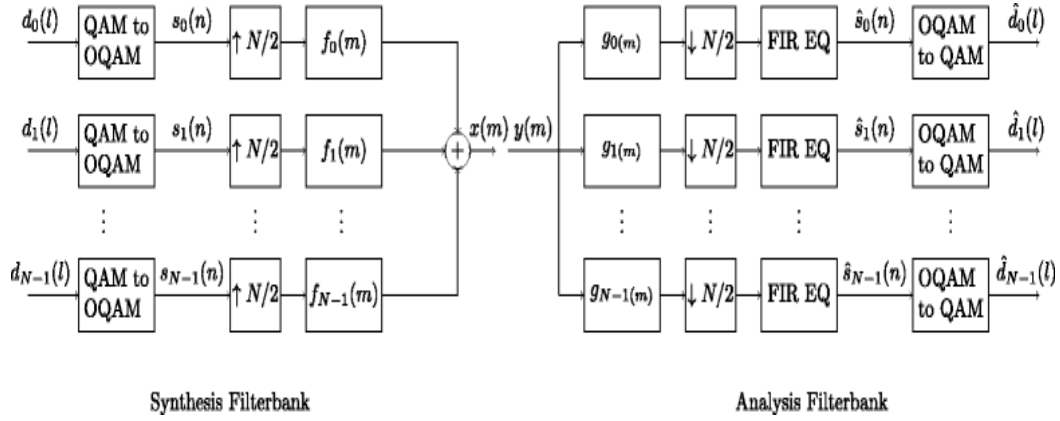


Figure 1.6 schéma bloc FBMC [11]

1.6.3. UPMC

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

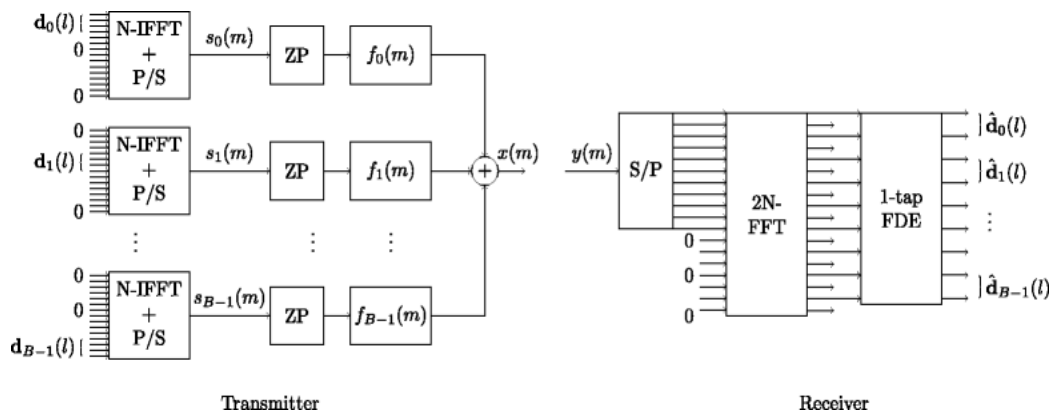


Figure 1.7 schéma bloc UPMC [11]

1.6.4. F-OFDM

La chaîne de transmission de f-OFDM est très similaire à celle du CP-OFDM, avec un filtre passe-bas supplémentaire introduit après la concaténation du CP et avant la fréquence déplacée afin de réduire les émissions hors bande. Clairement, la structure du filtre passe-bas de l'émetteur est très importante pour réduire les émissions hors bande et les interférences possibles. Idéalement, nous voulons un filtre parfaitement plat en bande passante et zéro en dehors de cette bande avec des bandes de transition nulles. Ce type de filtre est physiquement irréalisable, mais peut être approché en tronquant et produisant la réponse impulsionnelle $\text{Sinc}(\cdot)$ idéale. Cette opération introduit un nouvel élément dans ce cadre, les bandes de transition du filtre. Il est important de noter que les bandes de transition sont complètement indépendantes de la fréquence de bandes de garde. Évidemment avoir la transition bande contenue dans la bande de garde pourrait garantir de meilleures performances. Le filtre doit être aussi plat que possible dans la bande passante avec les bandes de transition serrées. Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi un filtre fenêtré avec une réponse impulsionnelle idéale. [12]

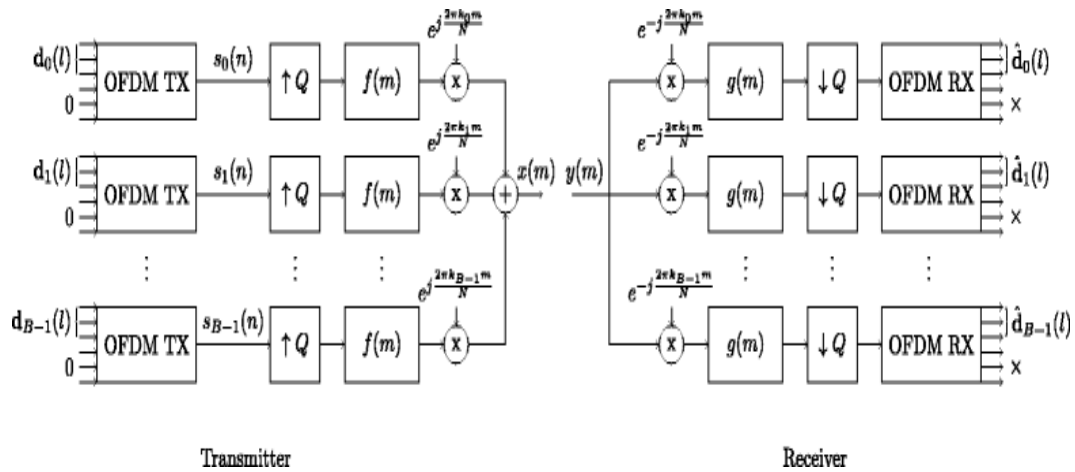


Figure 1.8 schéma bloc F-OFDM [11]

1.7. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les nouvelles architectures de la 5G et les technologies nécessaires comme les ondes millimétriques et les antennes intelligentes. Comme nous avons abordé les formes d'ondes envisageables FBMC, G-FDM, UPMC...etc. Malgré ces évolutions remarquables, les recherches continues à progresser énormément, la cinquième génération qui est prévue d'être mise en œuvre en 2020 Globalement, devrait générer une variété de nouvelles applications, utilisations et analyses de rentabilisation au fur et à mesure du déploiement de la technologie.

Chapitre 2 : Modulation multi-porteuse à base de bancs de filtres FBMC

2.1. Introduction

Dans les systèmes de communication multi-porteuse, OFDM est principalement utilisé. Dans l'OFDM, le préfixe cyclique est utilisé pour lutter contre l'ISI. Ce problème est résolu dans la FBMC en utilisant un filtrage approprié limitant l'interférence entre les canaux adjacents seulement et n'ont pas entre les canaux non adjacents, FBMC est une technique de modulation multi-porteuse qui a été développée avant l'OFDM. Cette technique est une modulation dans laquelle deux bancs de filtres sont utilisés dans l'émetteur et dans le récepteur. Ce chapitre présente les notions de base d'une transmission multi porteuse (MCM), et Comment transmettre via le système FBMC.

2.2. Modulation multi porteuse (MCM)

Soit à transmettre des symboles avec une durée de symbole noté T_s , une largeur de bande occupée B . Typiquement B est de l'ordre de T_s^{-1} . Pour un canal de transmission avec un délai de propagation τ_m , la récupération d'un symbole transmis sans interférence entre symboles ISI (Inter Symbol interférence) est seulement possible si la condition $\tau_m \ll T_s$ est satisfaite. Comme conséquence, le débit binaire possible $R_b = \log_2(M) T_s^{-1}$, pour une modulation mono porteuse est limitée par le délai de propagation du canal. L'idée la plus simple d'une transmission multi porteuse, pour surmonter cette limitation, est de diviser le flux des données sur K flux avec un taux de données réduit et de transmettre ces flux de données sur des sous-porteuses adjacentes (figure 2.1).

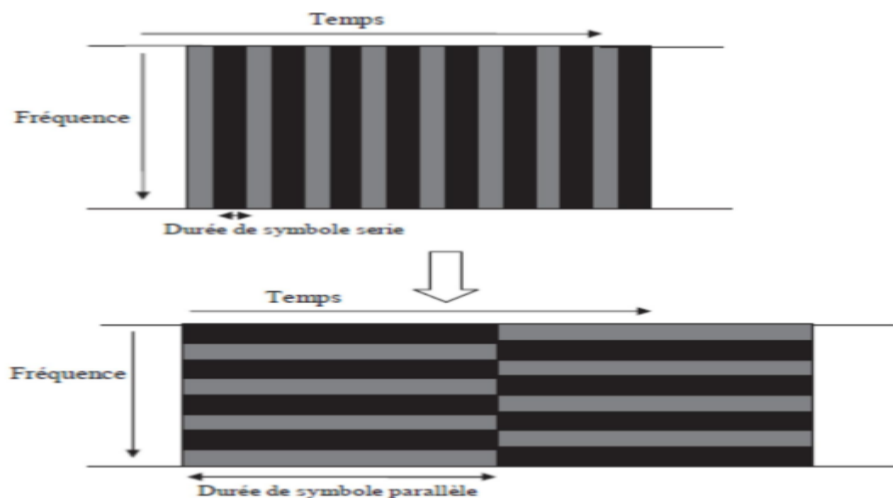


Figure 2. 1 concept de multi-porteuse

Pour un $K = 8$, cela peut être vu comme une transmission parallèle dans le domaine fréquentiel qui n'affecte pas la totalité de la bande passante nécessaire. Chaque sous-porteuse a une bande passante B/K . On note aussi que le facteur K n'est pas choisi arbitrairement, car une longue durée de symbole peut aussi rendre la transmission sensible au temps d'incohérence du canal liée à la fréquence Doppler maximale $D_{\max}$. Donc, la condition, $V_{\max}T_s \ll 1$ doit être satisfaite [14].

Les deux conditions peuvent être valides simultanément, si le facteur de $k = V_{\max}\tau_m$ satisfait la condition $k \ll 1$. Pour un facteur k donné assez petit, on doit admettre qu'il existe une durée symbole et que les deux doivent satisfaire les exigences pour avoir les meilleures conditions pour le canal. On doit choisir après, cette durée symbole T_s optimale correspondant au canal. [14]

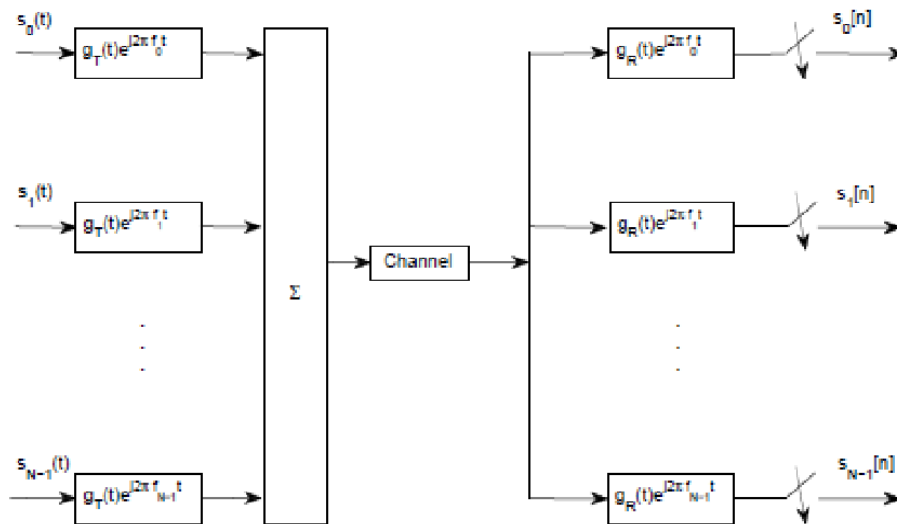


Figure 2. 2 Le schéma général d'une transmission multi-porteuse [15]

Les symboles élémentaires sont regroupés par groupes de L et sont transmis en parallèle via les L sous-porteuses $f_0, f_1, \dots, f_{N-1}$. Le bon choix des filtres d'émission $g_T(t)$ et de réception $g_R(t)$ et l'espacement 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 va influencer sur l'efficacité spectrale et sur le niveau des interférences entre les sous-porteuses. 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.

La figure 2.3 montre le rôle de l'orthogonalité pour la reconstitution du signal à la réception du signal émis et le gain dans la bande passante.

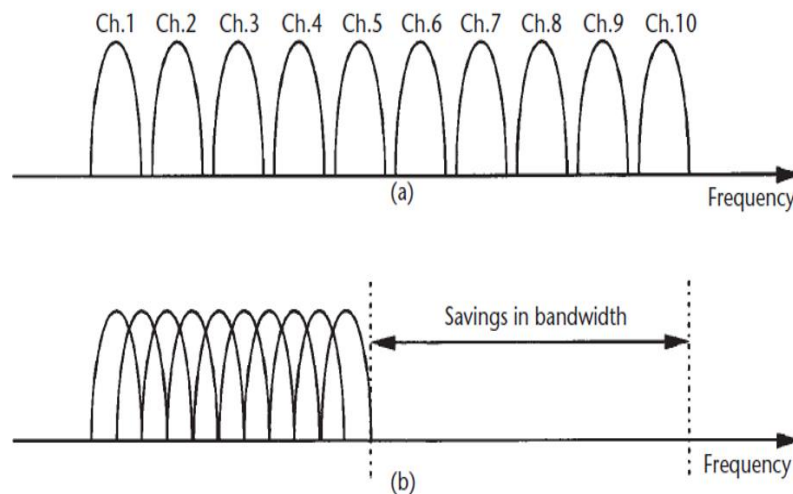


Figure 2. 3 a) porteuse disjointes, b) porteuses orthogonales chevauchées

En utilisant la modulation multi-porteuse avec chevauchement, nous économisons près de 50% de la bande passante. Pour réaliser cette technique, nous devons réduire les interférences entre les sous-porteuses, ce qui exige l'orthogonalité entre les différentes sous-porteuses modulées.

2.3. Modulation multi porteuse OFDM

2.3.1. Schéma générale

Dans le système multi-porteur OFDM, le spectre de fréquence des sous-porteuses est chevauché avec le moindre espacement de fréquence, et l'orthogonalité est atteinte parmi les différentes sous-porteuses. Sur la figure 2.4, le flux d'entrée est subdivisé en flux de données parallèles au moyen du convertisseur série-parallèle (S / P), qui sont passées dans un bloc de transformation de Fourier rapide inverse (IFFT) pour produire séquence temporelle des flux. Par conséquent, en additionnant le préfixe cyclique (CP), Les

séquences temporelles des symboles OFDM sont étendues. Le CP est une copie de la dernière partie du symbole qui est ajoutée au début de la séquence et doit être supérieure à la propagation de report du réseau afin de réduire l'interférence entre symboles (ISI) produite par l'afflux de divers symboles OFDM avec délai distinct. Le signal numérique résultant est transformé en une forme analogique et transmis sur le canal. [16]

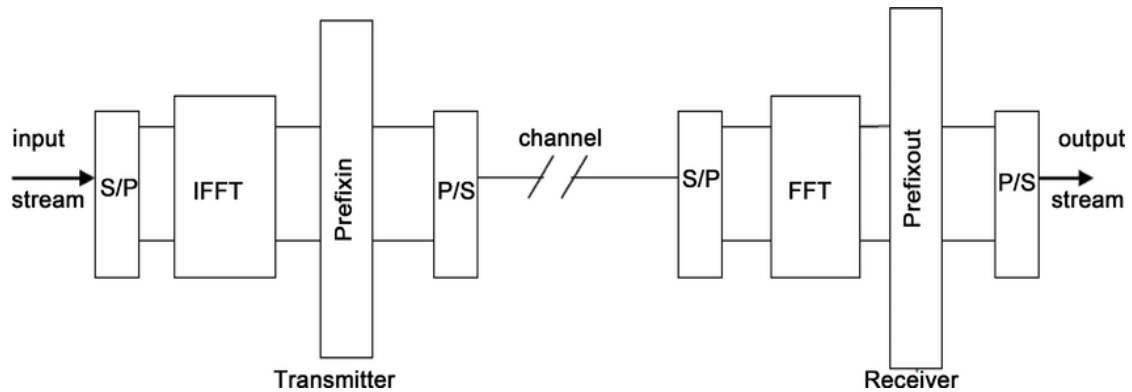


Figure 2. 4 Schéma block OFDM [16]

Du côté du récepteur, le signal est reconstruit sous forme numérique. La transformée de Fourier (FFT) est obtenue dans les flux reçus après l'éradication de la CP [17]. Enfin, les flux parallèles sont rassemblés dans un seul flux sous le nom original transmis.

2.3.2. Spectre OFDM :

Nous définissons l'efficacité spectrale comme étant le débit binaire transmis par unité de fréquence. Dans une transmission de type OFDM, le choix de l'écartement entre les porteuses va influencer sur cette efficacité spectrale.

Plus l'espacement entre porteuses est grand, plus nous avons besoin de bande passante pour transmettre un même débit, plus l'efficacité spectrale diminue.

Pour garantir une efficacité spectrale optimale, il faut que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles, tout en garantissant une absence d'interférence entre les informations qu'elles transportent afin que le récepteur soit capable de les retrouver.[18]

Le spectre ainsi obtenu est un ensemble de modulation sur des porteuses équi-réparties. Le spectre est représenté sur la figure 2.5 :

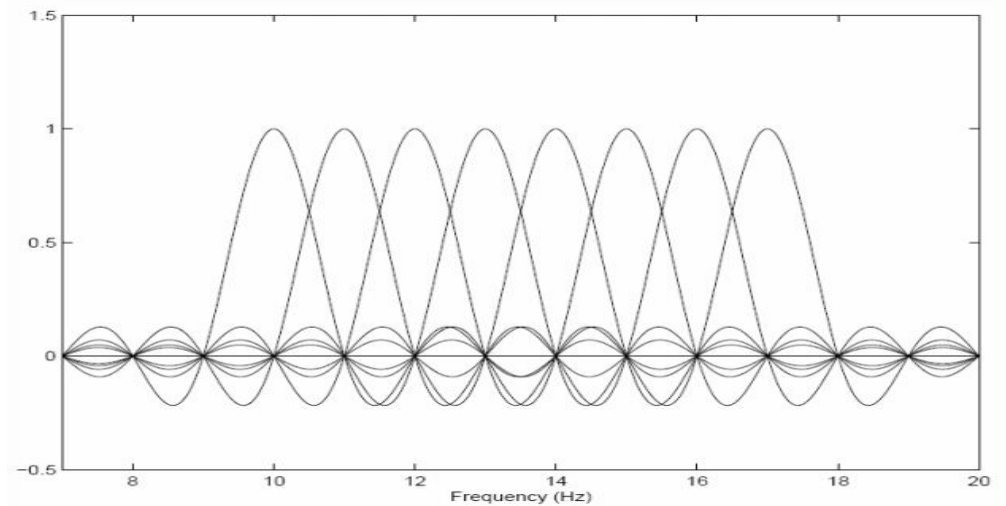


Figure 2. 5 Spectre OFDM[18]

2.3.3. L'orthogonalité

La différence fondamentale entre les différentes techniques classiques de modulation multi-porteuses et l'OFDM est que cette dernière autorise un recouvrement spectral entre ces sous-porteuses, ce qui permet d'augmenter sensiblement leur nombre. Cependant, pour que ce recouvrement n'ait pas d'effet néfaste, les porteuses doivent respecter une contrainte d'orthogonalité [19].

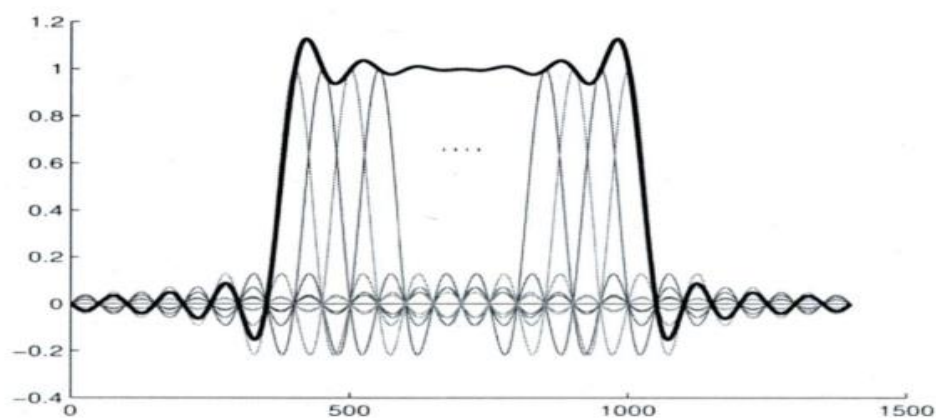


Figure 2. 6 Représentation de la nature orthogonale du spectre d'un signal OFDM [20]

Un signal OFDM peut s'écrire sous la forme :

$$x_n(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_{n,k} e^{j2\pi f_k t} \quad (2.1)$$

Où : les éléments $X_{n,k}$ sont les symboles à émettre à l'instant n sur la k^{ieme} sous-porteuse, Avec $f_k = f_0 + k \Delta f$, f_0 représentant la fréquence de la sous-porteuse originale et f_k la fréquence de la sous-porteuse d'indice k , Δf représente l'écart fréquentiel entre deux sous-porteuses voisines et N indique le nombre de sous-porteuse.

Si on pose que : $\varphi_k(t) = e^{j2\pi f_k t}$

Alors, les sous-porteuses doivent vérifier la condition d'orthogonalité suivante :

$$\int_0^{T_s} \varphi_p(t) \varphi_q^*(t) dt = \int_0^{T_s} e^{j2\pi f_p t} e^{-j2\pi f_q t} dt = \begin{cases} 0, & \text{si } p \neq q \\ 1, & \text{si } p = q \end{cases} \quad (2.2)$$

Comme vu sur la figure 2.6 quand n'importe quelle sous-porteuse particulière atteint l'amplitude maximale, les sous-porteuses restantes sont à zéro. [21]

2.3.4. Ajout du préfixe cyclique/ suppression de préfixe cyclique

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

Le préfixe cyclique est une technique qui consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre en amont de la trame. Plus clairement, il s'agit de récupérer une partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début de trame appeler cyclique préfix (CP-OFDM) [22]

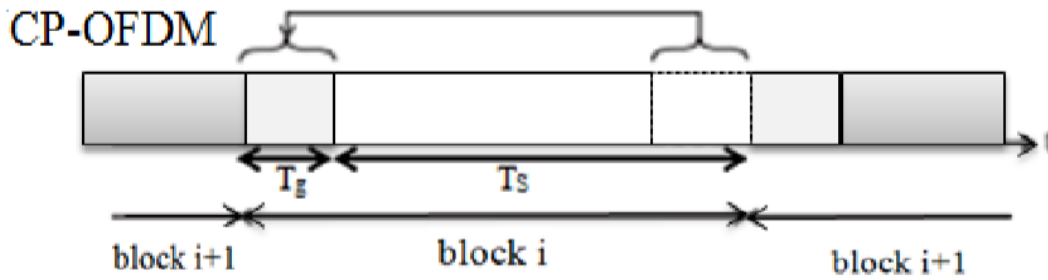


Figure 2. 7 symbole OFDM avec CP

2.4. FBMC (Filter Bank Multi Carrier)

2.4.1. Principe générale

La technique FBMC surmonte les limites de l'OFDM en ajoutant des filtres de mise en forme d'impulsion qui délivrent un sous-canal bien localisé dans le temps et domaine de fréquence. Par conséquent, les systèmes FBMC ont plus de signaux de confinement spectral et offrent une utilisation plus efficace des ressources radioélectriques en l'absence de CP.

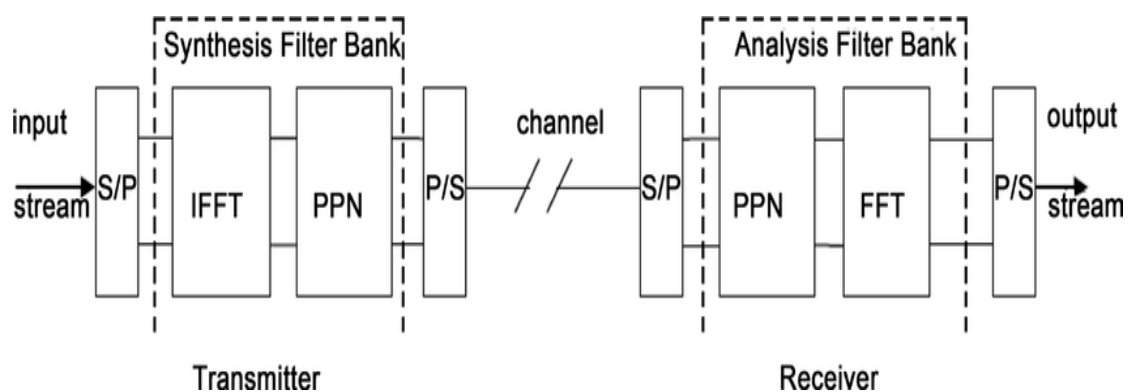


Figure 2. 8 Schéma block Filter Bank Multi Carrier FBMC[23]

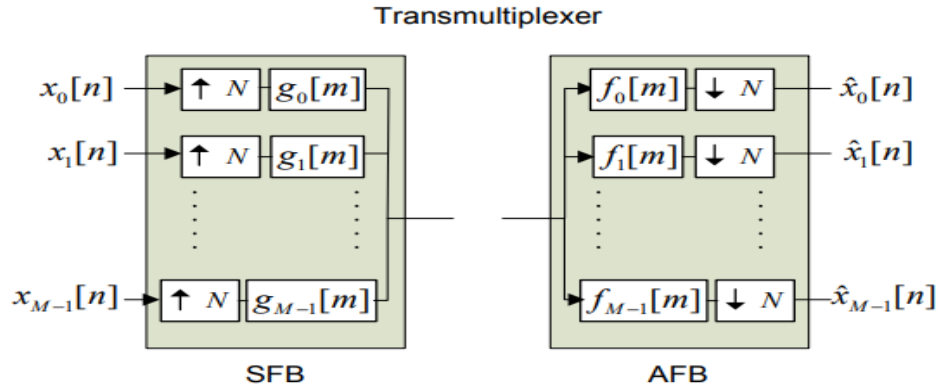


Figure 2. 9 configuration de synthèse-analyse (Transmultiplexer)

Sur la figure 2.9, on peut voir que les bancs de filtres du côté émetteur et le côté récepteur consiste en une matrice de N filtres qui traite N signaux d'entrée pour donner N sorties. Si les entrées de ces N filtres sont associées ensemble, le système de manière analogue peut être mesuré comme un analyseur au signal d'entrée basé sur les caractéristiques de chaque filtre. Sur la figure 2.9, le groupe de filtres utilisé du côté émetteur est appelé groupe de filtres de synthèse et le groupe de filtres utilisé dans le récepteur est appelé banque de filtres d'analyse. Comme est illustré à la figure 2.9, le signal d'entrée est d'abord converti de la forme série en forme parallèle puis passé à travers le filtre de synthèse banque, puis il est reconverti en forme de série après être sorti de la synthèse banque. Après cela, on peut voir sur la figure 2.9 dans le récepteur après que le signal passe à travers le canal, il est converti en forme parallèle par convertisseur série à parallèle et passé à travers la banque de filtres d'analyse. Enfin, quand le signal de sortie est obtenu, il est à nouveau converti en forme série par convertisseur parallèle à série. [24]. D'où la configuration de synthèse-analyse illustrée à la figure 2.9 est appelé Transmultiplexer ou TMUX et est appliquée dans les systèmes de communication MCM [25].

2.4.2. Types de FBMC

Dans cette section, trois types de systèmes de communication FBMC seront introduits, nommé FMT/FBMC (filtered multitone-based FBMC), CMT/FBMC (co-sine modulated multitone-based FBMC) [26], et OQAM/FBMC (offset quadrature amplitude modulation-based FBMC)

A. FMT/FBMC

FMT / FBMC est une solution intéressante pour la transmission numérique à très haut débit, intermédiaire entre les autres méthodes proposées à porteuse unique et à porteuses multiples, ainsi qu' elle offre des avantages inhabituels liés à la gestion du spectre, au dégroupage et au duplexage. La figure 2.10 présente la structure d'un système à multi porteuses FMT / FBMC. Les symboles de modulation à valeurs complexes $x_k(mT), k = 0, 1, \dots, K - 1$ sont obtenus à partir de constellations modulées en amplitude quadrature (QAM), où $1/T$ est le débit de symboles. Après le sur échantillonnage par un facteur de M , chaque flux de symboles est filtré par un filtre de bande de base avec la fréquence caractéristique $H(e^{j2\pi f})$ et la réponse impulsionnelle $h(t)$. Le signal transmis $s(t \frac{T}{M})$ est alors obtenu au débit de transmission de M/T en additionnant les signaux sur toutes les K sous-porteuses au niveau du récepteur, on utilise un filtrage apparié (où désigne une conjugaison complexe), puis un sous-échantillonnage d'un facteur M . Quand $M = K$ ($M > K$), la banque de filtres dite que l'échantillonnage est de manière critique (non critique).[21]

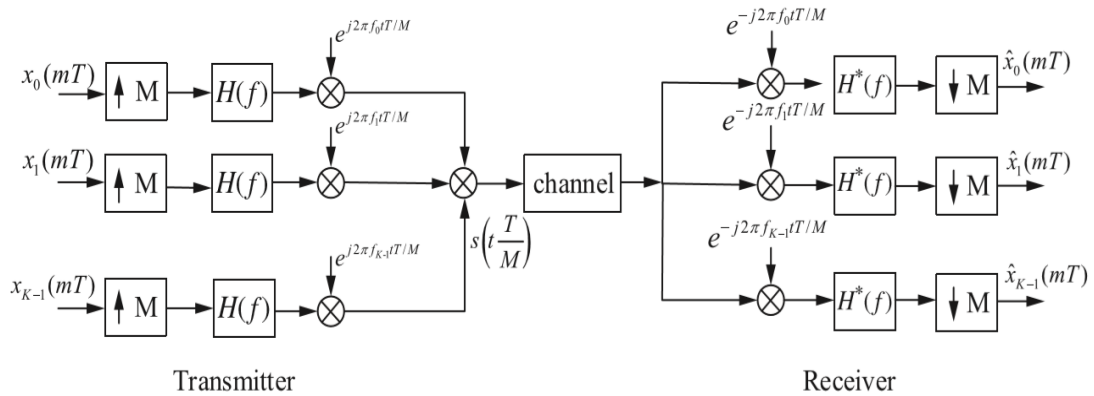


Figure 2. 10 Le diagramme équivalent d'un système FMT / FBMC en bande de base[21]

B. CMT/FBMC

Dans CMT / FBMC, les symboles de sous-porteuse sont modulés en amplitude et en bande latérale résiduelle (VSB). La figure 2.11 présente la structure d'un système à multi porteuses CMT / FBMC. Une banque de filtres de synthèse est utilisée pour limiter un ensemble des symboles PAM aux signaux VSB dans la bande et les moduler dans diverses bandes de fréquences. Fondamentalement, le filtrage VSB est effectué à travers une version décalée en fréquence du filtre passe-bas $h(t)$ centré à $f = \frac{\pi}{2T}$ avec réponse

impulsionnelle $h(t)e^{j\frac{\pi}{2T}t}$. Pour extraire la $k^{\text{ième}}$ séquence de données de sous-porteuse $x_k(m)$, $s(t)$ est d'abord multiplié par $e^{-j(\omega_k + \theta_k)t}$. Le signal reçu est ensuite passé à travers un filtre passe-bas dont la réponse est adaptée au filtre d'émission $h(t)e^{j\frac{\pi}{2T}t}$, qui est $h(-t)e^{j\frac{\pi}{2T}t}$. [29]

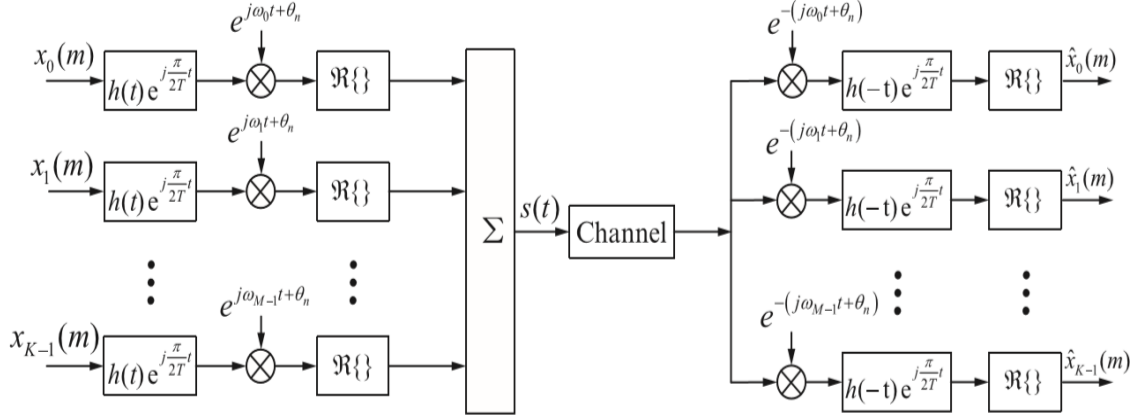


Figure 2. 11 Le diagramme équivalent d'un système CMT / FBMC en bande de base. [21]

C. SMT-FBMC (OQAM/FBMC)

OQAM / FBMC est basée sur les symboles QAM dont les composantes en phase et en quadrature sont décalées de la moitié de la période des symboles. Contrairement à FMT/FBMC, Un chevauchement important entre les bandes adjacentes est autorisé dans OQAM / FBMC. La séparation de signal réussie est néanmoins possible grâce à un dispositif de signalisation spécifique. Une condition d'orthogonalité introduite entre sous-porteuses garantit les symboles reçus sans ISI ni ICI. L'orthogonalité de la porteuse est obtenue au fil du temps en décalant les composantes en phase et en quadrature des symboles de la sous-porteuse et en concevant des filtres à formation d'impulsions dotés d'une bonne propriété de localisation de fréquence. Le diagramme équivalent d'un système OQAM / FBMC en bande de base est présenté à la figure 2.12.

Le symbole transmis $x_k(m)$ est un symbole à valeur réelle avec un indice de fréquence k et un indice de temps m , et $T / 2$ est l'intervalle des symboles à valeur réelle. $x_k(2m)$ et $x_k(2m + 1)$ sont obtenus en prenant les parties réelle et imaginaire d'un symbole à valeur complexe de la constellation QAM, respectivement. $h(t)$ est un filtre de mise en forme d'impulsions symétrique à valeur réelle. [21]

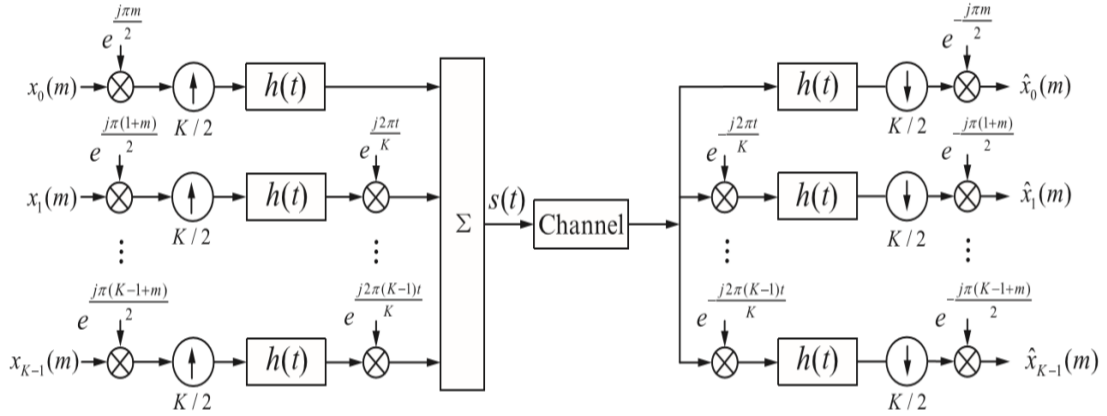


Figure 2. 12 Le diagramme équivalent d'un système SMT / FBMC en bande de base. [21]

2.5. OQAM-FBMC

2.5.1. Principe générale

Le système multi-porteuses à base de banc de filtre (FBMC) est une technique alternative pour surmonter les limites de l'OFDM [27]. Au lieu de transmettre un symbole complexe $C_{l,k}$ par temps symbole et par sous-porteuse, on retarde la partie réelle (ou imaginaire) d'un demi-temps symbole $T = \frac{T_0}{2}$, c'est le principe de transmission OQAM. On s'arrange pour que 2 symboles adjacents (en temps et en fréquence) aient une différence de phase de $\pi/2$ [28].

Le principe de FBMC-OQAM consiste à diviser le débit de transmission en flux indépendants en utilisant L sous-porteuses. Une condition d'orthogonalité est introduite entre les sous-porteuses pour garantir que les symboles transmis arrivent au récepteur sans ISI et sans ICI. Ceci est réalisé par une transmission des composantes en phase et en quadrature des symboles avec un décalage d'une demi-période de symbole. Le système FBMC-OQAM se compose d'un banc de filtres de synthèse (SFB) à l'émission et d'un banc de filtres d'analyse (AFB) au niveau du récepteur. [29]

Cependant, à cause du filtrage, les symboles transmis sur les sous-porteuses ont un support temporel étendu d'un facteur spécifié par la longueur de la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme utilisé. Ainsi, pour conserver une efficacité spectrale maximale, les symboles sont superposés et une IES intrinsèque apparaît.

L'emploi de la modulation OQAM permet cependant de conserver, en canal plat, une orthogonalité du système dans $\mathbb{R}$ (l'ensemble des nombres réels) puisque les parties réelles et imaginaires des symboles complexes QAM sont entrelacées dans le domaine temporel. En fréquence également, la FBMC-OQAM prévoit l'entrelacement des parties réelles et imaginaires des symboles pour limiter la contribution des symboles définis sur la même dimension aux seules porteuses adjacentes conjointement avec l'action du filtre prototype.

La technique FBMC-OQAM a les caractéristiques principales suivantes :

a. Aucun préfixe cyclique n'est nécessaire et de petites bandes de garde sont suffisantes pour supprimer les interférences entre canaux.

b. En raison de ses lobes latéraux faibles, la technique FBMC-OQAM est beaucoup moins sensible aux décalages temporels que l'OFDM. En outre, FBMC-OQAM est moins sensible au décalage de fréquence résiduelle et est plus robuste à l'effet Doppler.

c. FBMC-OQAM divise le canal de transmission du système en un ensemble de sous canaux et chaque sous-canal chevauche seulement avec ses voisins les plus proches. Les sous-canaux peuvent être regroupés en blocs indépendants, ce qui est crucial pour la compatibilité et les techniques d'accès dynamique. [29]

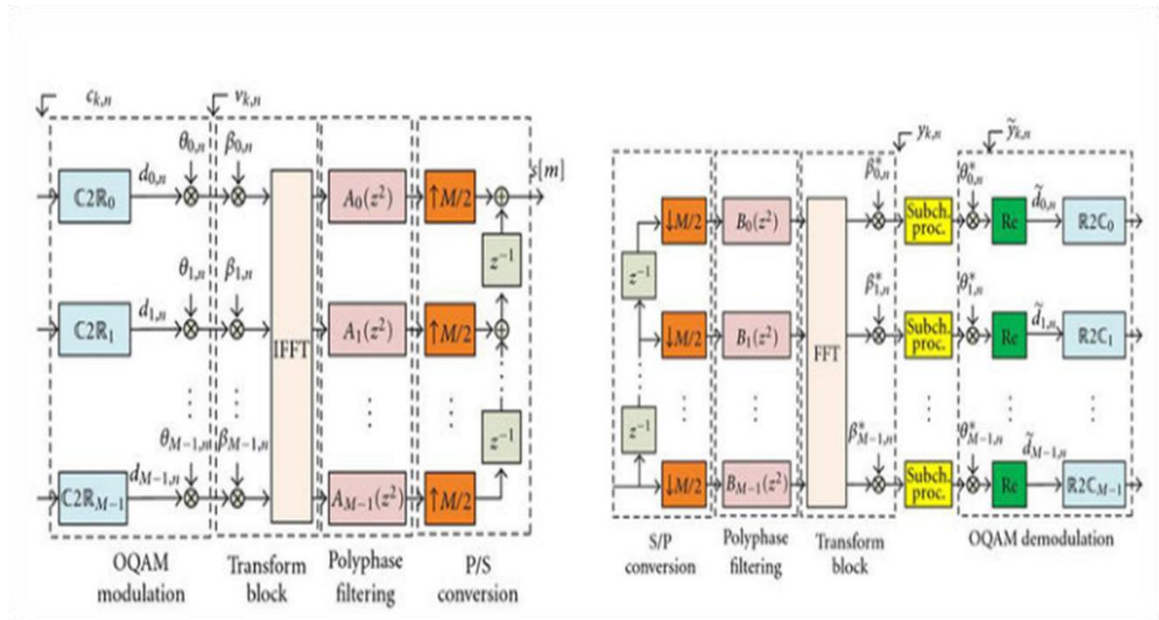


Figure 2.13 Structure générale de la technique FBMC/OQAM (partie émission /partie réception).

2.5.2. Pré-traitement OQAM

Le schéma du principe de pré-traitement OQAM est démontré dans la Figure 2.14 qui se compose de deux opérations :

➤ **La première opération:** est une conversion complexe/ réelle ou les parties réelles et imaginaires d'un symbole complexe $C_k[l]$, transmises à un débit $1/T$, sont séparé pour former deux nouveaux symboles.

$d_k[n]$ Et $d_k[n + 1]$

$T = 1/\Delta f$ représente la période du signal avec Δf l'espacement entre les sous-porteuses

$$d_k[n] = \begin{cases} \text{Re}(C_k[l]), & k \text{ pair} \\ \text{Im}(C_k[l]), & k \text{ impaire} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$d_k[n + 1] = \begin{cases} \text{Re}(C_k[l]), & k \text{ impair} \\ \text{Im}(C_k[l]), & k \text{ paire} \end{cases} \quad (2.4)$$

Avec :

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 seconde opération:** est la multiplication par $\theta_k[n]$ afin de maintenir les symboles orthogonaux.

$$\theta_k[n] = j^{k+n} \quad (2.5)$$

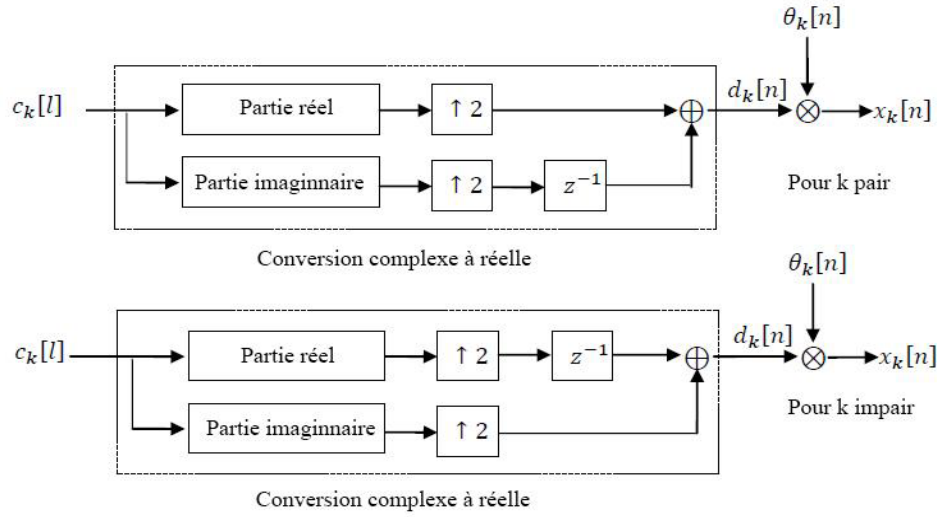


Figure 2. 14 Pré-traitement OQAM

Les données à la sortie du block pré-traitement OQAM $X_k[n]$ peuvent s'exprimer comme suit :

$$X_k[n] = d_k[n]\theta_k[n] \quad (2.6)$$

2.5.3. Post-traitement OQAM

Le schéma fonctionnel du post-traitement OQAM est illustré par la figure 2.15. L'OQAM post-traitement se trouve à la partie réception et il est constitué de deux opérations principales.

- **La première opération:** est une 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:** est la conversion réelles/complexes dans laquelle deux symboles réelles successifs forment un symbole de valeur complexe (l'un des symboles est multiplié par j), la forme complexe noté $\hat{C}_k[l]$ est défini par:

$$\hat{C}_k[l] = \begin{cases} \hat{d}_k[n] + j\hat{d}_k[n+1] , & k \text{ pair} \\ \hat{d}_k[n+1] + j\hat{d}_k[n] , & k \text{ impair} \end{cases} \quad (2.7)$$

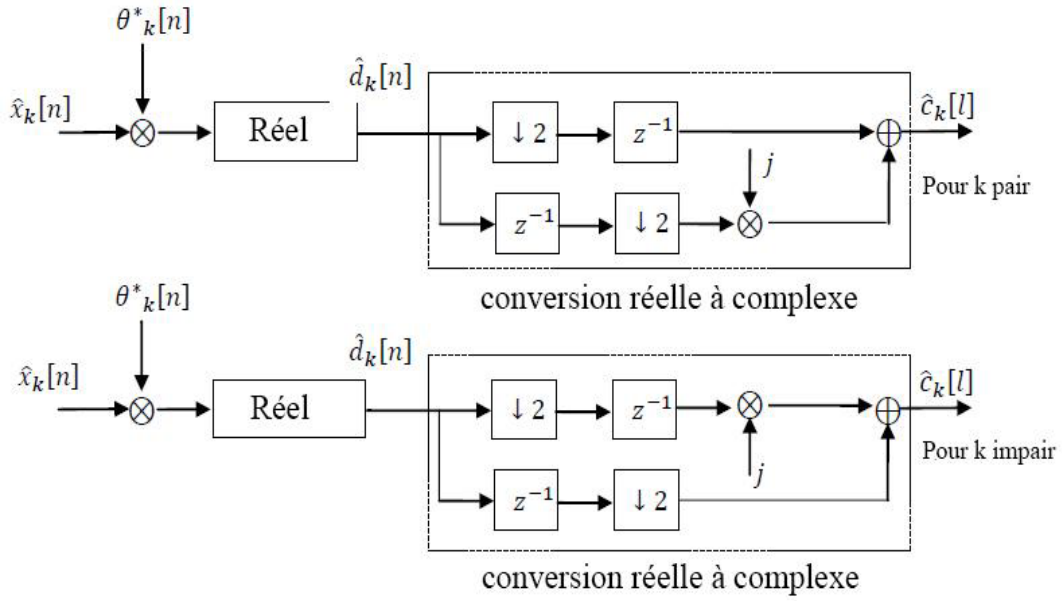


Figure 2.15 Post-traitement OQAM.

2.5.4. Analyse et synthèse par bancs de filtres

Un banc de filtre est un ensemble de filtre, avec une entrée ou une sortie commune. Ces deux cas sont représentés sur la figure 2.16. Le système de la figure 2.16. (a) est appelé banc de filtres d'analyse, et les filtres $H_k(t)$ sont les filtres d'analyse. Ce banc décompose le signal $x(n)$ en M signaux $v_i(n)$ appelés signaux de sous-bandes. Le système de la figure 2.16.(b) est appelé banc de filtres de synthèse et les filtres $F_k(z)$ sont les filtres de synthèse. Il combine les M signaux $w_k(n)$ en un seul signal $y(n)$. [30]

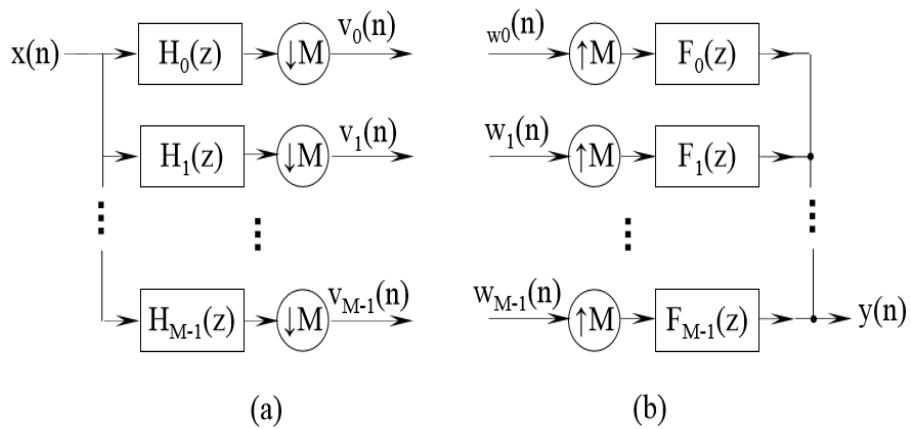


Figure 2.16 Banc de filtres à M canaux (a)banc d'analyse (b)banc de synthèse .[30]

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

$$v_k(n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i)h_k(nM - i) \quad (2.8)$$

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

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} w_k(i)f_k(n - Mi) \quad (2.9)$$

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

$$y(n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i)S(n, i) \quad (2.10)$$

Où le noyau S du système global est donné par :

$$S(n, l) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} f_k(n - Mi)h_k(Mi - l) \quad (2.11)$$

Nous pouvons obtenir la reconstruction parfaite avec un retard τ (entier) si et seulement si $S(n, l) = \delta(n - l - \tau)$, c'est-à-dire si et seulement si :

$$\sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} f_k(n - M_i) h_k(M_i - l) = \delta(n - l - \tau), \quad (\forall l, n \in \mathbb{Z}) \quad (2.12)$$

2.6. Les filtres prototypes

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

2.6.1. Le filtre PHYDYAS

Le filtre prototype PHYDYAS est celui qui est adopté dans la couche physique pour le projet d'accès dynamique au spectre et de radio cognitive (PHYDYAS) européen [31]. Ce filtre prototype a été introduit par Bellanger dans [32]. Le filtre prototype est conçu en utilisant la technique d'échantillonnage en fréquence [33]. L'idée de cette technique est, d'abord, de déterminer la réponse en fréquence $G(f)$ via la formule d'interpolation de la réponse en fréquence souhaitée. Les échantillons G_K qui sont uniformément espacés aux points de fréquence $F_K = KT$, k où K est le facteur de sur échantillonnage et T est la période de symbole.

$$G(f) = \sum_k G_K \frac{\sin(\pi(KTf - k))}{\pi(KTf - k)} \quad (2.13)$$

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

$$g(t) := \sum_k G_K e^{\frac{j\pi kt}{KT}} \quad (2.14)$$

Pour le filtre prototype PHYDYAS, le facteur de sur-échantillonnage est choisit pour être $K = 4$, et Les coefficients de fréquence G_K sont choisit selon la théorie de Nyquist et sont optimisés pour offrir la sélectivité maximale en fréquence et minimiser l'interférence totale qui provient à partir de la structure du banc de filtre [34]. Les coefficients de fréquence G_K choisit pour filtre PHYDYAS sont donnés par [35] :

$$\begin{cases} G_0 = 0 \\ G_1 = 0.9716960 \\ G_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ G_3 = \sqrt{1 - G_1^2} = 0.235147 \\ G_K = 0 \quad \text{POUR } K > 3 \\ G_K = G_{-K} \text{ POUR } K < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

2.6.2. Le filtre Hermite

Le filtre Hermite est obtenu à partir des combinaisons linéaires des fonctions Hermite-Gaussiennes. En déformant le filtre gaussien avec les fonctions Hermite haut de gamme, des passages à zéro sont fournis pour satisfaire le critère de Nyquist. Il présente des caractéristiques similaires avec l'IOTA et donne une réponse isotrope. La procédure de conception proposée par Haas et Belfiore [36] construit un filtre isotrope selon l'équation

$$p(t) = \sum_{k=0}^L a_k h_{4k}(t) \quad (2.16)$$

Où h_n est l'ensemble des fonctions Hermite définies comme

$$h_n(t) = \frac{1}{2\pi^{n/2}} e^{\pi t^2} \frac{d^n}{dt^n} e^{-2\pi t^2} \quad (2.17)$$

2.6.3. Le filtre cosinus surélevé de la racine (RRC)

Le filtre à cosinus surélevé à racine (RRC) est un filtre de référence bien connue en communication numérique. Pour une vitesse de transmission de $F = 1/T$, le filtre RRC est défini dans le Domaine fréquence par [37] :

$$G(f) = \begin{cases} \sqrt{T}|f| \leq (1-r) \frac{1}{2T} \\ \sqrt{T} \cos\left(\frac{\pi}{2r} \left(T|f| - \frac{1-r}{2}\right)\right) & \frac{1}{2T} < |f| \leq (1+r) \frac{1}{2T} \\ 0 & (1+r) \frac{1}{2T} < |f| \end{cases} \quad (2.18)$$

Où r est le paramètre roll-off ($0 \leq r \leq 1$). Ce filtre a une réponse en fréquence plus intéressante du faite son spectre est bien localisé parce qu'il est limité en fréquence. La réponse impulsionnelle du filtre RRC en temps continu est donnée par [38,39] :

$$g(t) = \frac{\sin\left(\frac{(1-r)\pi t}{T}\right) + \frac{4rt}{T} \cos\left(\frac{(1+r)\pi t}{T}\right)}{\frac{\pi t}{T} \left(1 - \left(\frac{4rt}{T}\right)^2\right)} \quad (2.19)$$

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

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modulations multi porteuse (MCM) et les différents techniques OFDM et FBMC, puis nous avons présenté un récapitulatif sur les notions élémentaires sur la modulation FBMC-OQAM qui a surmonté les limites de l'OFDM. Pour un petit nombre de sous porteuses, FBMC devient beaucoup plus efficace que l'OFDM, en particulier si la bande de transmission est partagée entre différents cas d'utilisation. Le Discussion par simulation de la technique FBMC utilisant une modulation O-QAM fait l'objet de chapitre suivant.

Chapitre 3 : Simulations et Résultats

3.1. Introduction

Après avoir finalisé la partie théorique, nous passons dans ce chapitre à l'implémentation de notre application.

Nous avons utilisé comme outil de programmation le simulateur Matlab c'est un langage technique d'informatique, il peut être utilisé pour le développement de l'algorithme, l'analyse des données, la visualisation et le calcul numérique.

On simule la modulation FBMC/OQAM et étudier ses performances avec le changement de types des canaux utilisant les différents canaux AWGN, Pedestrian A et Vehicular A, après on a changé les types des filtres RRC OQAM, PHYDYAS et HERMITE. On expose dans ce chapitre le modèle de simulation, les paramètres de simulation et les différents résultats de obtenus.

3.2. Modèle de simulation

Notre simulation est basée sur le schéma suivant :

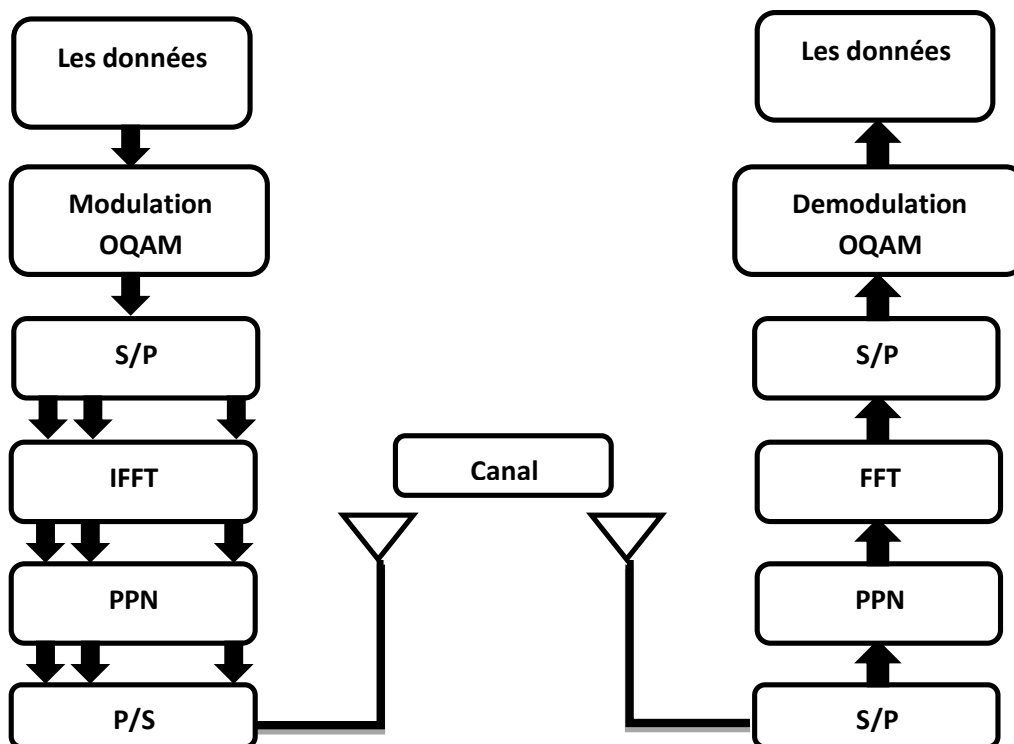


Figure 3. 1 Modèle de simulation

3.3. Comparaison des performances de BER d'OFDM et FBMC

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

3.3.1. Paramètres de simulation

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

Table 3. 1 Paramètre de simulation

3.3.2. Le canal AWGN

La figure 3.2 présente la comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal AWGN.

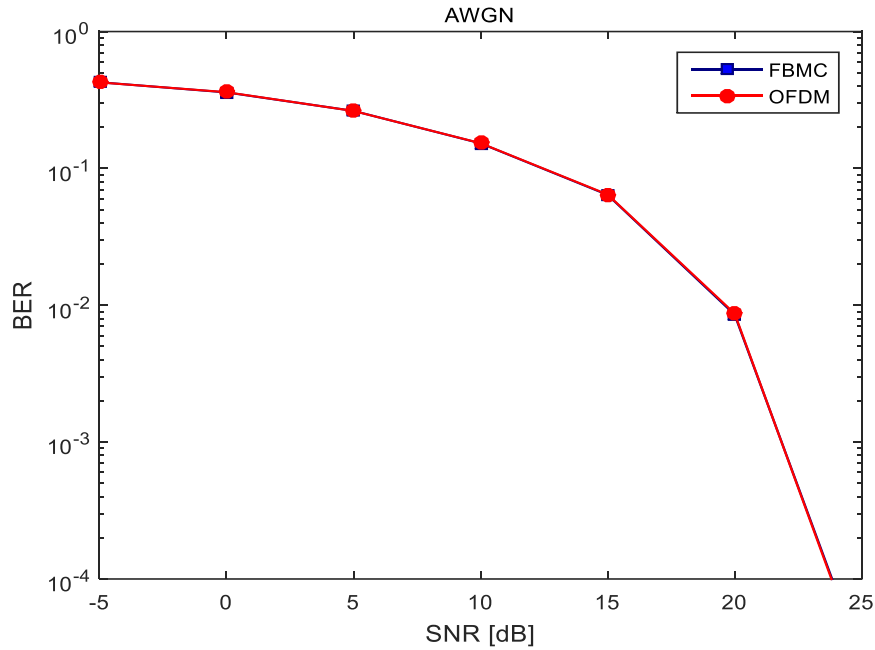


Figure 3. 2 Comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal AWGN

La figure 3.2 présente la comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal AWGN, à partir de cette figure on remarquant que les valeurs de taux d'erreur binaire FBMC et OFDM sont mêmes pour le canal AWGN.

3.3.3. Le canal Pedestrian A

La figure 3.3 présente la comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Pedestrian A :

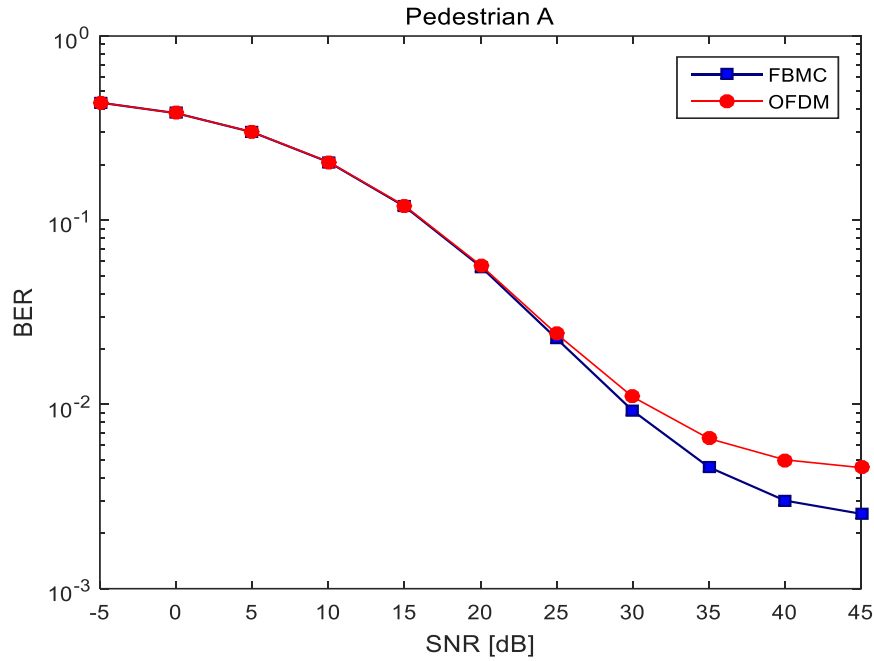


Figure 3. 3 Comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Pedestrian A.

La Figure 3.3 présente la comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Pedestrian A, à partir de cette figure on remarquant que les valeurs de taux d'erreur binaire FBMC et OFDM sont mêmes quand $SNR \leq 25$, et le BER de FBMC diminue par rapport le BER d'OFDM quand $SNR > 25$

3.3.4. Le canal Vehicular A

La figure 3.4 présente la comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Vehicular A :

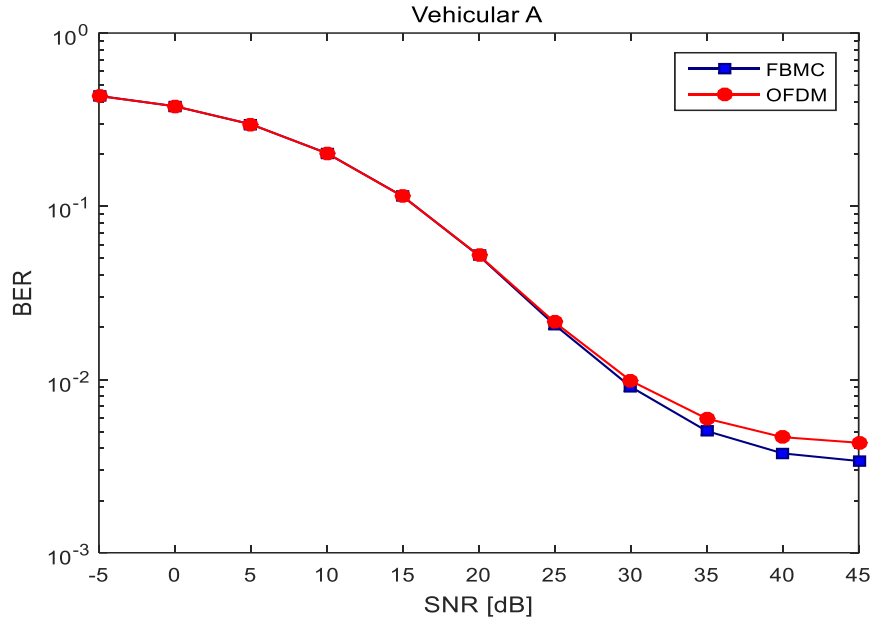


Figure 3. 4 Comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Vehicular A

La figure 3.4 présente la comparaison entre le BER d'OFDM et FBMC pour le canal Vehicular A, à partir de cette figure on remarquant que les valeurs de taux d'erreur binaire FBMC et OFDM sont mêmes quand $SNR \leq 30$, et le BER de FBMC diminue par rapport le BER d'OFDM quand $SNR > 30$

3.4. Comparaison des PSD d'OFDM et FBMC

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

3.4.1. Paramètres de simulation

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

Table 3. 2 Les paramètres de simulation.

3.4.2. Le filtre RRC OQAM

La figure 3.5 présente la comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC en fonction de la fréquence pour le filtre RRC OQAM :

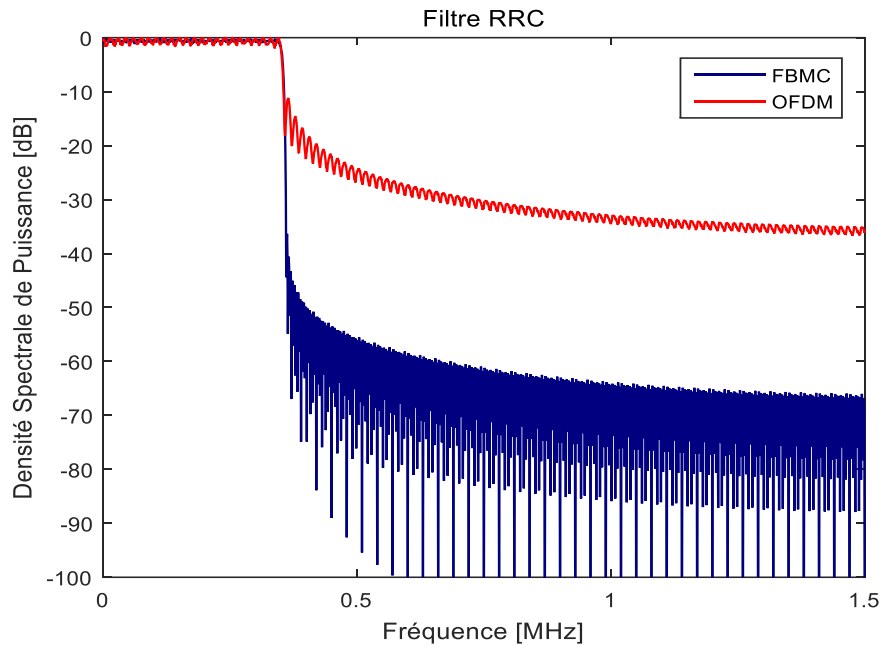


Figure 3. 5 Comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre RRC OQAM

La figure 3.5 présente la Comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre RRC OQAM, à partir de cette figure on a remarqué que les spectres FBMC et OFDM ont des lobes latéraux secondaire et le filtre RRC OQAM n'est pas efficace et a des fuites spectrale

3.4.3. Le filtre PHYDYAS

La figure 3.6 présente la comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC en fonction de la fréquence pour le filtre PHYDAS :

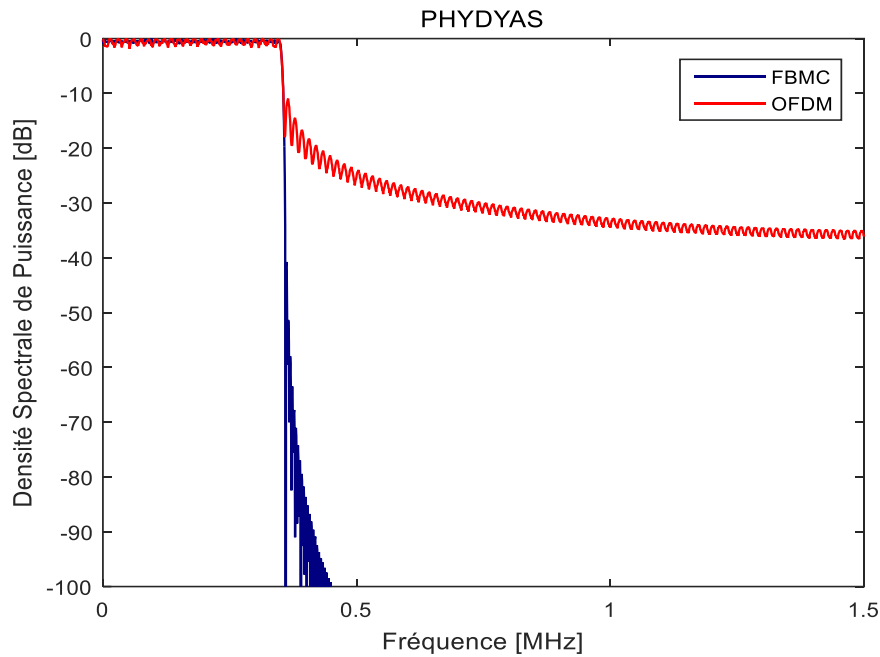


Figure 3. 6 Comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre PHYDYAS OQAM

La figure 3.6 présente la comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre PHYDYAS OQAM, à partir de cette figure on observe une grande diminution de fuite spectrale et des lobes latéraux secondaires par rapport la figure 3.5 pour le PSD de FBMC, plus qu'une efficacité spectrale élevée.

3.4.4. Le filtre Hermite

La figure 3.7 présente la comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC en fonction de la fréquence pour le filtre HERMITE :

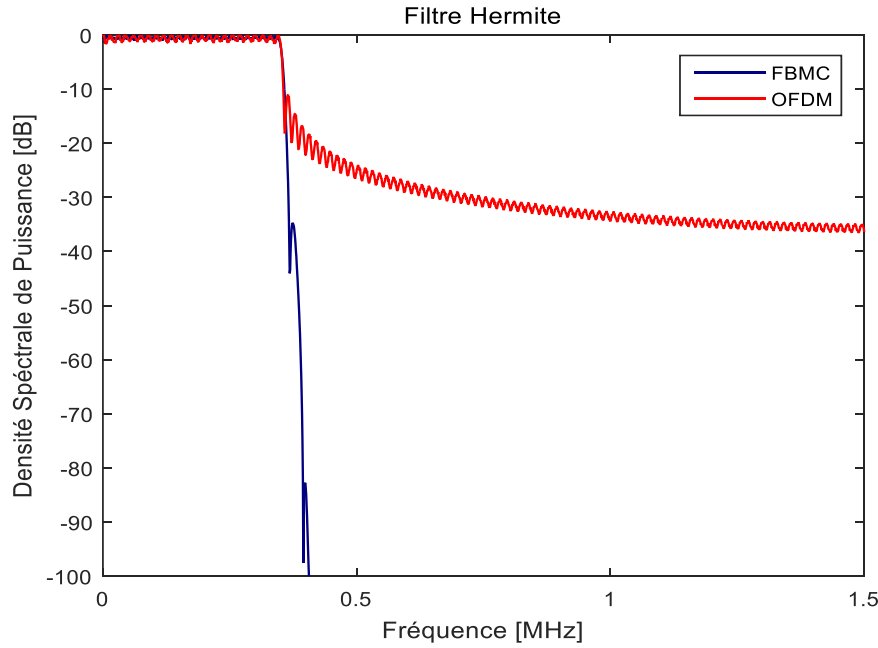


Figure 3. 7 Comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre Hermite OQAM

La figure 3.7 présente la Comparaison entre le PSD d'OFDM et FBMC pour le filtre Hermite OQAM. À partir de cette figure on a remarqué que le filtre Hermite OQAM est très efficace et a une analyse spectral de haute résolution, Aussi que on a vu que la fuite spectrale et les lobes latéraux secondaire sont disparus.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a calculé le BER en fonction du SNR utilisant trois catégories des canaux de transmission sans fil. Puis on a calculé le profil de puissance en fonction de la fréquence pour trois genres des filtres.

Après avoir finalisé l'étude de notre simulation on a constaté que le système FBMC est plus performant lorsqu'on change le type de filtre et on a obtient une meilleur résultat pour le filtre Hermite, nous avons remarqué aussi que plus on utilise le canal AWGN, plus on obtient de meilleurs résultats en terme BER et après la comparaison entre OFDM et FBMC-OQAM, nous remarquons que le système FBMC est meilleur que le système OFDM dans les canaux Pedestrian A et Vehicular A.

Les résultats nous permettent de constater que le genre du filtre influence sur le système FBMC par l'élimination d'OOB et la réduction d'interférence entre symbole.

Conclusion Générale

Suivant les tendances actuelles des télécommunications, le choix d'une forme d'onde basée sur les modulations multi-porteuses, justifié par des environnements fortement sélectifs en temps et en fréquence, Mais au regard des contraintes imposées par la coexistence avec les bandes étroites et des services visés, il est apparu que la forme classique multi-porteuses de type OFDM n'était pas la mieux adaptée en raison de sa mauvaise localisation fréquentielle et des hauteurs de lobes secondaires trop élevées.

Dans ce mémoire, nous avons étudié une problématique en communications numériques basée sur le traitement du signal, et le principal objectif de ce projet est d'élaborer la simulation comparative des techniques FBMC et OFDM pour des canaux sans fils. .

La simulation que nous avons réalisé a permis de montrer les intérêts d'une modulation et démodulation FBMC d'un point de vue de taux d'erreurs binaires (BER) et le profil de puissance (PSD), ainsi que le type de filtre Prototype et le genre du canal.

Les résultats nous permettent de constater que le genre du filtre influe sur le système FBMC par l'élimination d'OOB et la réduction d'interférence entre symbole. En outre, les meilleurs résultats sont obtenus par le filtre Hermite.

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

Références

REFERENCES

- [1] GEMALTO EQUIPE, Présentation des réseaux 5G-Caractéristiques et usages, www.gemalto.com, March 2019.
- [2] EDWARD M. ROCHE, BENJAMIN H. DICKENS-JR. ET WALKER TOWNES, La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation), Février 2018
- [3] JONATHAN RODRIGUEZ, Fundamental of 5G mobile network, Registered office John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, first published 2015.
- [4] RAHUL GOPAL, Analysis of PAPR reduction in 5g communication, thesis/ National Institute of Technology Rourkela, May 2015.
- [5] MOUSSA BABPA, Innovations et enjeux de la Technologie 5G, mbamci.com, mars, 2019.
- [6] EXPERTCOM, 5G : On vous dit tout de la nouvelle super-technologie, www.Expert.com. mars2017.
- [7] WALKER TOWNES, BENJAMIN H, EDWARD M. ROCHE, et DICKENS-JR. La prochaine génération de téléphonie mobile et ses implications, Février 2018
- [8] JON MUNDY and KEVIN THOMAS, What Is Massive MIMO Technology, 5G.co.uk, 2019.
- [9] ARCEP équipe, LES ENJEUX DE LA 5G, Autorité de régulation des communications électroniques et des postes, Mars 2017
- [10] HARISH KRISHNASWAMY, The biggest component on this full duplex Wi-Fi radio? The antenna, compeng.columbia.edu, May 10 2016
- [11] MATHIEU VAN ECKHAUTE, ANDRÉ BOURDOUX, Performance of emerging multi-carrier waveforms for 5G asynchronous communications, Eeckhaute et al. EURASIP Journal on Wireless Communications, 2017

REFERENCES

- [12] FRANCESCO DISTASIO, MARINA MONDIN, FRED DANESHGARAN, Multirate 5G Downlink Performance Comparison for f-OFDM and w-OFDM Schemes with Different Numerologies , arxiv.org,Jul 2018
- [13] XI ZHANG , MING JIA, LEI CHEN, JIANGLEI MA, JING QIU, Filtered-OFDM - Enabler for Flexible Waveform in The 5th Generation Cellular Networks, arxiv.org, Août 2015
- [14] PARNIKAKANSAL, ASHOK KUMAR SHANKHWAR, FBMC vs OFDM Waveform Contenders for 5G Wireless Communication System Department of Electronics, School of Engineering, Harcourt Butler Technical University (HBTU), Kanpur, India, Août 2017.
- [15] ALI JASIM RAMADHAN, Implementation of 5G FBMC PHYDYAS prototype filter Article in International Journal of Applied Engineering Research 12(23) · December 2017
- [16] TENSUBAM, B.D, CHANU N.L, AND SINGH, S, Comparative Analysis of FBMC and OFDM Multicarrier Techniques for Wireless Communication Networks. International Journal of Computer Applications, <https://doi.org>, Août 2014.
- [17] M. G. BELLANGER AND J. L.DAGUET, TDM-FDM transmultiplexer: digital polyphase and FFT, IEEE Transactions on Communications, vol. 22, no. 9, pp. 1199–1205, 1974.
- [18] HO ANH TAI. Application des techniques multiporteuses de type OFDM pour les futurs systèmes de télécommunications par satellite. THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT. L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE.2009
- [19] R.VANNÉE ET R. PRASAD, "OFDM for Wireless Multimedia Communications", Artech House Publishers, 2000.
- [20] A. AHRICHE, "Étude Comparative des Méthodes D'estimation de Canal à l'aide des Pilotes dans les Systèmes OFDM à Travers un Canal Multi-trajets", Université Laval Québec, 2008.

REFERENCES

- [21] TAO JIANG, DA CHEN, CHUNXING NI, DAIMING QU, OQAM/FBMC FOR FUTURE WIRELESS COMMUNICATIONS Principales, Technologies and Applications, Elsevier Ltd, 2018.
- [22] R. GERZAGUET, D. KTENAS& N. CASSIAU& J-B. DOR, Comparative study of 5G waveform candidates for below 6GHz air interface, CEA-Leti, janvier 2016.
- [23] HIDALGO STITZ, Filterbank Techniques for the Physical Layer in Wireless Communications. Ph.D Theses, Tampere University of Technology Publications, Tampere, (2010).
- [24] VAIDYANATHAN, P.P, Multirate Systems and Filterbanks. Prentice Hall, UpperSaddle River, (1993).
- [25] THEODORET N, RANDRIAMITANTSOA P.A, RANDRIAMITANTSOA A.A, ETUDE DE LA TECHNIQUE DE MODULATION FBMC/OQAM, Laboratoire de recherche en télécommunication, Automatique, Signal Et Images (LR-TASI). Vol.2, 2016.
- [26] M. FUHRWERK, J. PEISSIG, AND M. SCHELLMANN, On the design of an FBMC based air interface enabling channel adaptive pulse shaping per sub-band, in IEEE Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2015.
- [27] ROSTOM ZAKARIA, Conception d'émetteur et récepteur pour l'élimination des interférences intrinsèques dans les systèmes multi-porteuses à base de bancs de filtres et à antennes multiples, thèse/ École Doctorale Technologique et Professionnelle CEDRIC/LAETITIA, 2012.
- [28] HAIJIAN ZHANG, Modulations multi-porteuses à base de bancs de filtres pour la radio cognitive, thèse/ Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2010.
- [29] BEKKOUCHE HOUCINE. Synthèse de banc de filtres adaptés, application a la compression des images. Thèse de doctorat spécialité : automatique et traitement du signal. Université de paris-sud, 2007.

REFERENCES

- [30] ARI VIHOLAINEN, MAURICE BELLANGER, and MATHIEU HUCHARD, “Prototype filter and structure optimization,” website : www.ict-phydyas.org : Document D5.1 deliverable, 2009.
- [31] T. W. PARKS AND C. S. BURRUS, Digital filter design, Wiley-Interscience, New York, NY, USA, 1987.
- [32] ARI VIHOLAINEN, TEROIHALAINEN, TOBIAS HIDALGO STITZ, MARKKU RENFORS, and MAURICE BELLANGER, “Prototype filter design for filter bank based multicarrier transmission,” in 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), August 2009, pp. 1359–1363.
- [34] R. HAAS AND J.-C. BELFIORE, “A time-frequency well-localized pulse for multiple carrier transmission,” *Wireless Personal Communications*, vol. 5, no. 1, pp. 1–18, 1997
- [35] T.JIANGANDY.WU, “An overview: peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol.54, no.2, pp.257–268, 2008.
- [36] T.A. WEISS and F.K. JONDRAI, “Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency,” *Communications Magazine*, IEEE, vol. 42, no. 3, pp. S8 – 14, mar 2004.
- [37] P. CHEVILLAT AND G. UNGERBOECK, “Optimum FIR Transmitter and Receiver Filters for Data Transmission Over Band-Limited Channels,” *Communications*, *IEEE Transactions on* ,vol. 30, no. 8, pp. 1909 – 1915, a out 1982.